

Crystal Chamber

Documentação

Versão 1.2.J

2022 - 2025

Projeto Crystal Chamber, câmara de controle termodinâmico controlada por Arduino para nucleação e crescimento de cristais a partir de soluções salinas saturadas pelo método de evaporação.

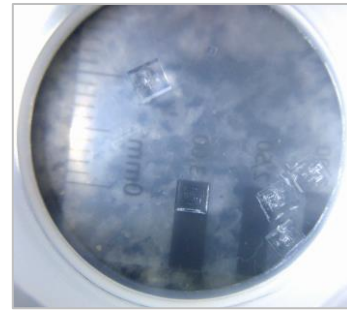
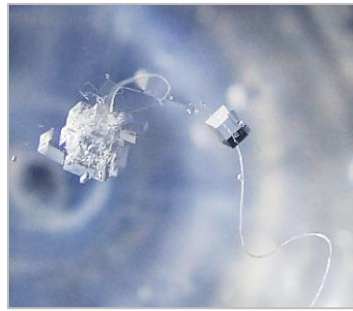
Idealizada e construída por Vinícius Coelho (Voelho)

Versão do sketch principal: Crystal Chamber J – 17/06/2025

Versão do sketch termostato: **Dispensado.**

SUMÁRIO

1. COMPONENTES	3
2. BIBLIOTECAS	3
3. PINAGEM	4
4. ALGORITMO	4
4.1. Modos de operação	4
4.2. Exposição padrão	4
4.2.1. Setup	2
4.2.2. Operação dos botões	2
4.2.3. Leitura e registro	3
4.2.4. Controle	4
4.2.5. Monitoramento	8
4.2.6. Notas operacionais	8
4.2.7. Comportamento típico	9
4.3. Ajuste do termostato	10
4.3.1. Heatbooster	12
4.4. Operação com balança	13
5. VARIÁVEIS E PARÂMETROS	14
5.1. Operação	14
5.2. Intervalos	14
5.3. Médias Móveis	14
5.4. Parâmetros de operação	16
5.5. Acompanhamento	15
6. ESQUEMÁTICOS	16
6.1. Estrutura	16
6.2. Conexões	18
6.3. Display	19
6.4. Imagens	20
6.4.1. Versão básica (1.1.G)	20
6.4.2. Atualizações (1.2.J)	21
7. ALTERAÇÕES	22



mrvoelho@gmail.com

1. COMPONENTES

Item	Qtd
Arduino UNO	1
Protoboard 400 Pontos	1
Fonte 12V 10A	1
Módulo XL4015 step-down	2
Fan + Dissipador	2
Pastilha Termoeletrica 12705	1
Microservo SG90 0 - 180°	1
Microservo SG90 Contínuo*	1

Item	Qtd
Sensor DHT22	3
Mini cooler 4 x 4 cm 5v 0,14A	1
Módulo Relé	3
Módulo MicroSD	1
Display OLED 128 x 64	1
Buzzer	1
Botões, cabos e resistores	-

*Servo SG90 adaptado para funcionamento em rotação contínua.

2. BIBLIOTECAS

Operação padrão

Arduino.h		Biblioteca básica
DHT.h	1.4.6 Adafruit	Leitura dos sensores DHT
PinButton.h	Multibutton 1.2.0 Poelstra	Controle de botões
SD.h		Registro em módulo SD
SPI.h		Comunicação serial
U8x8lib.h	U8g2 - 2.34.22 Oliver	Exibição do display com baixo consumo de memória
VarSpeedServo.h	Version 2 – 2013 Philip van Allen	Controle dos servos

Alternativos

HX711.h	HX711 0.7.5 Bodgan	Interação com célula de carga, apenas no modo de operação com balança
---------	-----------------------	---

3. PINAGEM

Operação padrão

Pino	Ligação	pinMode
2	DHT 2	-
3	Fan.Ext. RPM	-
4	TEC	output
5	DHT 1	-
6	DHT 3	-
7	Buzzer	-
8	SD - CS	-
9	Servo 1	-

Pino	Ligação	pinMode
10	Ventilador interno	output
11	SD – MOSI	-
12	SD – MISO	-
13	SD – SCK	-
A0	Leitor de voltagem	-
A1	BT Up	input
A2	BT Mid	input
A3	Servo 2 - Termostato	-

4. ALGORITMO

Esta seção descreve o funcionamento do algoritmo de controle na sequência de execução dos programas de forma esquemática. Maiores detalhes estão documentados no próprio Sketch.

4.1. Modos de operação

O sistema dispõe de 5 modos de operação, para diferentes condições higrotérmicas ou necessidade de ajustes.

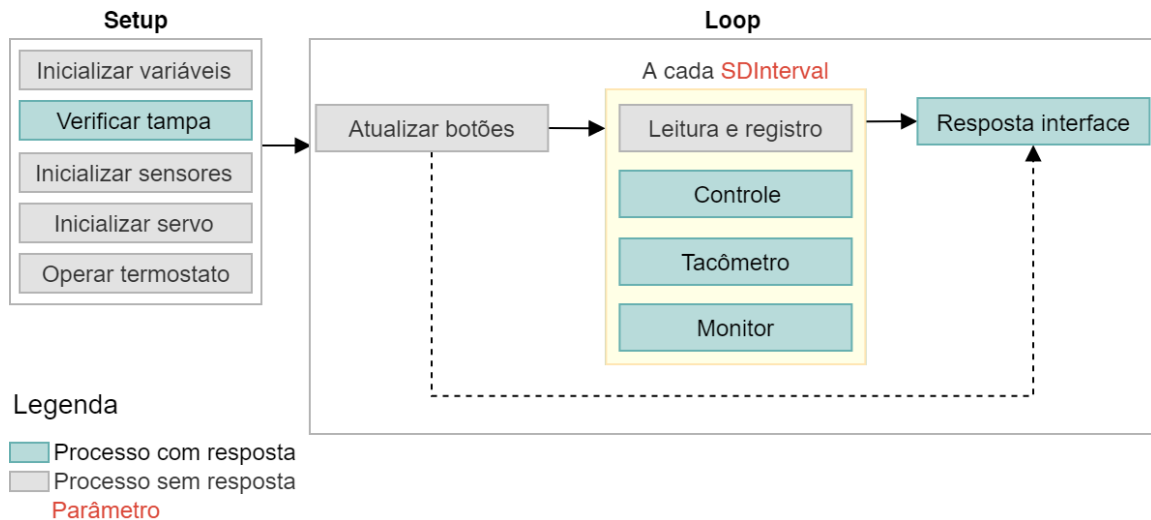
Modo	OPE	Indicador	Descrição
Manutenção	0	MAN	Modo onde os periféricos são desligados para operação física da câmara em caso de manutenção, observação ou ajustes. Útil para acompanhamento das condições de cristalização, já que tem que se ter acesso à câmara de umidade.
Controle T	1	T:	Primeira etapa do modo de operação, ajustando a faixa de temperatura para posterior ajuste da umidade.
Controle U	2	U:	Segunda etapa do modo de operação, permite o controle da umidade por secagem, apenas se dentro da faixa de temperatura estabelecida.
Apenas temperatura	3	T ₋	Controla apenas a temperatura para a faixa determinada. Útil para calibração dos sensores.
Ventilação	4	—	Modo de ventilação, não liga o controle térmico nem de secagem. Útil para calibração dos sensores ou exposição da solução em temperatura próxima à ambiente.
Apenas umidade	5	_U	Controla apenas a umidade para uma faixa determinada. Tem variação em função do comportamento dos DHT's em faixas de temperatura distintas. Útil para calibração dos sensores.
Clear		CL	Opção da interface que permite ignorar um estado de erro e continuar a operação (força <u>MoSt = 0</u> sem reset)

4.2. Exposição padrão

O sistema opera em verificação das condições de operação a cada SDInterval, realizando os ajustes nos controles e verificações de segurança. A inicialização tem como premissa a autonomia da operação, para caso de interrupções ou

quedas de energia, então vários processos de verificação têm prioridade de execução.

Diagrama 1 – Visão geral do algoritmo



4.2.1. Setup

O controle térmico é inicializado como ligado.

A verificação da tampa também tem como premissa a segurança da operação, garantindo que a ventoinha do dissipador quente da TEC esteja operando adequadamente para evitar sobreaquecimento. Se há leitura no tacômetro, então a caixa está fechada e a tampa externa está conectada à câmara. Os modos de operação com controle térmico requerem que a tampa esteja conectada, enquanto o modo de operação de calibração requer a tampa aberta, para evitar sobreaquecimento pela ventoinha interna da câmara de umidade.

Há movimentação do servo de controle de umidade para verificação visual de seu funcionamento, já que é crucial para o controle da umidade.

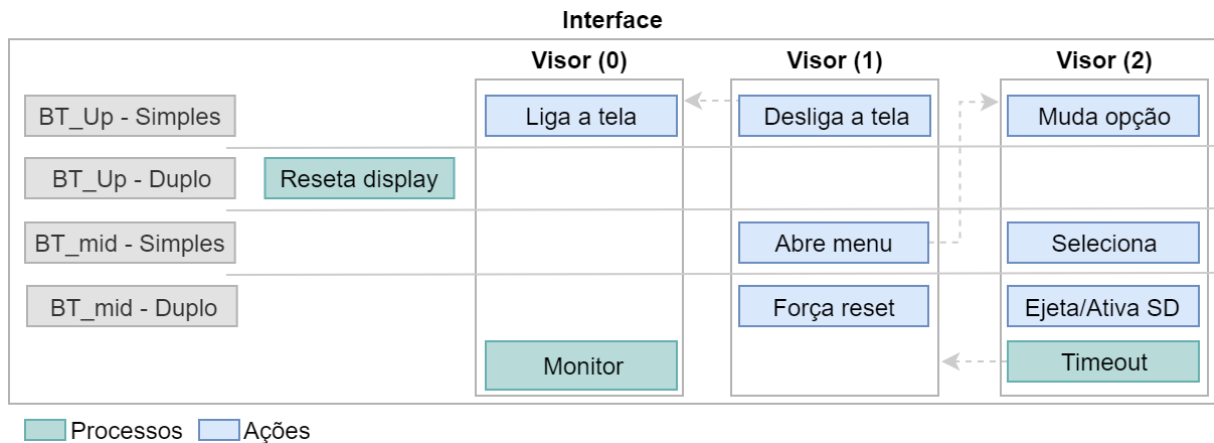
4.2.2. Operação dos botões

A interação dos botões é verificada a cada ciclo **Loop**, sendo registrada atividade a resposta dependerá do status do display (variável *Visor*). O duplo clique no *BT_Mid* durante *Visor_1* chama função *retornaOp*, para forçar um reset nas leituras e status do *Monitor*.

