



Guilherme Matheus de Araújo

Controle de Temperatura de Estufas Utilizando Método de Controle Supervisório

Recife

2020

Guilherme Matheus de Araújo

Controle de Temperatura de Estufas Utilizando Método de Controle Supervisório

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação.

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Departamento de Estatística e Informática

Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação

Orientador: Dr. Glauco Estácio Gonçalves

Recife

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A663c Matheus de Araújo, Guilherme
Controle de Temperatura de Estufas Utilizando Método de Controle Supervisório / Guilherme Matheus de Araújo. - 2020.
54 f. : il.
- Orientador: Glauco Estacio Goncalves.
Inclui referências, apêndice(s) e anexo(s).
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Bacharelado em Sistemas da Informação, Recife, 2020.
1. Controle da Temperatura de Estufas. 2. Modelagem de Controle Baseada em Eventos. 3. Simulação.
I. Goncalves, Glauco Estacio, orient. II. Título

GUILHERME MATHEUS DE ARAÚJO

CONTROLE DE TEMPERATURA DE ESTUFAS UTILIZANDO MÉTODO DE CONTROLE SUPERVISÓRIO

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação.

Aprovada em: 29 de Outubro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Glauco Estácio Gonçalves (Orientador)
Departamento de Estatística e Informática
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Victor Wanderley Costa De Medeiros
Departamento de Estatística e Informática
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Thiago Damasceno Cordeiro
Instituto de Computação
Universidade Federal de Alagoas

Aos meus amigos, por sempre estarem ao meu lado, e minha família, pelas oportunidades que me proporcionaram ter.

Agradecimentos

Agradeço à minha família pelo suporte durante todos esses anos. Aos meus amigos, em especial à minha melhor amiga Fernanda e meu parceiro Symon, pelo apoio e incentivo nos momentos mais complicados e desafiadores ao longo de toda a minha trajetória.

Agradeço também ao meu orientador Dr. Glauco Gonçalves, ao Dr. Victor, e colega Diego Bezerra, pelo enorme aprendizado, suporte, paciência e estímulo que me proporcionaram durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

E por último, agradeço à todos os colegas de classe e professores que cruzaram o meu caminho nestes longos anos. Todos fazem parte de minha história e contribuíram direta ou indiretamente com o meu progresso e conquistas até hoje. Muito obrigado!

“O inimigo mais perigoso que você poderá encontrar será sempre você mesmo.”
(Friedrich Nietzsche)

Resumo

Estufas são estruturas utilizadas para obtenção de condições ambientais ideais para o desenvolvimento de plantas. Elas são de fácil construção e manutenção e variam em formato, componentes estruturais e outros fatores. São feitas para serem reguladas de acordo com as necessidades de quem as implanta, para dado grupo de plantas. Um dos principais fatores que influenciam o crescimento das plantas é a temperatura no ambiente interno da estufa. Para que as condições de temperatura ideais para cada grupo de plantas fosse alcançada de forma automática, um sistema de controle de temperatura, que modela os atuadores do ambiente de uma estufa e os eventos que nela ocorrem, foi desenvolvido. A validação deste sistema de controle foi propiciada graças à criação de um simulador desenvolvido segundo os princípios de balanço de massa e energia. A comunicação entre as duas entidades ocorre através de uma interface de aplicação REST. Três propostas de modelagem e regras para o sistema de controle são apresentadas neste trabalho. O principal objetivo é determinar qual delas apresenta a melhor relação de viabilidade e eficiência no controle da temperatura dentro da estufa, considerando fatores de consumo energético, taxa de erro em graus e porcentagem de tempo em que o ambiente permanece dentro das condições ideais. Todas as propostas baseiam-se no controle dos estados de dois atuadores específicos de uma estufa: os sistemas de aquecimento e resfriamento. Os cenários simulados utilizam configurações específica para a estufa e um pequeno plantio de tomate, em períodos de 24 horas de dias escolhidos a partir de estações do ano distintas. Os modelos de controle apresentaram níveis de eficiência significativamente distintos, chegando a atingir 33% de diferença.

Palavras-chave: Controle da Temperatura de Estufas, Modelagem de Controle Baseada em Eventos, Simulação.

Abstract

Greenhouses are structures used to set ideal environmental conditions for plant development. They are easy to build and maintain and vary in shape, structural components and other factors. They are made to adjust according to the needs of those who implement them, to a given group of plants. One of the main factors that influence plant growth is the temperature inside the greenhouse. In order to reach the ideal temperature conditions for each group of plants automatically, a temperature control system, which models the actuators of a greenhouse environment and the events that occur in it, was developed. The validation of this control system was made possible thanks to the creation of a simulator developed according to the principles of mass and energy balance. The communication between the two entities takes place through a REST application interface. Three modeling proposals and rules for the control system are presented in this work. The main objective is to determine which one has the best feasibility and efficiency ratio in controlling the temperature inside the greenhouse, considering energy consumption, error rate in °C and the percentage of time that the environment remains within ideal conditions. All proposals are based on the control of the states of two specific actuators in a greenhouse: the heating and cooling systems. The simulated scenarios use specific configurations for the greenhouse and a small tomato crop, in 24 hours periods for days chosen from different seasons. The control models showed different levels of efficiency, with up to 33% disparity.

Keywords: Greenhouse Temperature Control, Event-Based Control Modeling, Simulation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de um autômato finito determinístico de dois estados	17
Figura 2 – Representação de um sistema de malha fechada	19
Figura 3 – Efeito das correntes de convecção em uma estufa.	20
Figura 4 – Formatos de estufa A-frame, Arch-roof, e Quonset.	21
Figura 5 – Autômato que representa o modelo de uma lâmpada simples	23
Figura 6 – Autômato que representa o modelo de controle baseado no horário do dia	24
Figura 7 – Autômato que representa o modelo de controle baseado na temperatura, verificando se encontram-se dentro dos intervalos ideais . .	26
Figura 8 – Arquitetura do projeto associando os sistemas de simulação e controle	32
Figura 9 – Progressão de Temperatura para 20 de Julho de 2018, controle desabilitado.	36
Figura 10 – Progressão de Temperatura para 20 de Julho de 2018, controle baseado no tempo (time) habilitado.	37
Figura 11 – Progressão de Temperatura para 20 de Julho de 2018, controle baseado na temperatura interna e externa da estufa (temperature_in_out) habilitado.	37
Figura 12 – Progressão de Temperatura para 20 de Julho de 2018, controle baseado na temperatura interna da estufa e turno do dia (temperature_shift) habilitado.	38
Figura 13 – Gráfico comparativo de eficiência dos modelos de controle.	39
Figura 14 – Gráfico comparativo de gasto energético (em kWh) dos modelos de controle.	40
Figura 15 – Gráfico comparativo de erro absoluto médio (em °C) dos modelos de controle.	41
Figura 16 – Gráfico comparativo da média de eficiência dos modelos de controle para os dias avaliados.	41
Figura 17 – Gráfico comparativo da média de gasto energético (em kWh) dos modelos de controle para os dias avaliados.	42
Figura 18 – Gráfico comparativo da média de erro absoluto (em °C) dos modelos de controle para os dias avaliados.	42
Figura 19 – Regras de controle dos atuadores do sistema para o modelo baseado no horário do dia (time).	44
Figura 20 – Regras de controle do sistema de aquecimento para o modelo baseado nas temperaturas interna e externa da estufa (temperature_in_out).	45

Figura 21 – Regras de controle do sistema de resfriamento para o modelo baseado nas temperaturas interna e externa da estufa (temperature_in_out).	46
Figura 22 – Regras de controle do sistema de aquecimento para o modelo baseado na temperatura interna e turno do dia (temperature_shift).	47
Figura 23 – Regras de controle do sistema de resfriamento para o modelo baseado na temperatura interna e turno do dia (temperature_shift).	48
Figura 24 – Progressão de Temperatura para 26 de Agosto de 2018, controle desabilitado.	49
Figura 25 – Progressão de Temperatura para 26 de Agosto de 2018, controle baseado no tempo (time) habilitado.	49
Figura 26 – Progressão de Temperatura para 26 de Agosto de 2018, controle baseado na temperatura interna e externa da estufa (temperature_in_out) habilitado.	50
Figura 27 – Progressão de Temperatura para 26 de Agosto de 2018, controle baseado na temperatura interna da estufa e turno do dia (temperature_in_out) habilitado.	50
Figura 28 – Progressão de Temperatura para 03 de Outubro de 2018, controle desabilitado.	51
Figura 29 – Progressão de Temperatura para 03 de Outubro de 2018, controle baseado no tempo (time) habilitado.	51
Figura 30 – Progressão de Temperatura para 03 de Outubro de 2018, controle baseado na temperatura interna e externa da estufa (temperature_in_out) habilitado.	52
Figura 31 – Progressão de Temperatura para 03 de Outubro de 2018, controle baseado na temperatura interna da estufa e turno do dia (temperature_shift) habilitado.	52
Figura 32 – Progressão de Temperatura para 17 de Dezembro de 2018, controle desabilitado.	53
Figura 33 – Progressão de Temperatura para 17 de Dezembro de 2018, controle baseado no tempo (time) habilitado.	53
Figura 34 – Progressão de Temperatura para 17 de Dezembro de 2018, controle baseado na temperatura interna e externa da estufa (temperature_in_out) habilitado.	54
Figura 35 – Progressão de Temperatura para 17 de Dezembro de 2018, controle baseado na temperatura interna da estufa e turno do dia (temperature_shift) habilitado.	54

Lista de abreviaturas e siglas

SED	Sistema de Eventos Discretos
AFD	Autômato Finito Determinístico
TCS	Teoria de Controle Supervisório
SCD	Sístese de Controladores Discretos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

Sumário

	Lista de ilustrações	9
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo	14
1.2	Organização do Trabalho	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Sistemas de Eventos Discretos	16
2.2	Teoria de Controle Supervisório	18
2.3	Funcionamento de uma Estufa	20
3	MODELAGEM DO SISTEMA E SÍNTESE DO CONTROLE	22
4	SIMULAÇÃO	28
4.1	Modelo Matemático	28
4.2	Dados da Simulação	30
4.3	Implementação	31
5	ANÁLISE DE RESULTADOS	35
5.1	Comportamento ao Longo do Tempo	35
5.2	Estudo Geral	38
6	CONCLUSÃO	43
A	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS REGRAS DE CONTRATO	44
B	GRÁFICOS DE PROGRESSÃO DE TEMPERATURA	49
	REFERÊNCIAS	55

1 Introdução

Estufas agrícolas são estruturas criadas com o objetivo de produzir plantas fora de seu período de crescimento natural, onde normalmente não se desenvolveriam de maneira otimizada, ou em regiões com condições climáticas distintas das quais a planta costuma se desenvolver. O aumento da procura por estes ambientes de agricultura controlada se dá pelo fato de haver uma maior demanda por produtos mais saudáveis e de alta qualidade durante o ano todo. Isso se tornou viável atualmente graças à facilidade e viabilidade econômica de se implementar uma estufa nos mais diversos cenários climáticos.