Duplo clique no botão *BT_Up* invoca reinicialização do visor, pois às vezes a conexão com o Arduino pode ser corrompida por mal contato nos fios ou alguma agitação nos terminais do display LCD.

Variável *intInterval* controla o período de timeout do menu, retornando à tela de acompanhamento de operação.

Diagrama 2 – Ações da interface

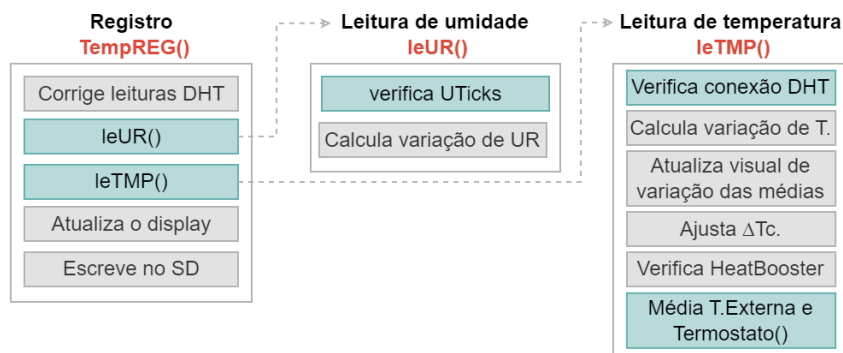


4.2.3. Leitura e registro

As leituras de temperatura e umidade são realizadas pela função *TempReg()*. Neste estágio são aplicadas as equações de calibração dos sensores DHT e se organizam os dados no display caso *Visor = 1*. Não é feita leitura ou registro no modo de manutenção (item 4.1)

Se o cartão SD estiver conectado (*vSD = true*), verifica-se se é o momento de fazer o registro das informações (*SDticks = 0*), se não, registra-se o salto do intervalo. O atraso evita a escrita de múltiplos dados em intervalo relativamente pequeno (todo *SDInterval*), que produz um arquivo longo e com informações desnecessárias.

Diagrama 3 – Leitura e registro



Leitura de umidade (Função leUR)

A leitura de umidade também é atrasada (*UTicks*) para diminuir a influência de flutuações momentâneas derivadas de pequenas variações de temperatura ou de condições operacionais no controle.

Leitura de temperatura (Função leTMP)

É verificado se há algum mal contato ou perda de conexão com o sensor DHT do ambiente de exposição (sinalizado ao monitor com *MoSt = 7*). Também é feita a leitura instantânea, atualização das médias móveis e do indicativo visual de variação (item 6.1).

Também é feito o ajuste do fator de correção da função do termostato. Às vezes a curva de calibração ainda não está alinhada com o regime de operação,

desvios da temperatura desejada (*Talvo*) existindo possibilidade de ajuste. Neste caso, compensa-se o *DT* (diferença de temperatura entre ambiente externo e interno) com um valor *DTc* igual ao último valor de ajuste somado da diferença entre a temperatura estabilizada e *Talvo*. Este ajuste é realizado a cada *varInterval* de acordo com a condição observada (se *DTc < 0* e a temperatura está aumentando; se *DTc > 0* e a temperatura está caindo ou quando a temperatura está constante).

A variação em *DTc* é reduzida a 1/3 do valor original se o HeatBooster (Item 4.3.1) estiver ligado (*HB = true*), para evitar que o ganho de potência temporário seja desfeito rapidamente pelo ajuste. Em um cenário onde a temperatura ambiente seja consideravelmente próxima da temperatura alvo, o ajuste de voltagem coloca o sistema em potência mínima, assim o valor de *DTc* passa a ser zero, para evitar uma tentativa impossível de se reduzir ainda mais a potência (com impactos em estágios futuros da operação) ou pelo menos o valor do booster, se estiver ativo.

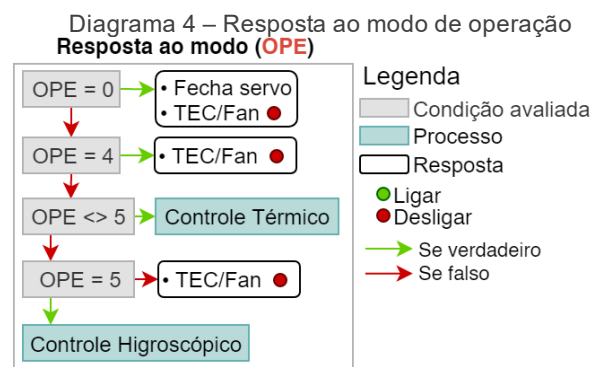
Se o HeatBooster estiver ligado (*HB = true*) é verificado se a temperatura externa parou de aumentar durante os últimos dois intervalos *varInterval*. Caso o a média móvel tenha se mantido constante ou reduzido, entende-se que o HeatBooster pode ser dispensado.

4.2.4. Controle

Operação Geral

A resposta do sistema de controle é dependente do modo de operação vigente, variável *OPE* (Item 5.1), sendo prioridade o estado de manutenção, também utilizado para interromper o controle em caso de alguma violação das condições de segurança.

As condições de segurança são verificadas pela função *Monitor()*, buscando evitar que cenários desfavoráveis à evaporação ou estabilidade do crescimento dos cristais ocorram (ex. umidade relativa muito baixa).



Controle Térmico

Dada a dependência da umidade relativa em relação à temperatura, busca-se estabilizar a exposição dentro da faixa alvo antes de iniciar o controle de umidade. É utilizada como referência de acompanhamento a média móvel (T.méd), para minimizar a influência de flutuações do sensor.

Os eventos marcados no diagrama são ilustrados no gráfico dos cenários de temperatura, com os comportamentos possíveis da temperatura média. Dada a premissa de ajuste constante da temperatura, somente um erro crítico sinalizado pelo *Monitor()* irá desativar o modo de controle de umidade após ter sido ativado.

Diagrama 5 – Diagrama do controle térmico

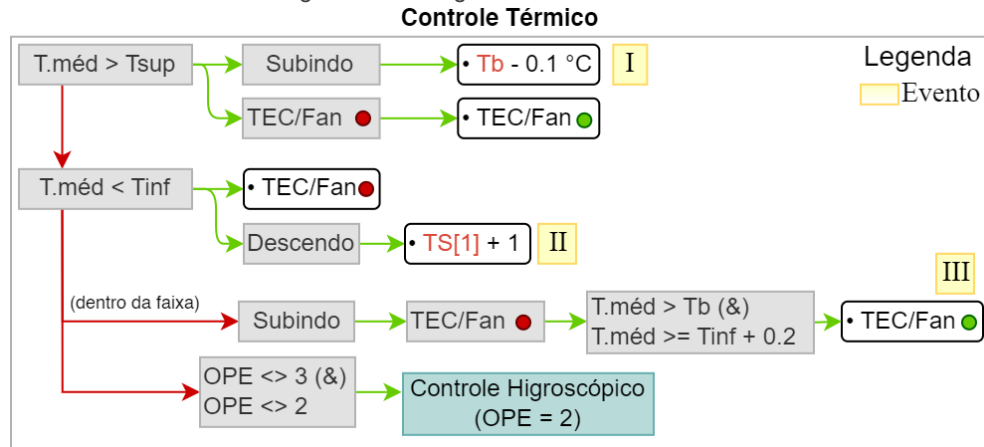
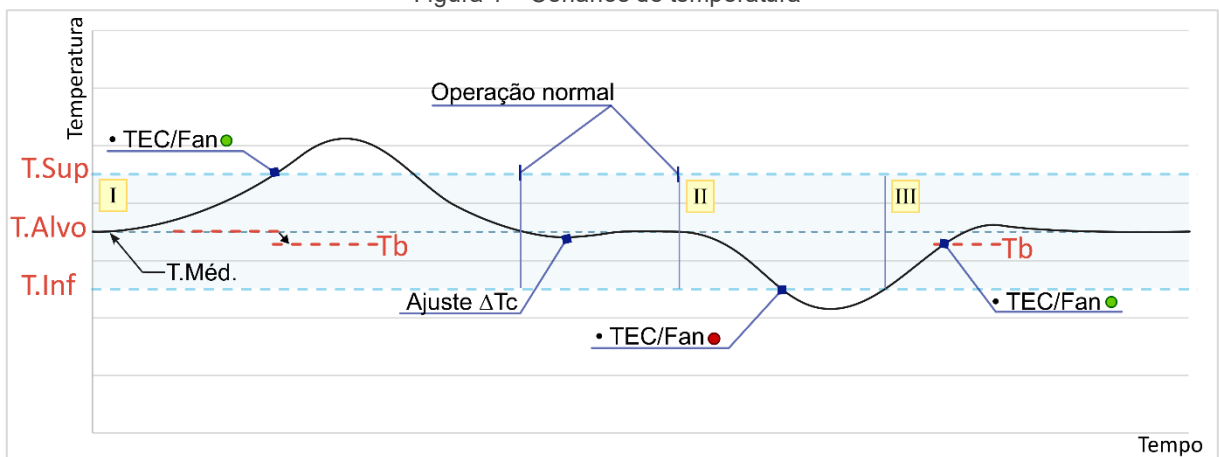


Figura 1 – Cenários de temperatura



Controle Higroscópico

O regime de controle higroscópico busca ajustar a abertura do servo para aproximar a umidade relativa da câmara do valor alvo (*Ualvo*). O valor de equilíbrio da exposição depende da evaporação das soluções salinas e da adsorção da sílica gel. A primeira é função da área de exposição, da quantidade de solução e sua concentração, e da própria umidade relativa, enquanto a segunda depende ainda do nível de saturação da sílica, parâmetros interrelacionados e de relação complexa, dependentes ainda da temperatura. Logo, o equilíbrio é atingido de forma dinâmica, observando como uma determinada abertura da *trapdoor* modifica a umidade da câmara e ajustando-a para manter dentro dos níveis esperados.

Em resumo, o controle é baseado no ajuste da intensidade de secagem. O aumento da umidade relativa ocorre apenas em função evaporação da solução, principalmente quando a *trapdoor* está em posição mínima.

Diagrama 6 – Diagrama do controle higroscópico

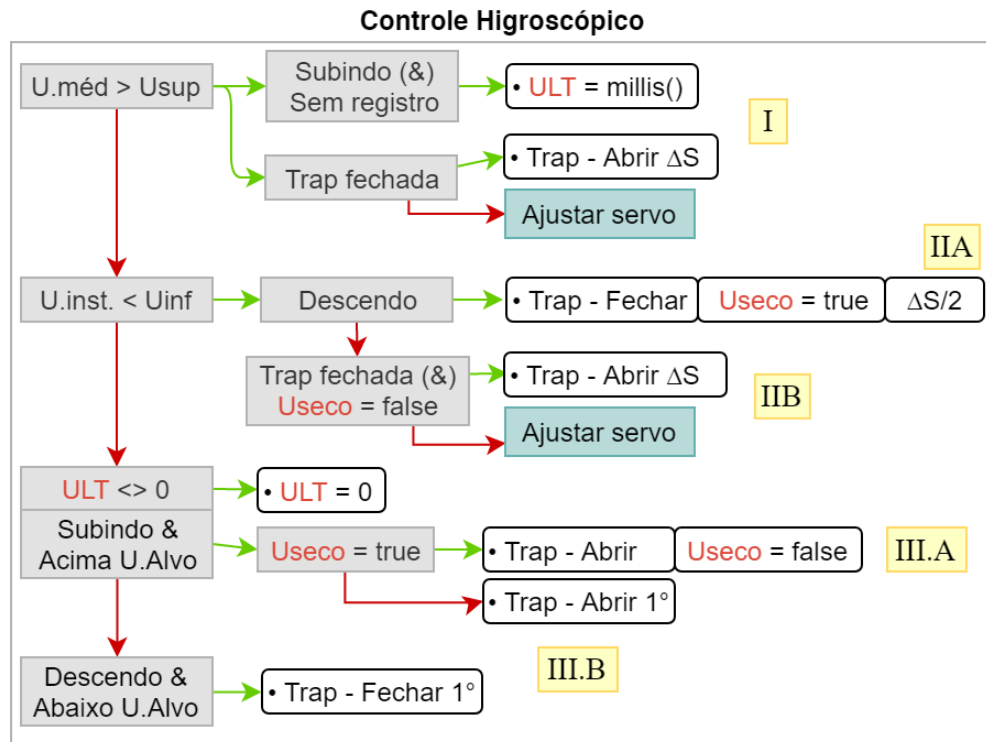
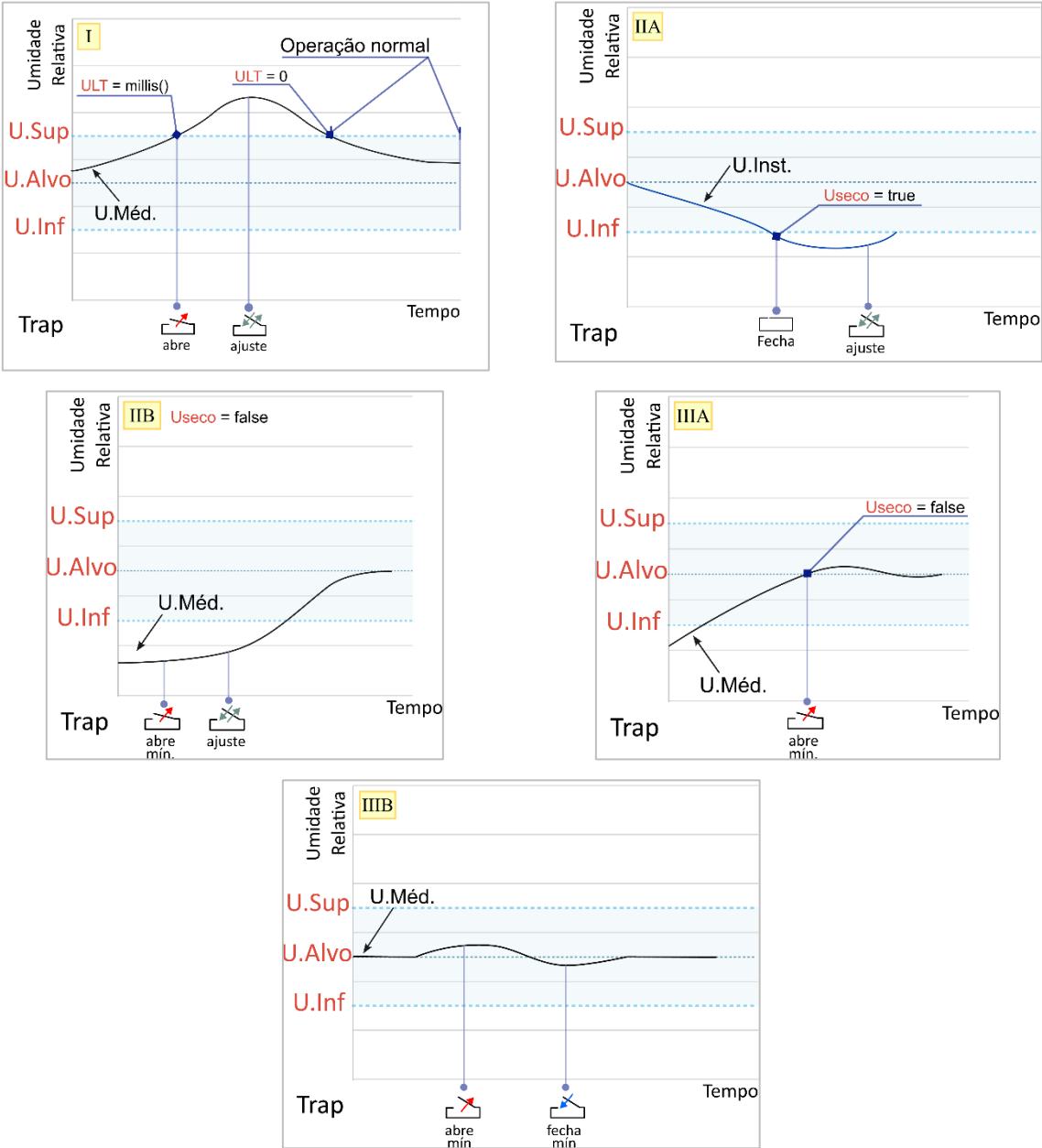


Figura 2 – Cenários de Umidade



4.2.5. Monitoramento

Verificações de segurança e estabilidade são realizadas a cada *SDInterval*, se a tela estiver ligada, e a cada ciclo da função *Loop*, se a tela estiver desligada, por meio da função *Monitor()*. As eventuais violações às situações verificadas são reportadas como erros por meio da variável *MoSt* (sigla para Monitor Status).

Se um alerta for disparado, o display é ligado e é emitido alerta pelo buzzer.

MoSt	Situação
0	Sistema em manutenção, é interrompida a realização das leituras e os componentes são desativados, possibilitando a remoção ou alteração de componentes sem corromper as leituras ou funcionamento
1	Sistema retornando de um estado de manutenção, há uma tolerância para algumas verificações relacionadas à temperatura, por exemplo a que dispara <i>MoSt = 6</i>
2	Obsoleta na versão 1.2.J
3	Umidade acima do limite superior por mais de duas horas. Possível saturação da sílica gel a um nível que não mais adsorve o suficiente, sinalizando necessidade de substituição.
4	Mais de 4 ocorrências da temperatura média abaixo de <i>Tinf</i> . Possível situação de potência de resfriamento muito elevada.
5	RPM da fan externa menor que o limite por 1 minuto. Possível falha nas conexões ou comprometimento da ventoinha, de modo que o sistema pode sofrer sobreaquecimento ou perder eficiência. É uma situação crítica que dispara manutenção.
6	Temperatura média interna acima de 2 °C de <i>Tsup</i> e subindo. Possível falha de algum componente, situação crítica que dispara manutenção.
7	Leitura de temperatura igual a zero. Possível perda de conexão com o sensor ou falha dele. Pode disparar manutenção se associado à condição do <i>MoSt = 4</i> .

4.2.6. Notas operacionais

retomaOp

É a função que faz o reset da operação, zerando a maior parte dos parâmetros de controle. Chamada ao retornar de um estado de manutenção, para *retomada da operação*, ou durante um reset forçado pelo clique duplo no *BT_Mid*

Nos modos de operação 4 e 5 o ventilador interno só é ligado se a tampa estiver desconectada

O cartão SD faz a descarga do buffer (flush) a *SDticks* ciclos para garantir que os dados sejam escritos e não perdidos em caso de falha de energia ou outra interrupção.