Com o intuito de alcançar essas condições ideais pra uma pluralidade de plantas, as estufas podem ser configuradas de forma bastante diversa, variando em formato, material de cobertura, dimensões, localização, equipamentos que vão atuar na regulação de seu ambiente interno, entre outros fatores. Dentre os fatores controláveis deste ambiente, a temperatura é um dos que mais influenciam no desenvolvimento do plantio. Vários parâmetros podem interferir na temperatura final do ambiente. O nível de incidência solar absorvida para o interior da estufa (relativo ao material de sua cobertura), o quão ventilado o ambiente está, o nível de umidade do ambiente e a própria transpiração das plantas são alguns deles.

Neste contexto, a tecnologia pode atuar para auxiliar a manter sob controle os parâmetros mais importantes garantindo a melhor produtividade do plantio. Como exemplo, temos o uso de sensores de temperatura e umidade, através dos quais é possível obter dados para alimentar um sistema de controle que regule esses parâmetros. Além de auxiliar na manutenção de temperatura do ambiente, sistemas de controle automáticos também podem contribuir no uso racional da energia e outros recursos. Note-se que a regulação em si depende do emprego de equipamentos como, por exemplo, aquecedores, sistemas de ventilação ou de condicionamento de ar, sombreamento, irrigação, entre outros.

Considerando a grande variedade de requisitos ambientais que cada tipo de plantio tem e os diversos cenários climáticos existentes, alguns modelos de controle de temperatura com abordagens distintas são propostos neste trabalho, a fim de satisfazer estes requisitos da forma mais abrangente possível. O sistema de controle baseia-se na Teoria de Controle Supervisório e Sistemas de Eventos Discretos, funcionando a partir da observação da estufa através de sensores e análise dos dados gerados por eles a fim de se identificar os eventos interessantes ao sistema de controle e regular os elementos atuadores do ambiente.

Por meio desta teoria se pode descrever modelos que especificam controladores e, a partir destas especificações, pode-se fazer o uso de ferramentas que sintetizam tais controladores automaticamente. A maior vantagem de seu uso é que, durante o processo de síntese, pode-se garantir que não haja conflitos de regras ou inconsistências nas especificações. Como exemplo, podemos citar um sistema de controle responsável pelo ligamento e desligamento de uma lâmpada durante determinados períodos do dia. Suponha que duas regras tenham sido especificadas ao controle: *a lâmpada deve permanecer desligada a partir das 7 horas da manhã; a lâmpada deve estar ligada a partir das 6 horas da noite*. Note que, como está descrita, o sintetizador pode interpretar as regras tal que a lâmpada deva estar tanto ligada quanto desligada de 6 horas da noite, visto que o intervalo de tempo da segunda regra está contido na primeira e, portanto, a síntese seria impedida de ser realizada por apresentar ambiguidade. Em alguns casos, o sintetizador pode computar uma regra definida como uma abstração e pode convertê-la em algo que faça mais sentido em termos assertivos. Esta abstração é conservadora em relação às propriedades de invariância, e não prejudica o uso do controlador computado, mas este controlador pode ser menos eficiente. Uma possível solução para o exemplo acima seria detalhar a primeira regra para que ela não se choque com a segunda, tal como: *a lâmpada deve permanecer desligada das 7 horas da manhã às 6 da noite*.

1.1 Objetivo

Este trabalho avalia três propostas distintas de modelagem para o controle da temperatura do ambiente interno de estufas através do desenvolvimento de sistemas controladores baseados em eventos, utilizando o método de Controle Supervisório. A análise da viabilidade dos modelos se deu através de simulação numérica de uma estufa a partir de dados climáticos reais. Cada modelo foi analisado em termos de eficiência, consumo energético e taxa de erro.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 aborda conceitos importantes sobre Sistemas de Eventos Discretos, Teoria de Autômatos, Teoria de Controle Supervisório e o funcionamento de uma estufa; o Capítulo 3 descreve as propostas de modelagem de controle do sistema de uma estufa e explica como é feita a sua síntese; no Capítulo 4 temos o detalhamento do sistema de simulação de estufas utilizado para validar o sistema de controle e como funciona a interação entre estes componentes; já no Capítulo 5 se encontra a análise dos resultados das simulações

para cada modelo de controle; e por último, no Capítulo 6 se encontram as conclusões finais.

2 Referencial Teórico

2.1 Sistemas de Eventos Discretos

Um sistema é a descrição de qualquer processo que se queira simular. De acordo com Cassandras e Lafortune ([CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2010](#)), um sistema é composto por componentes interativos e é associado à uma função que é, presumivelmente, destinado a desempenhar. Também vale a pena destacar que um sistema nem sempre deve ser associado a objetos físicos ou leis naturais. Há várias estruturas convenientes fornecidas a partir da teoria de sistemas para descrever mecanismos econômicos ou modelar o comportamento humano e dinâmicas populacionais, por exemplo. Portanto, podemos considerar um sistema como sendo um agrupamento de entes que interagem a fim de se produzir algum resultado.

Sistemas cujos resultados, em função do tempo, não dependem de valores de entrada precedentes são chamados de estáticos. Já sistemas cujos resultados são dependentes de valores de entrada precedentes, em função do tempo, são chamados de dinâmicos. No contexto de sistemas dinâmicos, dá-se o nome de estado à parametrização dos pares de entrada e saída (o conjunto de valores das variáveis do sistema necessários para caracterizar sua situação atual).

Neste contexto, a natureza de um sistema pode ser definida de acordo com a de suas variáveis, podendo esta ser contínua ou discreta. Variáveis contínuas podem tomar quaisquer valores num determinado intervalo, sejam estes inteiros ou fracionários. Podemos citar grandezas como comprimento, área, volume, peso, tempo, proporções, entre outros. Já variáveis discretas não admitem valores fracionários, ou seja, só podem variar por unidades inteiras. Grandezas como a contagem de pessoas, o número de culturas bacterianas positivas, o número de respostas sim, ou de respostas não, o número de gols por rodada de um campeonato de futebol, entre outros; são alguns exemplos.

Podemos, também, classificar a natureza de um sistema como sendo determinística ou estocástica. Em um sistema de natureza determinística, o estado final é determinado apenas em função de seus dados de entrada. Já em um sistema de natureza estocástica, o resultado pode ser influenciado por fatores aleatórios. Sistemas no mundo real podem conter tanto variáveis determinísticas como estocásticas.

A mudança de comportamento de um sistema, no contexto de sistemas dinâmicos, é determinada através de funções de transição atuando sobre os estados do sistema, e ocorrem a partir de estímulos chamados eventos. Um evento diz-se da ocor-

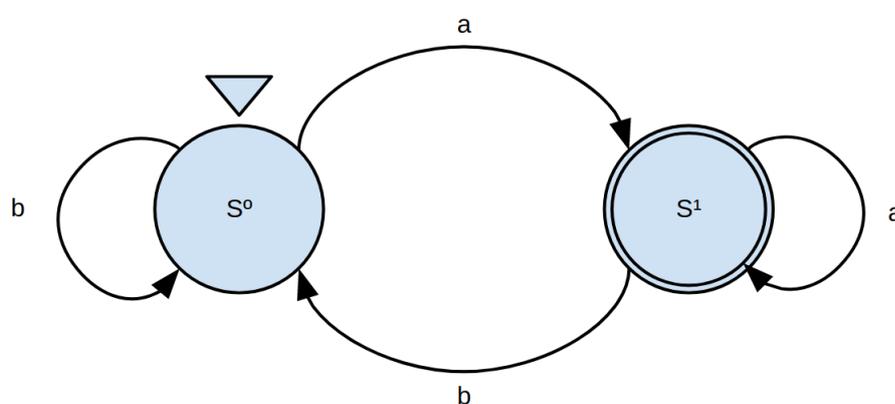
rência de uma atividade que pode, ou não, alterar o estado do sistema. Estes eventos são representados pelos valores de entrada do sistema. De acordo com Montgomery (MONTGOMERY, 2002), um Sistema de Eventos Discretos (SED) é definido como um sistema cuja evolução dinâmica depende da ocorrência de eventos.

Um sistema pode ser descrito através da construção de um modelo, que dá-se pelo conjunto de informações necessárias para representar os aspectos relevantes do sistema de forma simplificada. Estas informações compreendem as entidades que representam os componentes deste sistema, suas características (que especificam o estado atual do sistema em conjunto com as relações entre as entidades) e eventos deste sistema.