A interface com o cartão só é finalizada com a função *operaSD*, responsável por finalizar e reinicializar o cartão junto ao sistema, permitindo a remoção temporária durante operação.

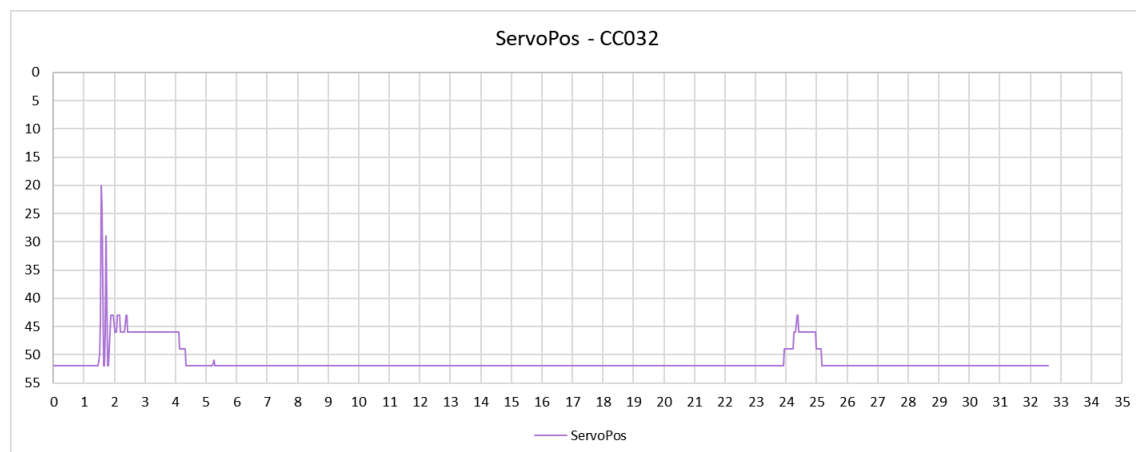
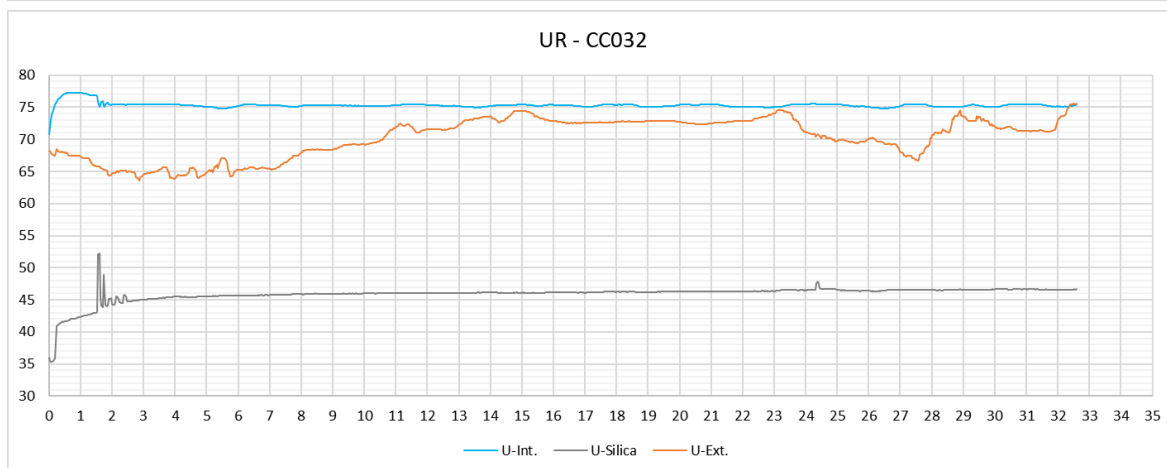
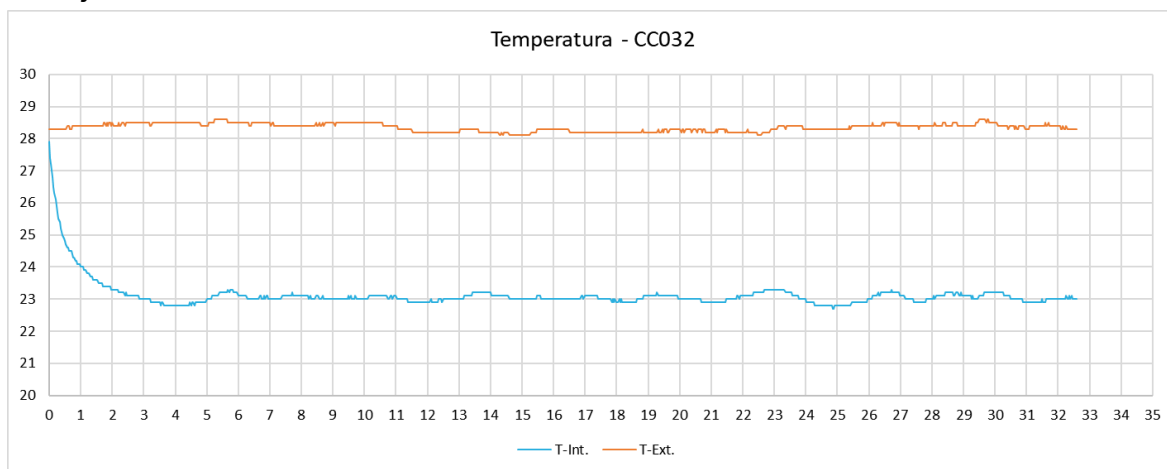
Função de ajuste do servo (*ajServo*) possui sistema de freio para evitar variações de umidade muito bruscas que podem comprometer a formação cristalina, garantindo também que a variação não seja muito baixa em momentos muito afastados da faixa alvo – o que tornaria a exposição muito demorada.

Os valores limites são relativos à distância entre a umidade média e a faixa alvo durante a última verificação registrada a cada *Uticks* ciclos. Por padrão, as faixas de controle são: Acima de 5%, entre 2% e 5% e abaixo de 2%, com as variações máximas permitidas de: 1%, 0,5% e 0,2% respectivamente.

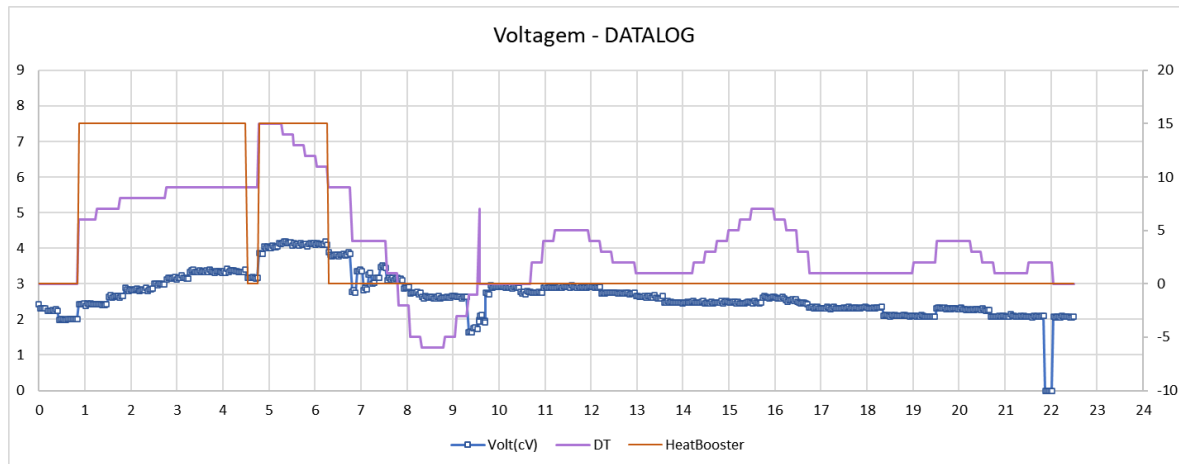
4.2.7. Comportamento típico

Os gráficos abaixo mostram o comportamento típico das condições da câmara. A câmara foi configurada para *Talvo* de 23,0 °C e *Ualvo* de 75,4%. Após atingir o ponto de equilíbrio, a temperatura interna oscilou em $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, enquanto a umidade relativa média ficou em torno de 75,2%. É interessante observar que as variações mais expressivas ocorrem de forma suave após atingir o ponto de equilíbrio, garantindo que o ambiente de exposição não sofra choques termodinâmicos que possam comprometer a formação cristalina.

Também é representada a curva de umidade relativa do recipiente com a sílica gel, útil para determinar quando o dissecante já estiver suficientemente saturado. Com a porta fechada há mínima transferência de ar, levando ao aumento gradual da umidade. Quando aberta, a resposta é rápida, justificando a necessidade de ajuste constante da abertura.



Com a versão (1.2.J) tem-se um novo dado de comportamento do termostato. Agora representado pela variação de voltagem da TEC, valor da variável DT e período de ativação do HeatBooster.



4.3. Ajuste do termostato

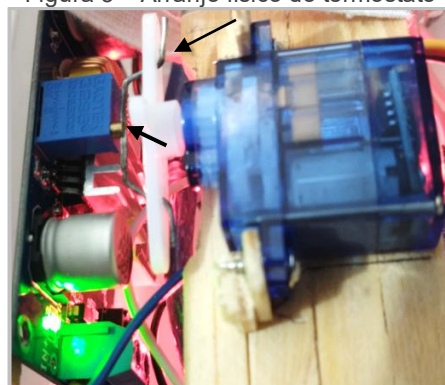
Observação

❖ A partir da versão 1.2.J, o termostato é controlado por um servo de rotação contínua. Para detalhamento da operação com um servo convencional (0° a 180°), consultar versão 1.1.G.