Um autômato é um modelo formal que denota um dispositivo com entradas e saídas discretas que é utilizado para representar uma sequência de eventos através de regras bem definidas, onde são determinados os estados do sistema e, em seguida, as relações associadas ao seu conjunto de eventos.

Como não é foco deste trabalho aprofundar-se detalhadamente na Teoria dos Autômatos, vamos introduzir apenas o que for necessário para a modelagem de um SED (Sistema de Eventos Discretos), que são os Autômatos Finitos Determinísticos (AFD). Sipser (SIPSER, 2006) define autômatos finitos como bons modelos para computadores com quantidade limitada de memória. A partir de sua definição de AFDs, podemos caracterizá-los como modelos compostos de um conjunto de estados finitos, apenas um estado inicial e um conjunto definido de estados finais; as transições acontecem por meio de eventos pertencentes a um conjunto bem definido, e a função de transição entre estados é determinística, ou seja, o trânsito do sistema em função dos eventos deve resultar em um único estado. Podemos fazer a representação deste autômato utilizando grafos direcionados, como demonstra a Figura 1.

Figura 1 – Exemplo de um autômato finito determinístico de dois estados



Fonte: Composição do autor

Na imagem, temos a representação de um autômato finito determinístico, onde

cada nó do grafo representa um estado (S^0 e S^1); as setas e seus rótulos representam, respectivamente, as transições entre estados e os eventos necessários para que elas aconteçam (a e b). O estado inicial (S^0) é caracterizado por um seta que aponta para ele. Já o estado final é denotado por um círculo menor na parte interior (S^1).

O estado inicial diz-se do primeiro estado que o sistema assume assim que é iniciado. E o conjunto de estados finais determinam onde o autômato deve parar para que a sequência de eventos de entrada seja considerada válida. Conjunto este que é, obrigatoriamente, um subconjunto dos estados do autômato. Formalmente, um AFD pode ser descrito na forma de uma quintupla, tal como:

$$A = (X, E, f, x_0, x_m)$$

onde,

X é o conjunto finito de estados do autômato,

E é o conjunto de eventos válidos,

f é a função de transição entre estados, tal que $E \times X \rightarrow X$,

x_0 é o estado inicial, tal que $x_0 \in X$,

x_m é o conjunto de estados finais, tal que $x_m \in X$

2.2 Teoria de Controle Supervisório

Se observarmos isoladamente os elementos que compõem um sistema e os considerarmos como sendo sistemas subordinados a ele (ou subsistemas), podemos perceber que cada componente tem um comportamento básico independente a ser seguido, como descreve Cury (CURY, 2001). Portanto, para que a função a ser executada pelo sistema principal seja cumprida com sucesso, tais subsistemas devem ser restringidos (ou controlados) de forma coordenada.

Para tanto, o método da Teoria de Controle Supervisório, originalmente proposto por Ramadge e Wonham (RAMADGE; WONHAM, 1987), propõe que haja a síntese automática de um elemento responsável pela coordenação conjunta desses subsistemas (ao qual dá-se o nome de supervisor), a fim de fazer com que o sistema obedeça regras de comportamento pré-estabelecidas. Ou seja, o supervisor observa uma parte dos eventos do sistema, habilitando-os ou desabilitando-os a fim de manter o comportamento desejado, controlando portanto o comportamento dos subsistemas em si. O controle destes subsistemas pode ocorrer de forma centralizada, onde há apenas um supervisor para toda sequência de eventos gerada pelo sistema; ou modularizada, onde há mais de um supervisor responsável por um subconjunto de eventos e subsistemas, atuando paralelamente.

Considerando que o sistema que desejamos modelar não é complexo, a abordagem de controle centralizado pode ser utilizada para síntese de apenas um supervisor. Vamos identificar cada subsistema com a notação G . Como dito anteriormente, usaremos AFDs para representar o sistema. Portanto a notação G será usada para referenciar a planta ou seu modelo AFD.

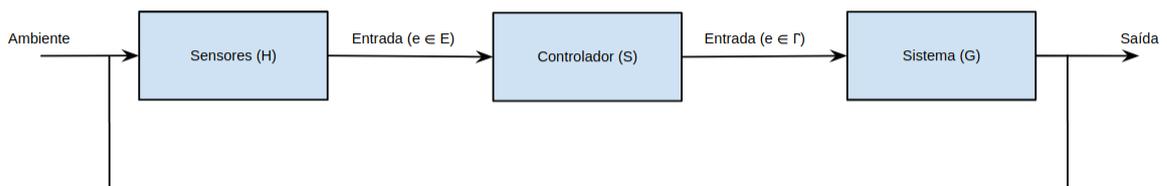
Notaremos o conjunto de eventos que afetam o sistema por E , provenientes da leitura do ambiente através de sensores, denotados por H . Note que E é composto por dois subconjuntos, o de eventos controláveis (E_c) e o de eventos não controláveis (E_{nc}). O supervisor, que será representado por S , atua sobre E_c , ou seja, o conjunto de eventos controláveis.

O conjunto de todas as cadeias de eventos que podem ser seguidas no sistema a partir do estado inicial será denotado por $L(G)$. Por sua vez, o conjunto de cadeias em L que correspondem a tarefas completas (que chegam a um estado final) que o sistema pode realizar será denotado por $L_m(G)$.

Podemos observar que ambos os conjuntos $L(G)$ e $L_m(G)$ podem conter sequências indesejáveis de eventos por violarem as regras impostas ao sistema global. Tais regras podem ser estados inválidos em G , ou regras que se choquem, como, por exemplo, dois equipamentos estarem ligados quando as especificações permitem apenas um.

Como dito anteriormente, o agente de controle (S), a fim de fazer com que os subsistemas atuem segundo as regras definidas, interage com o autômato G observando os eventos (pertencentes a E) que ocorrem sobre ele e define um subconjunto destes eventos $\gamma \subseteq E$ (tal que $E_{nc} \subseteq \gamma$) que serão permitidos de ocorrer, habilitando-os ou desabilitando-os. Ou seja, γ representa o conjunto de eventos não-controláveis e controláveis possíveis do sistema. Este conjunto de eventos habilitados torna-se uma entrada de controle, caracterizando assim um sistema de malha fechada. Este comportamento se repete para cada nova ocorrência de evento (e) sobre G , como mostra a figura 2.

Figura 2 – Representação de um sistema de malha fechada



Fonte: Composição do autor

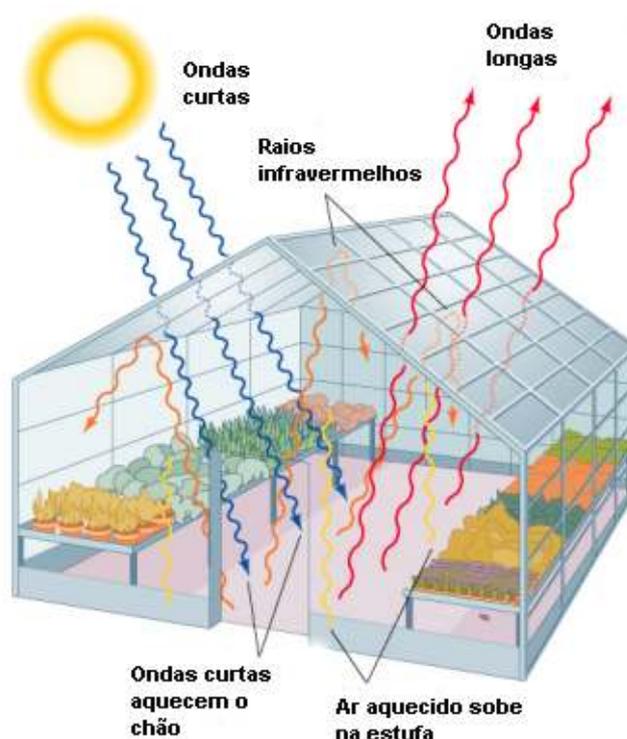
Note que a sequência de eventos gerada pelo autômato G é observada por S , que, por sua vez, atua apenas sobre os eventos controláveis (E_c).

2.3 Funcionamento de uma Estufa

Uma estufa agrícola é uma estrutura construída com o objetivo de manter sua temperatura interna controlada através da absorção e condicionamento do calor proveniente do sol, para que as plantas que lá se encontram fiquem protegidas contra ameaças externas.

Estufas são construídas com materiais transparentes ou semi-transparentes, possibilitando a entrada total ou parcial da radiação solar, que por sua vez aquece o solo da estufa. Cada corpo esquentado emite radiação que esquenta o ar nas camadas inferiores da estufa, formando massas de ar quente que, por serem mais leves, se elevam e, por consequência, descem as massas de ar mais frio. Este efeito é chamado de correntes de convecção. Tanto o ar quente nas camadas superiores e a radiação são impedidos de deixar o ambiente pelas paredes da estufa. A Figura 3 ilustra o efeito das correntes de convecção em uma estufa.

Figura 3 – Efeito das correntes de convecção em uma estufa.

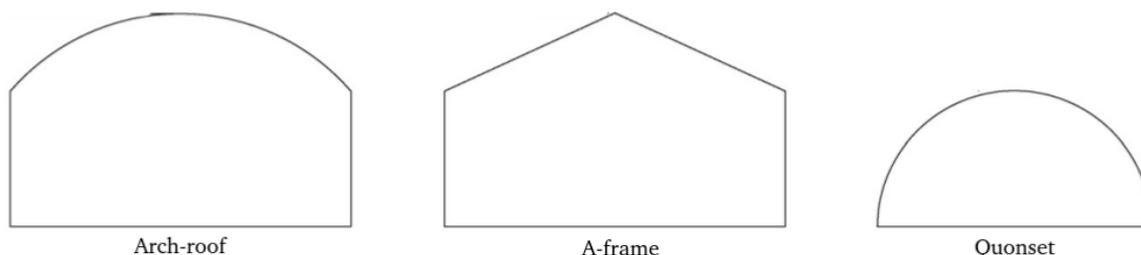


Fonte: (STENSMANN, 2002)

A composição estrutural de uma estufa e sua geometria interferem diretamente na transmissão de radiação solar. Os formatos de estufas mais comuns em sistemas de menor porte são *A-frame*, *Arch-root*, e *Quonset style*, ilustrados na Figura 4. Quanto aos materiais de cobertura de estufas, os mais comumente usados são vidro, filme de polietileno e policarbonato, em camadas únicas ou duplas. Também podem ser usadas telas para sombreamento, que proporcionam a redução de incidência de radiação

solar somada à redução própria do material de cobertura escolhido. Zabeltitz ([ZABELTITZ, 2011a](#); [ZABELTITZ, 2011b](#)) traz mais detalhes sobre estufas, seus usos e suas estruturas.

Figura 4 – Formatos de estufa A-frame, Arch-roof, e Quonset.



Fonte: Composição do autor

Diferentes tipos de sistemas de aquecimento e resfriamento podem ser utilizados para auxiliar o controle da temperatura interna de estufas. Alguns exemplos são: sistema de vapor, água quente, ar quente e radiação infravermelha, resfriamento evaporativo e sistema de nebulização. Também é importante notar que o fluxo de troca de ar dentro da estufa, limitado pelo material de cobertura, pode aumentar consideravelmente sua temperatura interna. A temperatura então pode ser reduzida através do uso de um sistema de ventilação, seja ele natural ou artificial. O formato da estufa também pode influenciar a taxa de ventilação.

3 Modelagem do Sistema e Síntese do Controle

Para que possamos sintetizar um supervisor para o sistema, precisamos seguir três passos, propostos por Ramadge e Wongam (RAMADGE; WONHAM, 1987). São eles: criar um modelo para a planta a ser controlada, criar um modelo que represente as especificações impostas ao sistema e sintetizar uma lógica de controle.

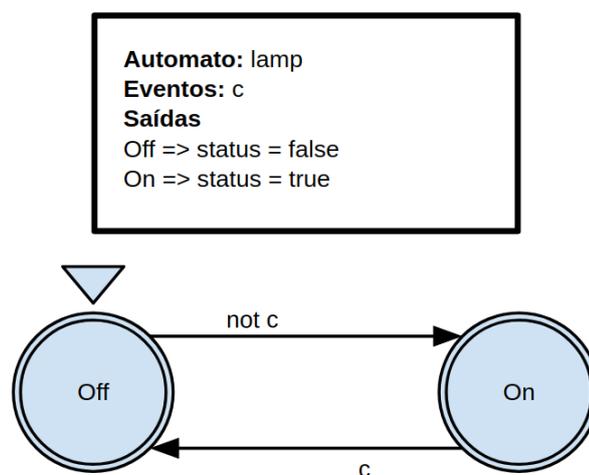
Para gerar um controlador, utilizamos o método de Síntese de Controladores Discretos (SCD), que se baseia na Teoria de Controle Supervisório (TCS) e gera um controlador a partir de um conjunto de regras definidas por um modelo. A este conjunto, damos o nome de contrato. O algoritmo de SCD define as variáveis controláveis a partir da análise dos estados da planta e cria um controlador que obedeça as regras do contrato para qualquer valor de entrada.

A criação dos modelos de controle, neste trabalho, é feita utilizando a linguagem/ferramenta Heptagon/BZR, baseada em autômatos de estados finitos. Esta ferramenta tem o método de SCD integrado ao seu processo de compilação graças a um software chamado Sigali, que propicia a criação da lógica de contrato. Ao final do processo de compilação e conversões apropriados, o código interativo executável do controlador é gerado, podendo este ser na linguagem C ou Java, à escolha de quem modela.

Utilizando a linguagem Heptagon/BZR, nós construímos um modelo através da criação de blocos de código, chamados de *nodes*, que possuem elementos de entrada e saída (eventos e variáveis de estado). Estes blocos de código abrigam elementos chamados *equations*, que definem valores de saída do *node*; *automaton*, que descreve um subsistema (ou atuador) através de um AFD; ou *contract*, onde se descrevem as regras que devem ser obedecidas pelo controlador. Estas regras não podem ser ambíguas, caso contrário o código não será compilado.

A Figura 5 mostra o modelo de uma lâmpada simples que possui dois estados (ON e OFF), um evento de entrada *c* e um evento de saída *status*. Sendo o estado inicial o estado OFF. A Listagem 3.1 exemplifica a transcrição do modelo na linguagem Heptagon/BZR.

Figura 5 – Autômato que representa o modelo de uma lâmpada simples



Fonte: Composição do autor

```

1 node lamp(c:bool) returns (status:bool)
2 let
3   automaton
4     state Off do
5       status = false;
6       unless not c then On
7
8     state On do
9       status = true;
10      unless c then Off
11   end
12 tel
  
```

Listagem 3.1 – Descrição de um autômato usando a linguagem Heptagon/BZR.

Vários trabalhos fizeram o uso da linguagem Heptagon/BZR e do Sigali para síntese de controladores e alguns deles aplicaram sistemas de eventos discretos ao contexto de ambientes inteligentes, modelando cada dispositivo atuador presente no ambiente e estabelecendo as regras de contrato para definir as políticas operacionais no respectivo ambiente (ZHAO et al., 2013; GUILLET; BOUCHARD; BOUZOUANE, 2013; SYLLA; LOUVEL; RUTTEN, 2017; SYLLA et al., 2018; BEZERRA, 2020).

Para realizar o controle da temperatura interna de uma estufa é necessário definir os atuadores do sistema, como eles serão modelados e as regras às quais eles serão subordinados. Como discutido anteriormente, há vários fatores que vão influenciar a temperatura interna de uma estufa (temperatura externa do ambiente, porte do plantio, nível de ventilação da estufa, entre outros). Considerando os atuadores controláveis deste sistema, as estratégias de controle propostas neste trabalho são baseadas, de modo geral, no controle de dois atuadores específicos: os sistemas de

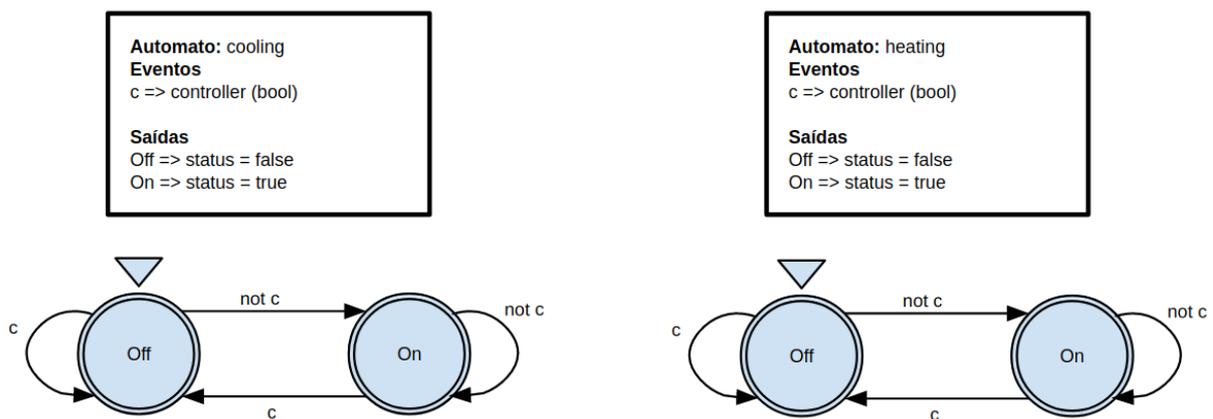
aquecimento (aquecedor de potência 75kW) e resfriamento (sistema de resfriamento evaporativo de 128kW de potência). A partir desta premissa, três estratégias de controle são propostas, e cada uma possui uma modelagem específica dos atuadores e regras de controle.

A primeira estratégia de controle (identificada pelo nome **time**) se baseia apenas no horário do dia. Neste contexto, temos dois subsistemas, que representam os atuadores do sistema, a serem modelados: o sistema de aquecimento (*heating*) e o sistema de resfriamento (*cooling*). Ambos possuem apenas dois estados, ligado (*On*) e desligado (*Off*). O estado que cada um destes subsistemas vai assumir deve ser determinado autonomamente pelo controlador. Para esta estratégia, foram estabelecidas as seguintes regras:

- Entre as 2 e 5 horas da manhã, o sistema de aquecimento deve ser ligado;
- Entre as 12 e 15 horas da tarde, o sistema de resfriamento deve ser ligado;
- Os sistemas de resfriamento e aquecimento não podem ser ligados simultaneamente.

A definição dos intervalos de tempo se deu através da análise dos períodos mais quentes e mais frios dos dados utilizados para simulação (veja o Capítulo 5). Os autômatos ilustrados na Figura 6 descrevem os subsistemas atuantes.

Figura 6 – Autômato que representa o modelo de controle baseado no horário do dia



Fonte: Composição do autor.

A segunda estratégia de controle (identificada pelo nome **temperature_in_out**) se baseia na comparação das temperaturas do interior e exterior da estufa, verificando se seus valores se encontram dentro dos intervalos de temperatura relativos ao turno do dia e ao tipo da planta.