O controle da potência de resfriamento é realizado por um servo (termostato) fisicamente conectado à fonte de tensão que alimenta a TEC. O servo ajusta o parafuso de controle de tensão saída da fonte, que está relacionada à potência de resfriamento da câmara. O ajuste é baseado na relação entre tensão e diferença de temperatura entre o ambiente externo e a parte interna da câmara (DT).

A conexão entre servo e regulador de voltagem foi feita utilizando-se um arame de metal, fixado fisicamente em um dos braços do servo por dobra entre os furos, encaixando no parafuso (Figura 3).

Figura 3 – Arranjo físico do termostato



É importante observar que o arranjo físico da câmara, em especial sua capacidade de isolamento, é o principal fator associado ao desempenho térmico do sistema e à capacidade de resposta às variações da temperatura ambiente. Consequentemente, a intensidade da resposta e sensibilidade às variações de temperatura (princípio de operação do HeatBooster) também são diretamente dependentes do arranjo.

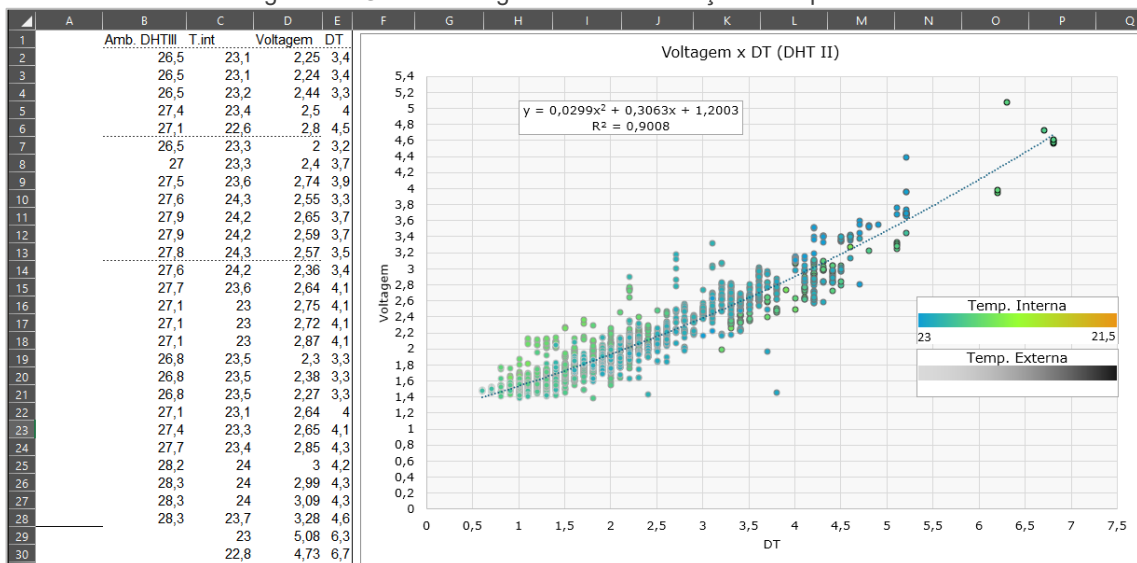
Assim, é necessário um período de observação e coleta de dados para relacionar a tensão de alimentação da TEC com a temperatura interna de equilíbrio do sistema:

Deve-se observar quais os valores de equilíbrio da temperatura interna de acordo com a tensão de alimentação do circuito, coletando-se a temperatura ambiente, a temperatura interna e a voltagem aplicada. Desta forma, pode-se traçar um gráfico que relaciona a voltagem com a diferença de temperatura (entre ambiente externo e interno) e obter uma curva de regressão (função *voltagem (DT)* em regressão quadrática usando softwares como o Microsoft Excel (Figura 4).

A curva de calibração deve cobrir a faixa de diferenças de temperatura em função das variações esperadas para as condições ambientais. Desta forma, se faz necessário um contínuo refinamento da curva com novos dados à medida em que a temperatura oscila ao longo do ano até que se tenha um perfil de controle satisfatório. A primeira execução é feita manualmente, com uma tensão de alimentação fixa, para se obter os pontos iniciais de uma equação de calibração básica que permita o uso do servo.

Para auxiliar no processo de refinamento, é realizado o registro de dados no cartão SD durante a função *Termostato()* para coleta de pontos após 3 períodos *varInterval* de estabilidade da temperatura. Estes dados complementam a planilha e melhoram a precisão da curva.

Figura 4 – Gráfico voltagem versus diferença de temperatura



A detecção de tensão é realizada pela leitura de um simples divisor de voltagem por um dos pinos analógicos. O divisor é configurado para mapear a faixa de tensão entre 0 a 12 v para 0 a 5 v, com o arranjo do Item 6.2.

Em seguida, é necessário configurar o servo de rotação contínua. Um servo normal (Ex. SG90) pode ser convertido para rotação contínua e há vários tutoriais na internet, cada um com suas vantagens e desvantagens. A solução adotada neste arranjo foi posicionar o servo na posição 90° e encurtar o eixo das engrenagens, removendo a conexão com o potenciômetro. A principal vantagem desta abordagem é a reversibilidade, bastando substituir o eixo cortado por outro inteiro para se recuperar a funcionalidade original, enquanto o maior risco é

eventual instabilidade, uma vez que o potenciômetro segue livre e possíveis movimentações físicas podem removê-lo da posição de repouso.

Ao contrário dos servos convencionais, onde controla-se a posição, os servos de rotação contínua têm sua velocidade controlada. Assim, com o servo conectado ao parafuso de ajuste do regulador de voltagem, é necessário saber quanto tempo mantê-lo girando, em uma determinada velocidade, e para qual sentido para atingir a voltagem alvo.

Em um primeiro momento, deve-se conhecer a velocidade angular do servo para cada valor da função `write()`, tendo em mente que a velocidade varia em função da carga a que o servo está exposto. Assim, se possível, deve-se fazer esta calibração com o servo já acoplado ao regulador de voltagem.

Recomendo que sejam feitos vídeos do servo dando pelo menos 5 voltas em cada velocidade de interesse (exemplo: entre as posições 87 e 97). Em seguida, calcular a velocidade média de cada volta utilizando como referência os tempos do vídeo. Exemplo na tabela abaixo.

Posição	Velocidade angular	Variação
88 (anti-horário)	116,6 °/s	0,5 v/s
96 (horário)	147 °/s	0,61 v/s
Regulador de voltagem	1,224 v/360°	
Média	0,55 v/s	

De posse da variação de tensão em função do tempo de ativação do servo, ajusta-se o algoritmo para calcular a diferença entre a voltagem alvo da voltagem atual do sistema e acionar o servo pela devida duração no sentido correspondente ao ajuste. É interessante que o ajuste seja realizado em um determinado número de tentativas, para compensar os erros em relação ao ajuste de tensão (variação da real velocidade angular em relação à média calculada, mudanças na variação do regulador de voltagem por grau, flutuações da saída em função da carga na placa Peltier etc.)

Observações

- ❖ Estabelecer um mínimo e máximo de voltagem para evitar que a tentativa de ajuste do sistema ultrapasse os limites operacionais ou físicos da fonte de tensão.
- ❖ A estabilidade da temperatura interna depende do balanço de energia térmica da câmara (com destaque para a condutibilidade térmica do arranjo), a coleta de dados de equilíbrio em várias voltagens pode originar uma curva característica que auxilia a determinar se a faixa de trabalho desejada é possível. Igualmente, se houverem modificações na estrutura da câmara, uma nova curva deve ser calculada.

4.3.1. Heatbooster

A implementação do servo de rotação contínua trouxe grande versatilidade para a operação da câmara durante longos períodos e quando exposta a variações sazonais significativas. No entanto, foi observado que o equilíbrio térmico interno se tornou mais sensível a eventos de aquecimento com uma resposta retardada, o que é negativo para a operação, dada a redução momentânea da umidade relativa.

A lentidão na resposta vem da abordagem do algoritmo em regular a posição do termostato para o ponto de equilíbrio com a temperatura externa atual, que

está variando. Assim, caso a temperatura externa esteja subindo mais rapidamente do que o sistema pode responder, há aumento da temperatura interna. Para compensar este efeito, foi desenvolvido o algoritmo “heatbooster”, que consiste em aumentar temporariamente a potência do resfriamento para *antecipar* a temperatura final, por meio de um acréscimo na variável DTc. O valor do acréscimo e da taxa de temperatura que desencadeia o uso do heatbooster devem ser determinados experimentalmente observando-se os registros de temperatura externa e interna após algumas seções.

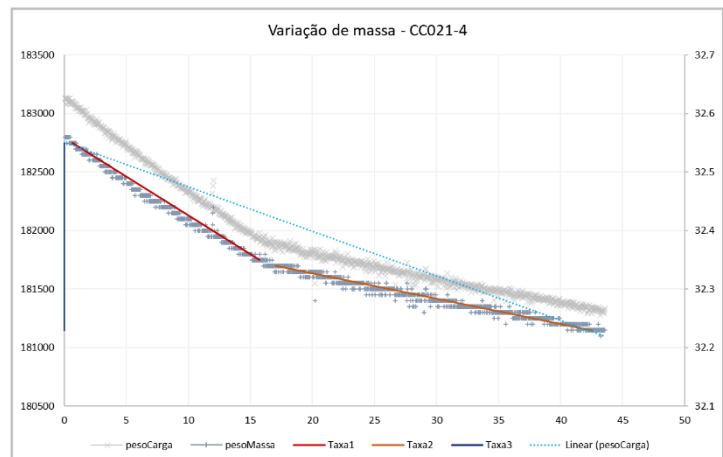
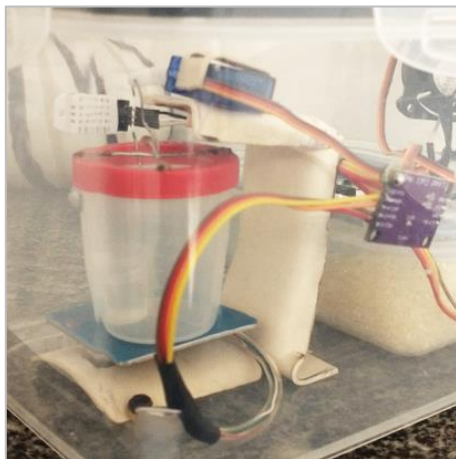
Por estarmos aplicando uma variação de temperatura superior à atual registrada pelo algoritmo, se faz necessário reduzir a capacidade de ajuste durante a vigência do heatbooster. O valor de 1/3 do ajuste nominal foi bastante satisfatório, mas outros valores podem ser adotados conforme cada condição – ver a função TermoAjuste().