Quatro subsistemas são modelados nesta estratégia: sistemas de aquecimento e resfriamento, já descritos na estratégia anterior; um autômato que determina o turno do dia (*shift*) que possui os estados *Start*, que é apenas um estado de inicialização deste autômato, e os estados finais *Day* e *Night*, em função do horário (24 horas), tal que das 6 às 18 o autômato deve estar no estado de *Day* (que representa o turno do dia) e nas demais 12 horas ele deve estar o estado de *Night* (que representa o turno da noite); e por último, um autômato que representa a categoria de temperatura da planta - que se refere ao grupo ao qual a planta pertence em função da faixa de temperatura ideal para seu desenvolvimento (DALRYMPLE, 1973) - (*category*), que possui quatro estados: *Start*, que é apenas um estado inicial não final, *Warm*, para plantas do grupo 1, *Moderate*, para plantas do grupo 2, e *Cool*, para plantas do grupo 3. As informações sobre a categoria das plantas e seus intervalos de temperatura se encontram na Seção 4.2 do Capítulo 4.

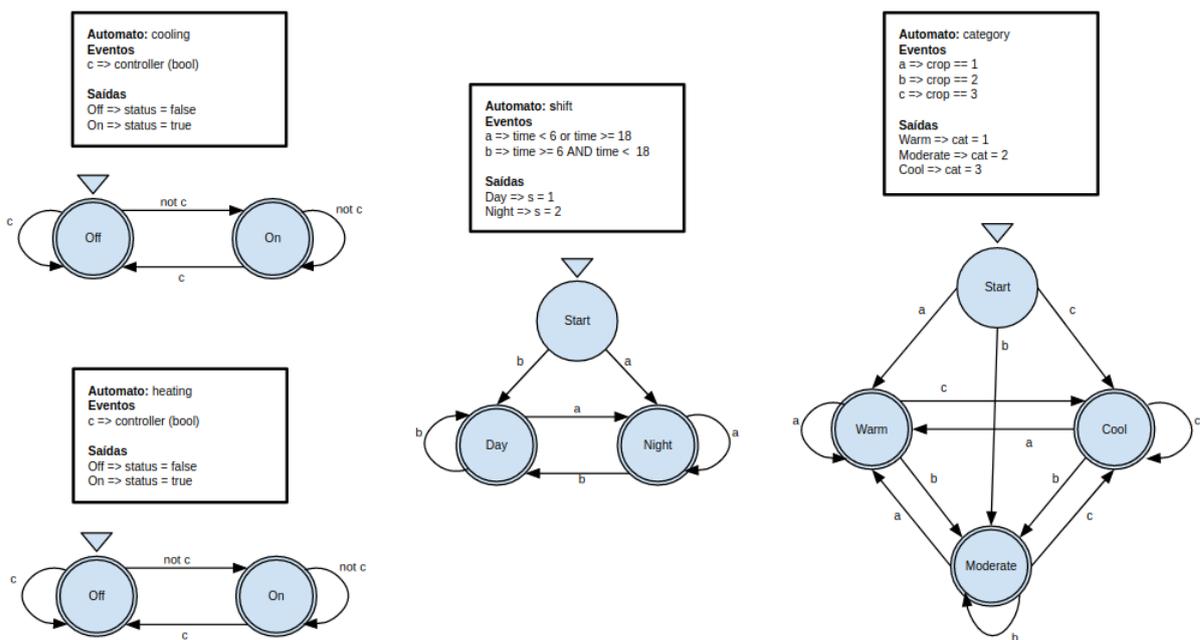
As regras de contrato para esta estratégia são as seguintes:

- O sistema de aquecimento deve ser ligado durante o turno do dia caso:
 - A plantação pertença ao grupo de plantas de clima quente, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam abaixo de 38°C;
 - A plantação pertença ao grupo de plantas de clima moderado ou frio, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam abaixo de 27°C.
- O sistema de aquecimento deve ser ligado durante o turno da noite caso:
 - A plantação pertença ao grupo de plantas de clima quente, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam abaixo de 27°C;
 - A plantação pertença ao grupo de plantas de clima moderado, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam abaixo de 18°C;
 - A plantação pertença ao grupo de plantas de clima frio, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam abaixo de 16°C.
- O sistema de resfriamento deve ser ligado durante o turno do dia caso:
 - A plantação pertença ao grupo de plantas de clima quente, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam acima de 27°C;
 - A plantação pertença ao grupo de plantas de clima moderado, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam acima de 24°C;
 - A plantação pertença ao grupo de plantas de clima frio, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam acima de 21°C.
- O sistema de resfriamento deve ser ligado durante o turno da noite caso:

- A planta pertença ao grupo de plantas de clima quente, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam acima de 24°C;
 - A planta pertença ao grupo de plantas de clima moderado, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam acima de 16°C;
 - A planta pertença ao grupo de plantas de clima frio, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam acima de 10°C.
- Os sistemas de resfriamento e aquecimento não podem ser ligados simultaneamente.

A Figura 7 ilustra os autômatos que compõem esta planta.

Figura 7 – Autômato que representa o modelo de controle baseado na temperatura, verificando se encontram-se dentro dos intervalos ideais



Fonte: Composição do autor.

A terceira e última proposta (identificada pelo nome **temperature_shift**) é bastante similar a anterior. Baseia-se na comparação da temperatura interna da estufa, verificando se as entradas se encontram dentro dos intervalos de temperatura ideais, relativos ao turno do dia, para diferentes tipos de planta. A modelagem da planta para esta proposta é igual à anterior (fig. 7), tendo apenas suas regras de contrato diferentes.

As regras de contrato para esta estratégia são as seguintes:

- O sistema de aquecimento só pode ser ligado durante o turno da noite;

- O sistema de aquecimento deve ser ligado caso:
 - A planta pertença ao grupo de plantas de clima quente, e a temperatura interna da estufa esteja abaixo de 27°C;
 - A planta pertença ao grupo de plantas de clima moderado, e a temperatura interna da estufa esteja abaixo de 18°C;
 - A planta pertença ao grupo de plantas de clima frio, e a temperatura interna da estufa esteja abaixo de 16°C.
- O sistema de resfriamento só pode ser ligado durante o turno do dia;
- O sistema de resfriamento deve ser ligado caso:
 - A planta pertença ao grupo de plantas de clima quente, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam acima de 27°C;
 - A planta pertença ao grupo de plantas de clima moderado, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam acima de 24°C;
 - A planta pertença ao grupo de plantas de clima frio, e as temperaturas interna e externa da estufa estejam acima de 21°C.
- Os sistemas de resfriamento e aquecimento não podem ser ligados simultaneamente.

Representações gráficas das regras de contrato encontram-se no apêndice do trabalho (A).

4 Simulação

Para que os modelos de controle possam ser testados e validados, a aplicação prática em uma estufa real ou simulada se faz necessária. Para isso, um simulador virtual do ambiente de estudo foi criado. Suas configurações foram definidas com base nas práticas mais comuns de cultivo no Brasil e englobam o formato da estrutura da estufa, material de cobertura utilizado e atuadores do sistema.

Um modelo matemático foi desenvolvido para que se pudesse descrever as condições ambientais de temperatura e umidade absoluta da estufa através do uso de equações diferenciais. Este trabalho empregou o modelo proposto por Fitz-Rodríguez (FITZ-RODRÍGUEZ et al., 2010), o qual se baseia nas equações de balanço de massa e energia, que seguem os modelos propostos por Takakura (TAKAKURA, 1976) e Takakura e Fang (TAKAKURA; FANG, 2002). Este modelo é genérico o bastante, de tal forma que pode ser aplicado a diferentes formatos de estufas e condições climáticas. Bem como tem representações dos equipamentos que atuam no controle da temperatura, possibilitando assim a atuação do sistema de controle sobre estes parâmetros de forma automática e interativa durante o processo de simulação.

4.1 Modelo Matemático

A equação que determina o comportamento da temperatura interna na estufa (T_{in}) é a seguinte:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{C_p \cdot \rho \cdot H} \cdot (Q_{GRin} + Q_{Heater} - L \cdot E - (T_{in} - T_{out}) \times (q_v \cdot C_p \cdot \rho + w \cdot k)), \quad (4.1)$$

tal que C_p é o calor específico do ar ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$); ρ é a massa específica do ar ($kg \cdot ar \text{ seco} \cdot m^{-3}$); H é a altura da estufa (m); Q_{GRin} é a radiação solar no interior da estufa ($W \cdot m^{-2}$); Q_{Heater} é o fluxo de calor proveniente do sistema de aquecimento ($W \cdot m^{-2}$); L é o calor latente de vaporização da água ($J \cdot kg^{-1}$); E é a taxa de evapotranspiração dentro da estufa ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$); T_{out} é a temperatura externa à estufa ($^{\circ}C$); q_v é a taxa de ventilação ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$); w é a razão entre a superfície da cobertura e a superfície do piso; e k é o coeficiente de transmissão de calor do material de cobertura ($J \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1} \cdot s^{-1}$).

Note que, enquanto as variáveis Q_{GRin} e Q_{Heater} influenciam diretamente no aquecimento da estufa, E e L atuam na redução da temperatura. Nas simulações, a emissão de calor de proveniente do sistema de aquecimento será controlada através

da manipulação da variável Q_{Heater} , e a influência do sistema de resfriamento será dada pela da manipulação da taxa de vaporização de água, que compõe o valor da variável E .

O cálculo do valor de Q_{GRin} varia de acordo com a radiação solar externa e o tipo de material de cobertura da estufa que, por sua vez, determina os valores da transmitância e reflexão no solo da estufa. Para obter a radiação solar interna, usamos a seguinte equação:

$$Q_{GRin} = \tau_c \cdot (1 - \rho_g) \cdot Q_{GRout}, \quad (4.2)$$

tal que, τ_c é o valor de transmitância do material de cobertura da estufa; ρ_g é a capacidade de reflexão de luz do material; e Q_{GRout} é a radiação solar do lado de fora da estufa ($W \cdot m^{-2}$).

A variável de evapotranspiração (E) se dá pela soma da transpiração das plantas (E_τ) e o processo de evaporação proveniente do sistema de resfriamento (E_c). A partir da radiação solar do lado de fora da estufa e da transmitância do material de cobertura, podemos estimar o valor de E_τ (FITZ-RODRÍGUEZ et al., 2010), como demonstra a equação (4.3).

$$E_\tau = 0,00006 \cdot \tau_c \cdot Q_{Gout} + 0,0004 \quad (4.3)$$

O valor de evaporação do sistema de resfriamento utilizado nas simulações foi de $E_c = 0.00017129629 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (FITZ-RODRÍGUEZ et al., 2010), quando o sistema de resfriamento está em uso, e quando ele está desligado assume-se $E_c = 0$.

Nas simulações realizadas, a estufa possui uma estrutura *A-frame*, com altura $H = 4$ m. No contexto deste formato, quando não há atuadores influenciando na taxa de ventilação do ambiente (q_v), assume-se que há apenas ventilação natural, o que significa que temos $q_v = 0.014 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (FITZ-RODRÍGUEZ et al., 2010). Considerando o contexto da simulação, que se dá em uma área de clima mais quente (vide seção 4.2), fez-se necessário o uso de um exaustor com uma taxa de ventilação maior e, portanto, definimos $q_v = 0.043 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (FITZ-RODRÍGUEZ et al., 2010).

O material de cobertura utilizado nas simulações foi o polietileno, que tem o coeficiente de transmissão de calor $k = 6,2 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$, transmitância $\tau_c = 0.87$ (adimensional) e capacidade de reflexão de luz $\rho_g = 0.5$ (adimensional). A razão entre a área de cobertura da estufa e a área do solo é $w = 2,25$ (adimensional).

Quanto ao sistema de aquecimento, a existência de um aquecedor foi considerado na desenvolvimento da simulação. O fluxo de calor gerado por esse sistema

(Q_{Heater}) se dá pela relação entre a potência do aquecedor e a área da superfície do solo da estufa. Logo, para cada aquecedor, temos:

$$Q_{Heater} = n \cdot \left(\frac{H_{cap}}{A_{fl}} \right), \quad (4.4)$$

tal que H_{cap} representa a potência do aquecedor (W), A_{fl} é a área do solo da estufa e n é a quantidade de aquecedores ativos. Foi-se considerada a existência de apenas um aquecedor ($n = 1$) com uma potência de $75kW$ para as simulações realizadas.

4.2 Dados da Simulação

Com base na pesquisa desenvolvida por Dalrymple, em especial por seu trabalho no norte do México (DALRYMPLE, 1973), podemos agrupar plantas em certas categorias de temperatura, de acordo com o intervalo de temperatura que propicia seu bom desenvolvimento. A partir disso, podemos descrever 3 (três) grupos de plantas:

- **grupo 1** - plantas consideradas de clima quente, que devem ser cultivadas em um ambiente com temperatura entre **27°C** e **38°C** durante o período do dia e **24°C** e **27°C** durante o período da noite. Exemplos: melão, pepino e abóbora;
- **grupo 2** - plantas de clima moderado, que devem ser cultivadas em um ambiente com temperatura entre **24°C** e **27°C** para o período do dia e **16°C** e **18°C** para o período da noite. Exemplos: berinjela, cebola, pimenta, tomate;
- **grupo 3** - plantas de clima frio, que devem ser cultivadas em um ambiente com temperatura entre **21°C** e **27°C** para o período do dia e **10°C** e **16°C** para o período da noite. Exemplos: feijão, beterraba, brócolis e cenoura;

A partir de tais categorias, uma planta pertencente ao **grupo 2** foi selecionada para ser aplicada às simulações: o tomate. Dada a quantidade de modelos de controle, de dias processados e a grande massa de dados consequente a ser analisada, o escopo deste trabalho restringe-se a simulações com apenas um tipo de planta, por questões de viabilidade prática.

No contexto do Brasil, o estado de Goiás é um dos maiores produtores de tomate da atualidade. A região reúne condições ideais, tanto climáticas quanto topográficas, para o cultivo do fruto (IBGE, 2019; RIBEIRO, 2015). Portanto, uma estação meteorológica localizada na cidade de Goiânia foi escolhida para fornecer os dados climáticos necessários para a simulação (latitude -16.6799; longitude: -49.255). Os dados relativos às condições climáticas foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2011), e compreendem o período de 24 horas dos dias **20/07**,

26/08, 03/10 e 17/12 durante o ano de 2018 (concernentes a diferentes estações do ano, para se ter uma análise mais ampla), medidos hora a hora.

Os dados fornecidos foram a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade absoluta do ar ($\text{g}_{\text{water}}\text{kg}_{\text{dry}}^{-1}$), umidade relativa do ar (%) e radiação solar (W/m^2). É importante informar que os dados fornecidos foram interpolados usando o método de interpolação polinomial de Lagrange para que as medidas fossem convertidas para a unidade temporal de segundos. O que é necessário para a execução do modelo de controle e simulação da estufa.

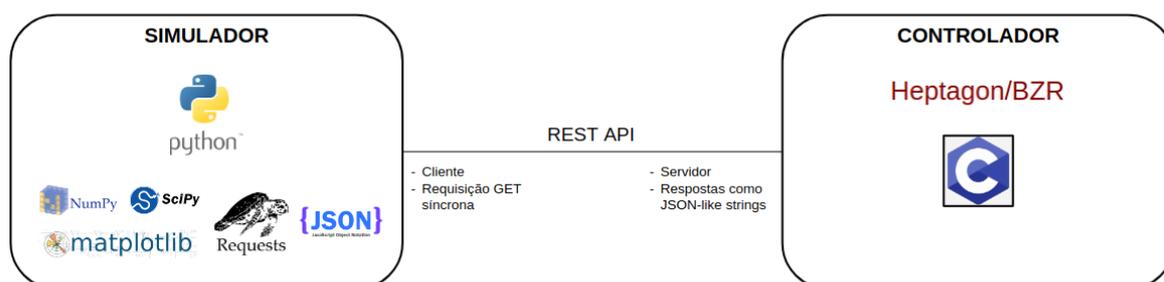
4.3 Implementação

Com base na equação (4.1), e nas configurações e dados apresentados nas seções 4.1 e 4.2, o simulador foi implementado, utilizando a linguagem Python. O desenvolvimento foi possibilitado graças à utilização de algumas bibliotecas. Algumas a serem destacadas são *NumPy*, *Python Data Analysis Library (Pandas)*, *Matplotlib*, que fazem parte de um ecossistema chamado *SciPy*, destinado a computação técnica e científica, e *Requests*. A biblioteca *NumPy* é usada para computação científica em Python que fornece um objeto de matriz multidimensional e uma variedade de rotinas para operações rápidas em matrizes, incluindo matemática, lógica, transformadas discretas de Fourier, álgebra linear básica, operações estatísticas básicas, simulação aleatória, entre outros ([The SciPy Community, 2008](#)), e necessita de uma quantidade de memória significativamente menor se comparada às usuais listas de Python. Ela é um pré-requisito importante para a biblioteca *Pandas*, já que seus objetos dependem fortemente da *NumPy*. A biblioteca *Pandas*, por sua vez, é uma ferramenta de manipulação de dados de alto nível que, através de sua estrutura de dados chamada de *DataFrame*, possibilita o armazenamento e manipulação de dados tabulares em linhas de observações e colunas de variáveis. Seus *Dataframes* podem ser gerados através de dicionários Python ou arquivos em CSV, por exemplo, facilitando a leitura dos dados. Já a biblioteca *Matplotlib* é essencialmente usada para gerar gráficos a partir dos *Dataframes* resultantes das simulação. A biblioteca *SciPy* também dispõe de uma função chama *odeint*, pertencente ao sub-pacote *integrate*, que viabiliza a integração de equações diferenciais ordinárias com o método automático de comutação para problemas rígidos e não-rígidos em Python. A implementação original do simulador foi aprimorada para que os valores das métricas a serem analisadas pudessem ser medidas, bem como, ao final da simulação, um relatório detalhado fosse gerado. Ele também foi alterado de tal forma que algumas variáveis da simulação pudessem ser definidas como argumentos ao se executar do arquivo, tornando-o mais prático.

Para que a comunicação entre o simulador e o controlador fosse possível, o

código do controlador (um script C), gerado a partir da compilação do modelo Heptagon/BZR (Capítulo 3), foi modificado a fim de funcionar como uma interface de aplicação REST, com respostas (formatadas como uma string JSON) que identificam o estado dos atuadores. A Listagem 4.1 exemplifica tais respostas. O código em Python que simula a estufa, enquanto cliente, altera os valores dos atuadores na simulação (Seção 4.1) conforme o que o controlador decide. Seu código foi alterado a fim de viabilizar as requisições síncronas, para que possamos obter, assim, uma resposta dinâmica das condições de temperatura no interior da estufa. A Figura 8 ilustra resumidamente a arquitetura do projeto.