4.4. Operação com balança

Um arranjo alternativo para a câmara consiste em utilizar um módulo HX711 junto a uma célula de carga para fazer a medição direta da variação de massa da solução salina, observando-se assim a taxa de evaporação real em função das condições de exposição.

A experiência mostrou que para reduzir o erro associado à célula de carga, se faz necessário calibrar o sensor antes de cada leitura, evitando desvios e acúmulo de erros com o tempo. Assim, é necessário remover o frasco do prato de pesagem, iniciar e tarar a balança e só então recolocá-lo e realizar a pesagem. A solução adotada foi utilizar um servo para suspender e abaixar o frasco com a solução durante estes estágios.

Esta variação usa um sketch próprio e precisa de quase todos os pinos disponíveis no Arduino. Além disso, há requerimentos quanto ao suporte do servo, estrutura de apoio da célula de carga e do elemento de suspensão do frasco que não fazem parte do detalhamento deste material. Abaixo é apresentado o esquema utilizado e um resultado típico da variação de massa ao longo do tempo.



5. VARIÁVEIS E PARÂMETROS

O sistema prioriza a adoção de lógica aritmética de inteiros durante os cálculos e verificações, para poupar memória e otimizar o processamento do Arduino UNO. É utilizado cálculo em ponto flutuante apenas em momentos específicos. Na descrição das variáveis, os valores padrão são destacados em negrito.

5.1. Operação

Tipo	Nome	Valores	Descrição
unsigned char	intLim	0	Registra a quantidade de opções do menu
	OPE	0 – Manutenção 1 – Controle de temperatura 2 – Controle de umidade 3 – Apenas temperatura 4 – Calibração 5 – Apenas umidade	Controla o estado de operação. Tem requisitos com a <u>tampa</u>
	Visor	0 – Desligado 1 – Em operação 2 – Menu	Controla o modo de operação do display.
	SDticks	0	Atrasa a escrita no cartão SD
	Uticks	0	Atrasa a resposta do controle de umidade
char	intSel	0	Opera o seletor do menu
bool	MAN	True/ False	Verifica se sistema veio de um estado de manutenção para reset
	vSD	True/ False	Avalia se o cartão SD está inserido

5.2. Intervalos

Tipo	Nome	Valores	Descrição
unsigned long	SDLT	0	Horário do último ciclo
	TECon	0	Horário que ligou a TEC
	ULT	0	Horário de início do acompanhamento de umidade
	RPMLT	0	Horário que a ventoinha apresentou RPM abaixo do limite
	varLT	0	Horário de registro da última variação da média
	intLT	0	Horário da última ação na interface
	termLT	0	Horário da última alteração do termostato
	buzzerLT	0	Horário do último alerta do buzzer
	boostLT	0	Horário do último reset do termostato por temperatura alta
const unsigned long	SDInterval	20000	Intervalo de ciclo de operação (milissegundos)
	varInterval	900000	Registro da variação da média a cada 15 minutos
	intInterval	5500	Timeout para ação no menu e retorno à tela padrão
	termInterval	180000	Intervalo para funções do termostato
	buzzerInterval	600000	Horário para repetir os alertas sonoros

5.3. Médias Móveis

Tipo	Nome	Valores	Descrição
unsigned char	pTin	0	Índice de posição do buffer circular da temperatura interna
	pUin	0	Índice de posição do buffer circular da umidade interna
	pTex	0	Índice de posição do buffer circular da temperatura externa
	vTin	0	Validador de dados da média de temperatura interna
	vUin	0	Validador de dados da média de umidade interna
	vTex	0	Validador de dados da média de temperatura externa
int	mTin[6]	0	Buffer circular para média móvel da temperatura interna
	mUin[6]	0	Buffer circular para média móvel da umidade interna
	mTex[6]	0	Buffer circular para média móvel da temperatura externa

5.4. Acompanhamento

Tipo	Nome	Valores	Descrição
bool	intW	True/ False	Mantém o display ligado durante interação com menu
	OPT	True/ False	Acompanha status da TEC
	tampa	True /False	Observa se a tampa está conectada ou não
	UsecO	True/ False	Registra se houve secagem excessiva durante operação
	HB	True/ False	Registra o status do “HeatBooster”
int	rpm	5000	Leitura do RPM da ventoinha externa, inicia alto para passar verificação inicial
	US[3]		Status da umidade 0 – Sentido da variação (1: subindo -1: descendo) 1 – Posição do servo trapdoor 2 – Variação do ângulo do servo trapdoor
	varM		Multiplicador da variação para status de 15 minutos
	varV	9000	Indicador de 15 minutos – temperatura
	varVE	9000	Indicador de 15 minutos – temperatura externa
	varU	9000	Indicador de 15 minutos – umidade
	conT[3]		Acompanhamento dos valores de temperatura 0 – Temperatura anterior, para cálculo de variação 1 – Média móvel de 5 leituras 2 – Temperatura há 15 minutos
	conU[4]		Acompanhamento dos valores de umidade 0 – Umidade anterior, para cálculo de variação 1 – Média móvel de 5 leituras 2 – Módulo da última variação 3 – Umidade há 15 minutos
	conE[3]		Acompanhamento da temperatura externa 0 – Temperatura há 15 minutos 1 – Média móvel de 5 leituras 2 – Temperatura referência para o HeatBooster
	adcRead	0	Leitura de voltagem da TEC pelo ADC
	Vtec	0	Média móvel da voltagem de alimentação da TEC
	Valvo	300	Alvo de voltagem da TEC, inicializada em 3,0 volts
char	TS[2]		Status da temperatura 0 – Sentido da variação (1: subindo -1: descendo) 1 – Ocorrências abaixo de <u>Tinf</u>
	MoSt	1	Status do <u>Monitor</u> 0 – Normal 1 – Retorno de manutenção 2 – Baixa potência TEC 3 – Baixa capacidade de secagem 4 – Alta potência TEC 5 – Falha da ventoinha 6 – Temp. acima de <u>Tsup</u> 7 – Falha com o DHT
unsigned int	termSec	0	Duração do giro do servo termostato
volatile unsigned long	counter	0	Contador para leitura do RPM da ventoinha externa

5.5. Parâmetros de operação

Tipo	Nome	Valores	Descrição
const int	Tsup		Limite superior da faixa de temperatura
	Talvo		Alvo de temperatura
	Tinf		Limite inferior da faixa de temperatura
	Usup		Limite superior da faixa de umidade
	Ualvo		Alvo de umidade
	Uinf		Limite inferior da faixa de umidade
int	Tb	Talvo	Tolerância para religada da TEC ao retornar de um desligamento abaixo de <i>Tinf</i>
	dUmax	10	Variação de umidade máxima inicial
	DTc	0	Compensação do ΔT no controle térmico
float	DT	0	Diferença de temperatura externa em relação ao alvo
const unsigned char	sClose	52	Posição máxima de fechamento do servo
	sOpen	0	Posição máxima de abertura do servo

6. ESQUEMÁTICOS

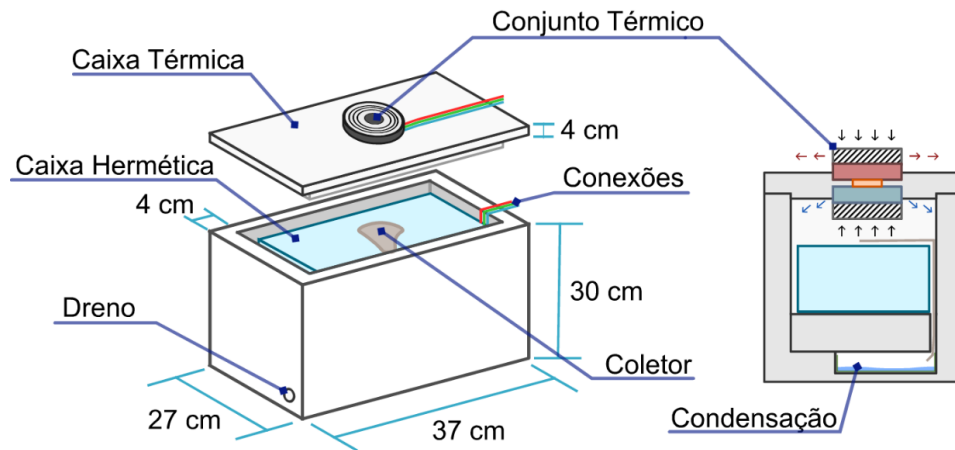
6.1. Estrutura

O isolamento higroscópico da câmara é obtido pelo uso de um pote hermético de polipropileno. A fiação é passada por um furo na lateral da caixa selado com silicone. Para as dimensões deste projeto foi utilizado um pote de 4 Litros, com travas na tampa. O isolamento térmico vem da caixa térmica de isopor (12 litros). As paredes originalmente possuíam 2 cm de espessura e foram reforçadas em mais 2 cm com a colagem de novas placas para melhorar o isolamento.