Figura 8 – Arquitetura do projeto associando os sistemas de simulação e controle



Apesar de a unidade temporal da simulação ser em segundos, a frequência de atuação do controlador se dá a cada 1 minuto. Esta taxa de consulta foi escolhida após diferentes simulações que mostraram que este valor apresentou um maior equilíbrio entre viabilidade (em termos de tempo de resposta do controlador) e eficiência (em termos de manutenção da temperatura no intervalo desejado) dentre os valores experimentados: 1, 2, 5 e 10 minutos.

```
1 {
2   "control":{
3     "enabled":true, "frequency":60,"model":"temperature_based_t_out", "
4     version":"v2"
5   },
6   "energy_expenditure":1902,
7   "error":{
8     "above":{
9       "avg":0.525711323692354,
10      "day":{ "avg":0.6620273940512891, "max":2.3895018494913955
11      },
12      "max":9.028842849444814,
13      "night":{ "avg":0.4410565627057968, "max":9.028842849444814 }
14    },
15    "absolute":{
16      "avg":1.0867917519823145,
17      "day":{ "avg":1.6008788380180339, "max":7.28940517767392 },
18      "max":9.028842849444814,
19      "night":{ "avg":0.6649467794919102, "max":9.028842849444814 }
20    },
21    "below":{
22      "avg":1.5113921504472456,
23      "day":{ "avg":2.1432021522776603, "max":7.28940517767392 },
24      "max":7.28940517767392,
25      "night":{ "avg":0.8747823125373521, "max":2.419318956563858 }
26    }
27  },
28  "log": {
29    "2018-07-20 00:00:01": {
30      "cooling": false, "heating": false, "temperature": 16.4
31    },
32    "2018-07-20 00:00:02": {
33      "cooling": false, "heating": false, "temperature":
34      16.39990804937336
35    },
36    "2018-07-20 00:00:03": {
37      "cooling": false, "heating": false, "temperature":
38      16.399816210249565
39    },
40    ...
41  },
42  "percent_within_ideal":69.37188226988114
43 }
```

Listagem 4.1 – Exemplo da resposta da aplicação REST formatada como uma string JSON identificando o estado dos atuadores.

Na Listagem 4.1 temos que *control* descreve as configurações do sistema de controle, tal que *enabled* define se o controle está ativo ou não, *frequency* mostra a frequência, em segundos, na qual o sistema é consultado, *model* é a referência que identifica do modelo de controle que está sendo utilizado na simulação em questão, e *version* determina a versão do modelo que foi executada. Em seguida, temos o índice *energy_expenditure*, que registra o gasto energético total da simulação, em *Wh*. No índice *error*, encontramos o registro dos pontos de erro, em °C, que ocorreram durante a simulação, tal que *above* representa os pontos acima da temperatura máxima ideal para a planta simulada, *below* representa os pontos abaixo da temperatura mínima ideal para a planta simulada e *absolute* representa os valores de erro absoluto máximos de ambos *below* e *above*. As informações que temos em cada um destes índices encontrados dentro de *error* são: *max*, que é o ponto de erro mais distante do seu respectivo limite referente ao dia inteiro, *avg*, que é o cálculo da média dos pontos de erro fora do seu respectivo limite referente ao dia inteiro, e os índices *day* e *night*, que contém estas mesmas informações, contudo restringidas ao período do dia e da noite, respectivamente. A seguir, temos o índice *log*, que contém os registros, segundo a segundo, da temperatura atual (*temperature*) e o estado dos atuadores (se estes estão ligados, definidos pelos índices *cooling* para o sistema de resfriamento, e *heating* para o de aquecimento). E por último temos o índice *percent_within_ideal*, que registra a porcentagem de tempo que a temperatura permaneceu dentro do intervalo ideal durante a simulação. Os códigos para o sistema de controle e o simulador podem ser encontrados no [repositório do projeto](#)¹.

¹ Endereço do repositório do projeto no github: <https://github.com/gmathx/tcc>

5 Análise de Resultados

A Tabela 1 apresenta o resumo das configurações de simulação e de controle para todos os modelos. Com base nos resultados obtidos simulando os dados descritos na Seção 4.2, podemos fazer uma análise comparativa no que diz respeito aos seguintes aspectos: a eficiência de cada modelo, ou seja, a porcentagem de tempo em que a temperatura interna da estufa permanece dentro do intervalo ideal para a planta em questão; o gasto energético de cada modelo, isto é, a quantidade de kWh gasta com base no uso dos atuadores controlados (sistemas de aquecimento e resfriamento); e o valor de erro médio absoluto, que se refere à média de pontos de temperatura, em °C, fora do intervalo ideal para a planta em valores absolutos, isto é, tanto acima quanto abaixo do intervalo.

Altura da estufa	4 m
Área do material de cobertura	674 m ²
Área do solo	300 m ²
Transmitância do material de cobertura	87%
Redução de incidência de radiação solar pela cortina de sombra	70%
Potência do sistema de aquecimento	75 kWh
Potência do sistema de resfriamento	128 kWh
Taxa de ventilação	0,043 m ³ .m ⁻² .s ⁻¹
Coefficiente de transmissão de calor do material de cobertura	6.2 J.m ⁻² .°C ⁻¹ .s ⁻¹
Frequência de atuação do controlador	1 min

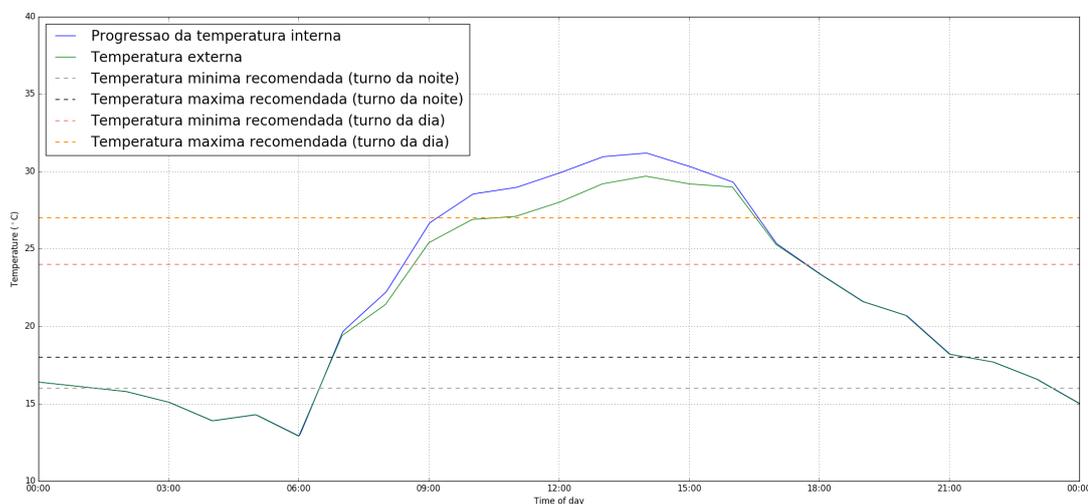
Tabela 1 – Configurações de simulação e controle

5.1 Comportamento ao Longo do Tempo

Observemos mais a fundo o comportamento da temperatura ao longo do tempo referente ao dia **20 de Julho de 2018**, que ocorre no inverno, onde o clima tende a ser mais frio. A Figura 9 representa a progressão da temperatura no dia em questão, estando o controle desabilitado. Podemos perceber a partir dela que a temperatura interna da estufa (denotada pela linha azul no gráfico) é relativamente igual à temperatura externa (denotada pela linha verde no gráfico) das 00h às 07h e das 16h em diante. No período das 07h às 16h a temperatura interna se situa alguns pontos, em °C, acima da temperatura externa. Isso se dá devido à maior incidência solar que ocorre neste intervalo de tempo. Para este cenário, então, temos que a temperatura permaneceu dentro do intervalo ideal para a planta durante apenas 21.6% do tempo de simulação, equivalente a um período de 24h; e a margem de erro médio absoluto da temperatura

é de aproximadamente 2.5°C. Não há gasto energético computado para este cenário visto que os atuadores permaneceram desligados durante toda a simulação.

Figura 9 – Progressão de Temperatura para 20 de Julho de 2018, controle desabilitado.



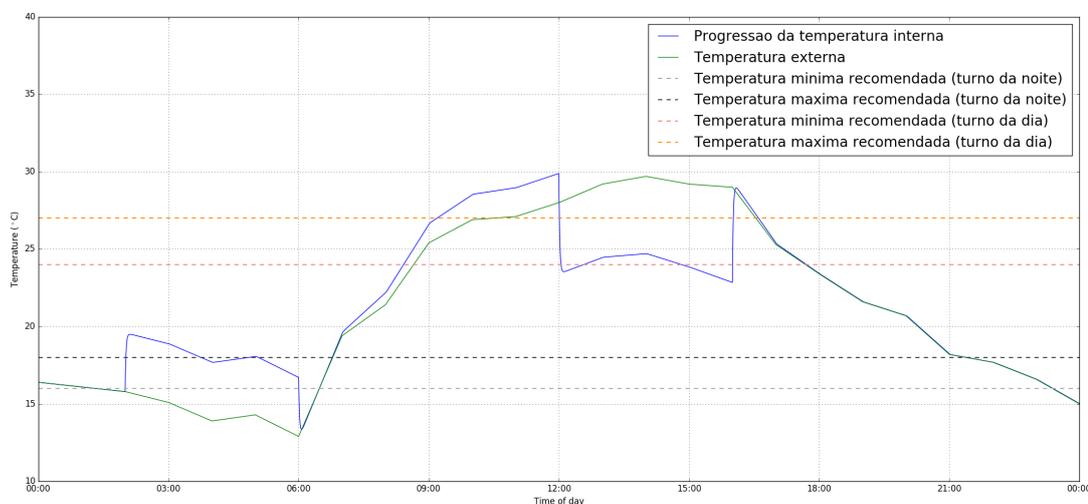
Fonte: Composição do autor.

Neste mesmo contexto, a Figura 10 representa a progressão da temperatura estando o modelo de controle *time* habilitado. Podemos notar que, considerando as regras descritas no Capítulo 3, das 02h às 06h a temperatura interna mantém uma diferença relativa de aproximadamente 3°C acima da temperatura externa. Quando o sistema de resfriamento é acionado das 12h às 16h, a disparidade da temperatura interna é por volta de 5°C abaixo da temperatura externa. Nos demais períodos, a temperatura volta a se comportar igual ao modelo apresentado anteriormente, com o controle desabilitado. A partir disso, nota-se que o modelo apresentou uma eficiência de 39.7%, uma margem de erro médio absoluto de quase 2°C e um taxa de gasto energético de 812 kWh. Este é o único modelo que tem uma taxa de gasto energético diário constante, e isto ocorre por seus atuadores estarem ligados sempre em períodos pré-determinados do dia.