O conjunto térmico é fixado no centro da tampa. Em cada lado da placa foi fixado um conjunto fan/dissipador de computador. Pasta térmica é utilizada em todas as interfaces. É possível que a temperatura interna atinja o ponto de orvalho no dissipador frio, causando condensação de umidade dentro da câmara. Por isso, deve-se ter cuidado com o arranjo do dissipador interno para evitar que escorrimento de água atinja as partes eletrônicas da fan e cause danos. Além disso, o gotejamento sobre o pote hermético é incômodo e pode atrapalhar a operação. Para evitar o acúmulo de água, usa-se um tecido como coletor, direcionado pela lateral da caixa térmica até um compartimento na parte inferior, onde será depositada a água por capilaridade. Um pequeno furo na frente da câmara atua como dreno para comodidade, sendo interessante que seja tampado, já que o volume de água de condensação é usualmente pequeno.

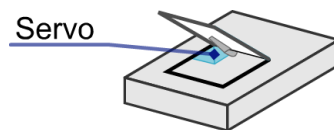
Os sensores DHT são posicionados: 1) dentro do pote da sílica gel 2) No interior do pote hermético 3) No lado externo da câmara

Figura 5 – Esquema e corte da câmara



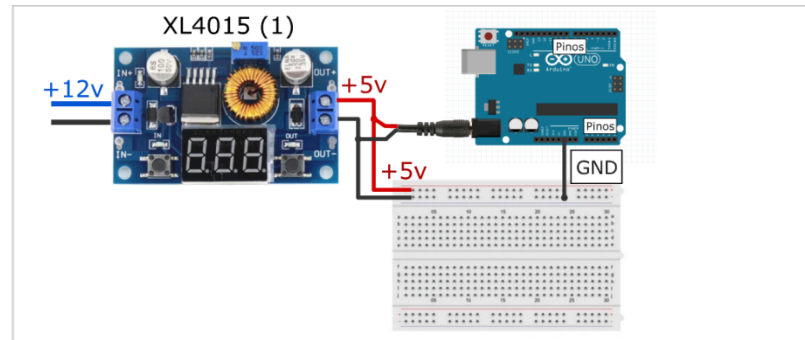
O alçapão dissecante também foi feito utilizando um pote hermético, com um corte na tampa e posicionamento do servo na parte interna, anexando seu braço à tampa para que além de empurrar para abrir, possa puxar para fechar.

DTFigura 6 – Esquema do alçapão dissecante

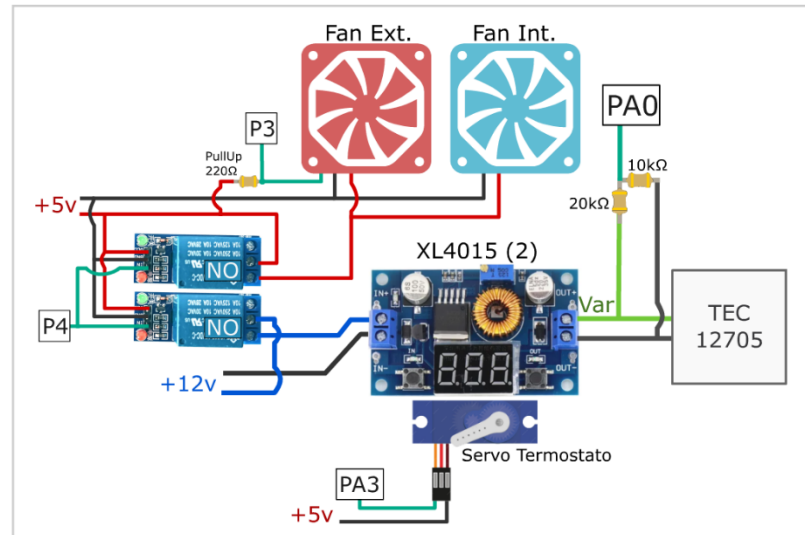


6.2. Conexões

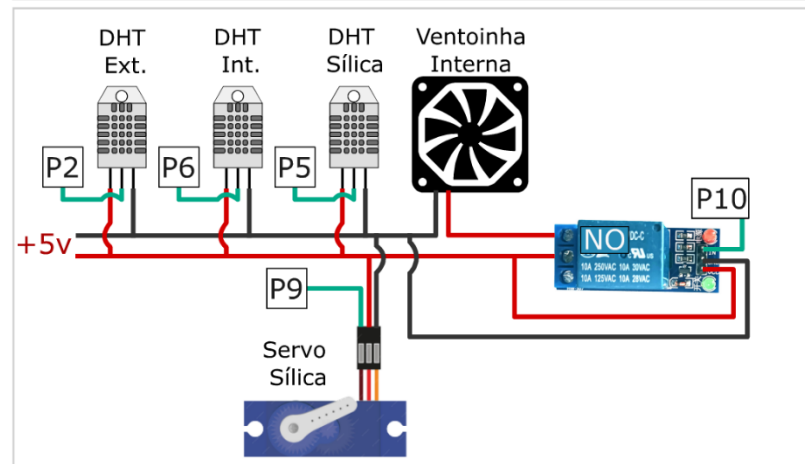
Energia



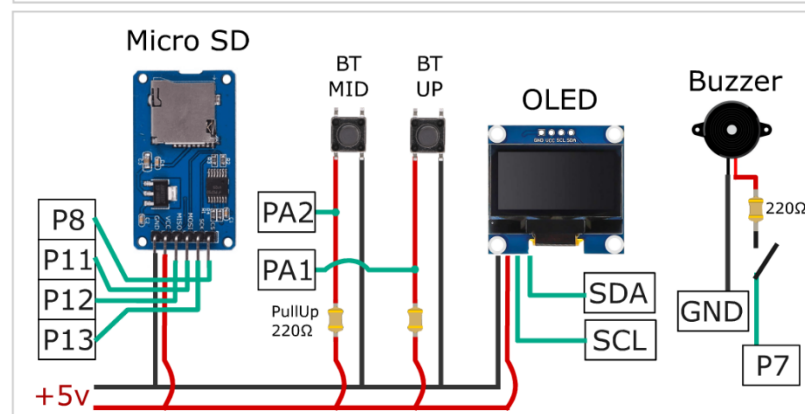
Temperatura



Umidade



Interface

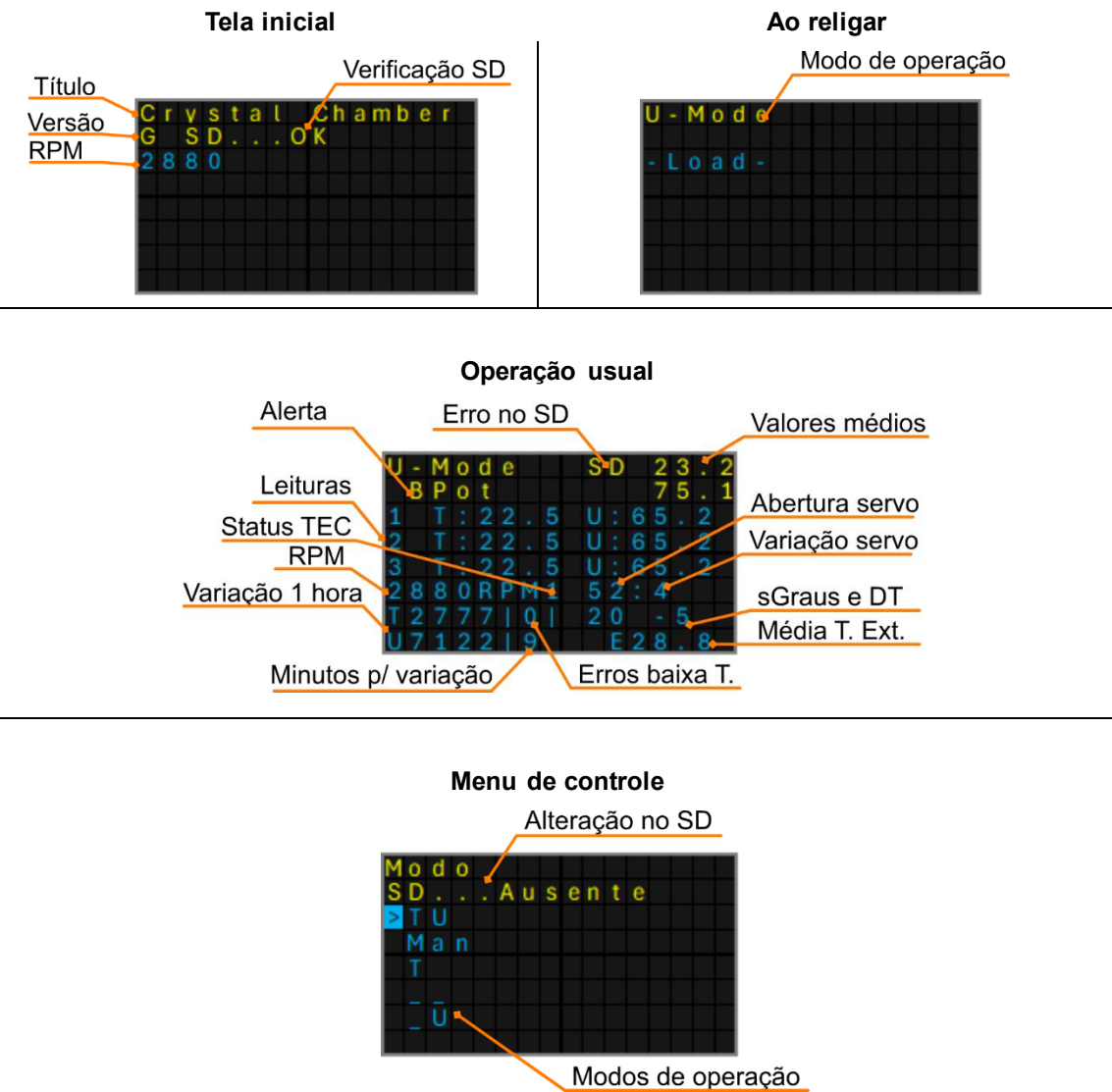


6.3. Display

Observação

❖ A partir da versão 1.2.J, o display foi atualizado para exibir informações sobre o Termostato e o HeatBooster, não representadas nesta seção. O detalhamento abaixo segue a organização básica da versão 1.1.G.

O sketch utiliza um display de 128 x 64 pixels e a biblioteca U8x8, onde cada caractere possui 8 pixels, resultando em uma grade de 16 x 8 para disposição das informações com as seguintes variações:



A variação da média é verificada periodicamente e exposta de forma codificada, permitindo o acompanhamento do histórico recente:



6.4. Imagens

6.4.1. Versão básica (1.1.G)

Figura 7 – Visão geral externa



Figura 9 – Visão superior

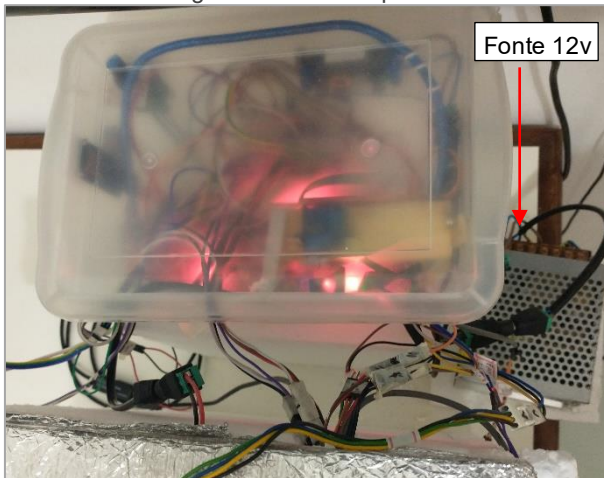


Figura 11 – Vista interna

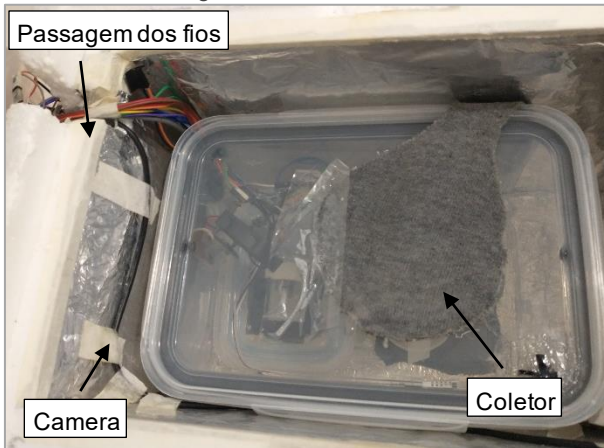


Figura 13 – Ambiente de exposição

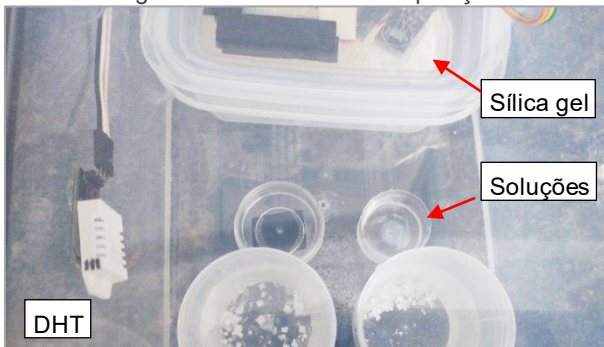


Figura 8 – Visão lateral

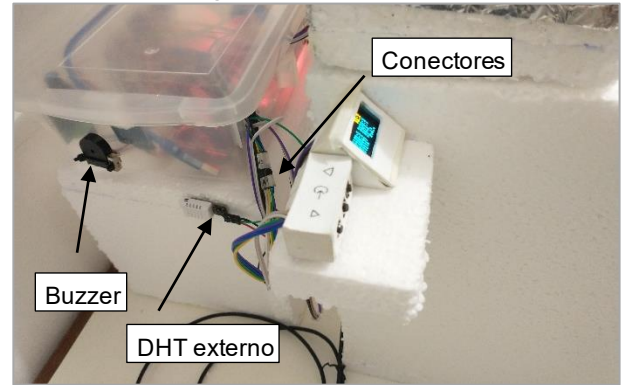


Figura 10 – Caixa dos eletrônicos (1.2.J)

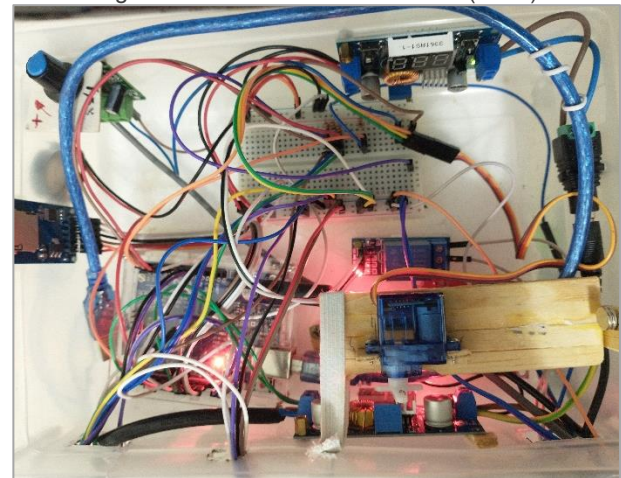


Figura 12 – Interno, sílica gel e ventilador

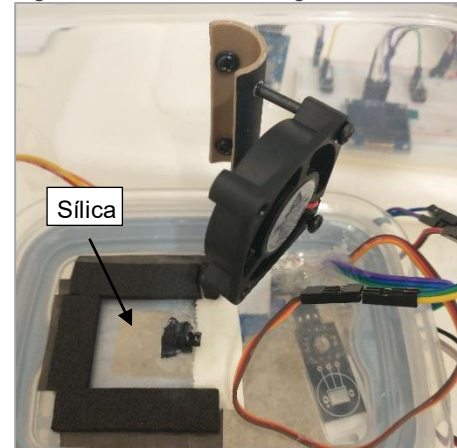
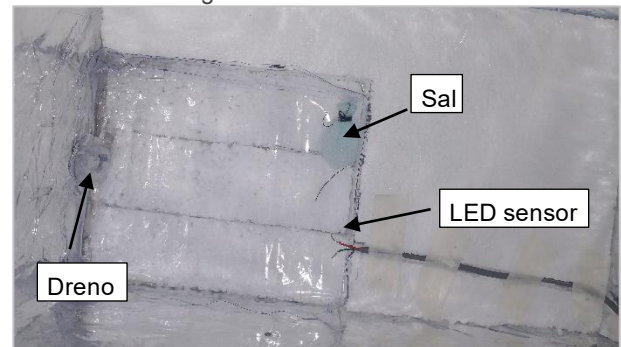
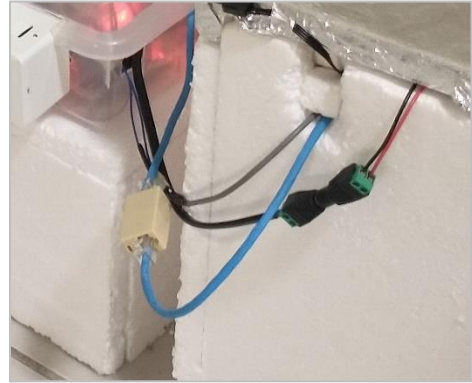
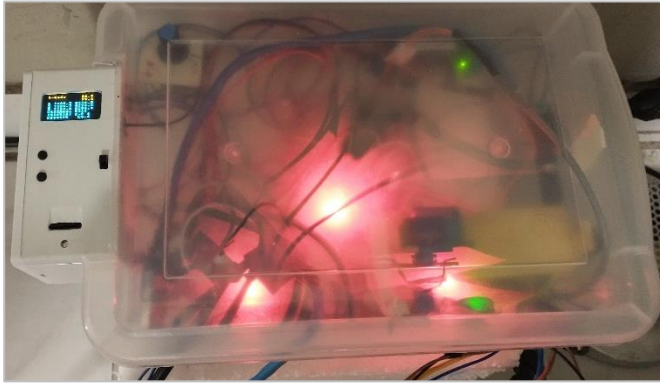


Figura 14 – Reservatório



6.4.2. Atualizações (1.2.J)

À data da versão 1.2.J foi desenvolvido e anexado uma caixa de controle, que unificou todos os elementos externos (buzzer, DHT) e de interface (SD, botões e display). As conexões entre câmara e caixa de controle passaram a ser realizadas por cabos de rede e conectores RJ45, facilitando o manuseio e mitigando os problemas de mal contato típicos dos cabos Jumper. A ventoinha superior também foi substituída por um modelo mais silencioso, com o mesmo esquema de fixação.



7. ALTERAÇÕES

Em relação à última versão (1.1.G)

- ❖ Adoção de servo do termostato com rotação contínua, dispensando a necessidade da calibração Posição-Voltagem e conferindo maior flexibilidade a variações ambientais.
- ❖ Adicionado circuito divisor de voltagem para leitura da voltagem da TEC.
- ❖ Reajustadas as fiações, conexões de pinos e algoritmos de controle (condições operacionais, ajustes e acompanhamento de temperatura e voltagem).
- ❖ Implementado algoritmo "HeatBooster".