Seguindo para a Figura 11, que representa a progressão da temperatura ao se utilizar o modelo *temperature_in_out*, vemos que a oscilação da temperatura é bem maior em vários períodos do dia. Isto se dá devido às próprias regras de controle definidas no Capítulo 3 em relação à frequência na qual o controle é consultado, habilitando e desabilitando os atuadores bem mais ativamente. Desta forma, observamos uma eficiência de aproximadamente 69.4% para este modelo, uma margem de erro médio absoluto por volta de 1.1°C e um taxa de gasto energético de 1902 kWh.

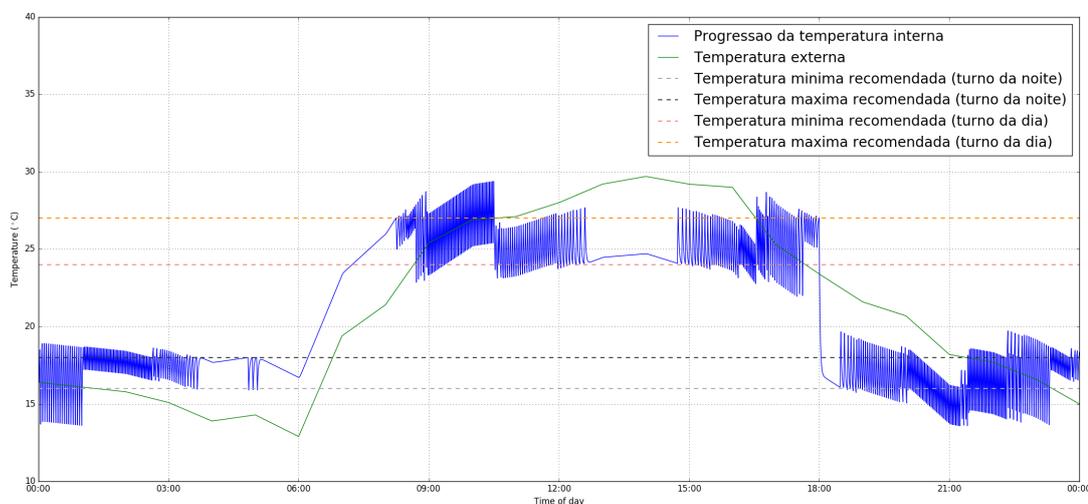
Finalmente, a partir da Figura 12, que representa a progressão da temperatura com o modelo *temperature_shift* sendo usado, constatamos um comportamento similar ao modelo anterior, *temperature_in_out*, com oscilações de temperatura mais

Figura 10 – Progressão de Temperatura para 20 de Julho de 2018, controle baseado no tempo (time) habilitado.



Fonte: Composição do autor.

Figura 11 – Progressão de Temperatura para 20 de Julho de 2018, controle baseado na temperatura interna e externa da estufa (temperature_in_out) habilitado.

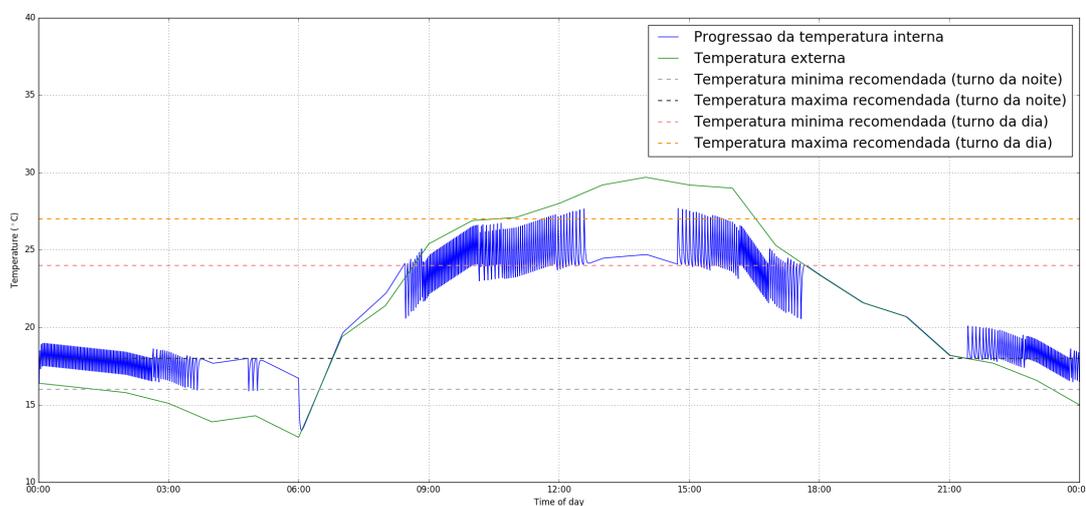


Fonte: Composição do autor.

frequentes e evidentes. A similaridade entre os modelos é esperada, uma vez que as diferenças entre as regras de ambos são bastante pontuais. Podemos notar, então, uma eficiência de aproximadamente 51.5%, com cerca de 2.1°C como margem de erro médio absoluto e uma taxa de gasto energético de 1143 kWh.

Os demais gráficos de progressão de temperatura interna e externa da estufa, dentro do período de 24 horas, para cada modelo de controle (bem como para as simulações feitas com o sistema de controle desabilitado) referentes à cada um dos dias simulados (vide Capítulo 4.2) encontram-se no apêndice deste trabalho (B).

Figura 12 – Progressão de Temperatura para 20 de Julho de 2018, controle baseado na temperatura interna da estufa e turno do dia (*temperature_shift*) habilitado.



Fonte: Composição do autor.

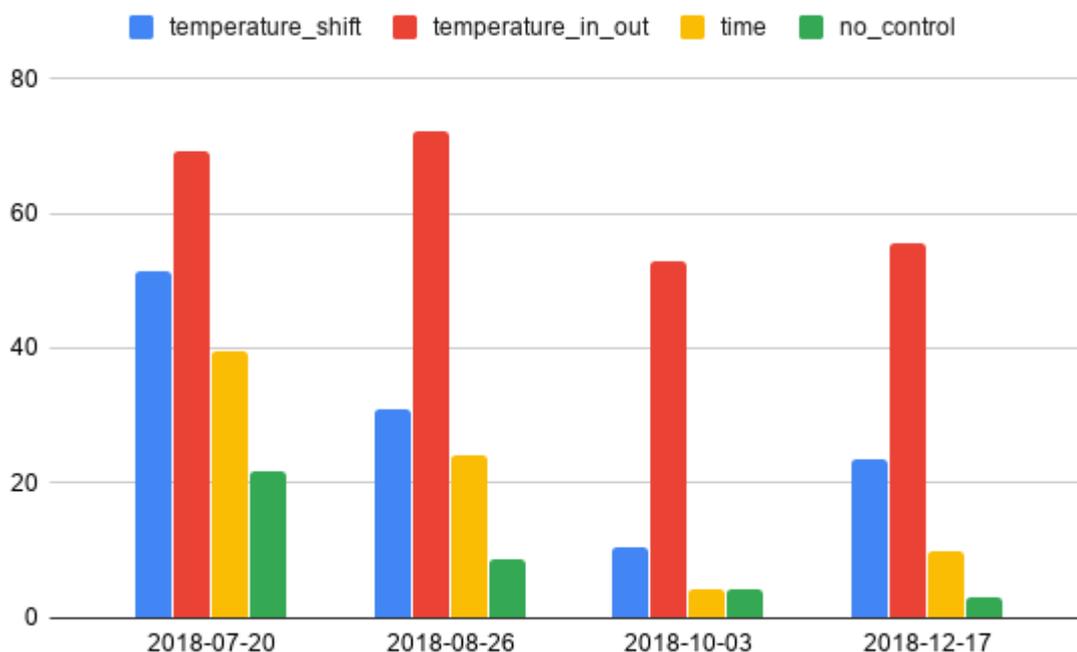
5.2 Estudo Geral

Observe o gráfico comparativo de eficiência dos modelos de controle, ilustrado na Figura 13. Podemos perceber que o modelo de controle *temperature_in_out* tem uma vantagem considerável em relação aos demais, com um aproveitamento de cerca de 72% de eficiência, nos dias avaliados. Em seguida temos os modelos *temperature_shift* e *time*, com um aproveitamento de até aproximadamente 51% e 39%, respectivamente. Este último chega a ter um nível de eficiência similar aos resultados de simulações com o controle desabilitado.

Já a Figura 14 apresenta um gráfico comparativo de gasto energético (em kWh) dos modelos de controle. É possível perceber que o modelo *temperature_in_out* é evidentemente o que acarreta um maior consumo de energia, chegando a atingir a marca de 2454 kWh, para os dias avaliados. Para os demais modelos, temos que o *temperature_shift* chegou a atingir um gasto de 1218 kWh, seguido do modelo *time*, que tem gasto energético constante de 812 kWh, visto que o período em que os atuadores estarão ligados é pré-determinado. É importante destacar que uma vantagem que esta última abordagem apresenta é a previsibilidade no que diz respeito ao seu custo financeiro.

Por último, a Figura 15 compara o erro médio absoluto (em °C) dos modelos de controle. Se analisarmos este gráfico, é fácil notar que, novamente, o modelo *temperature_in_out* possui a menor taxa de erro em relação aos demais, tendo 2°C como maior valor de discrepância de temperatura em relação ao intervalo ideal. Enquanto

Figura 13 – Gráfico comparativo de eficiência dos modelos de controle.



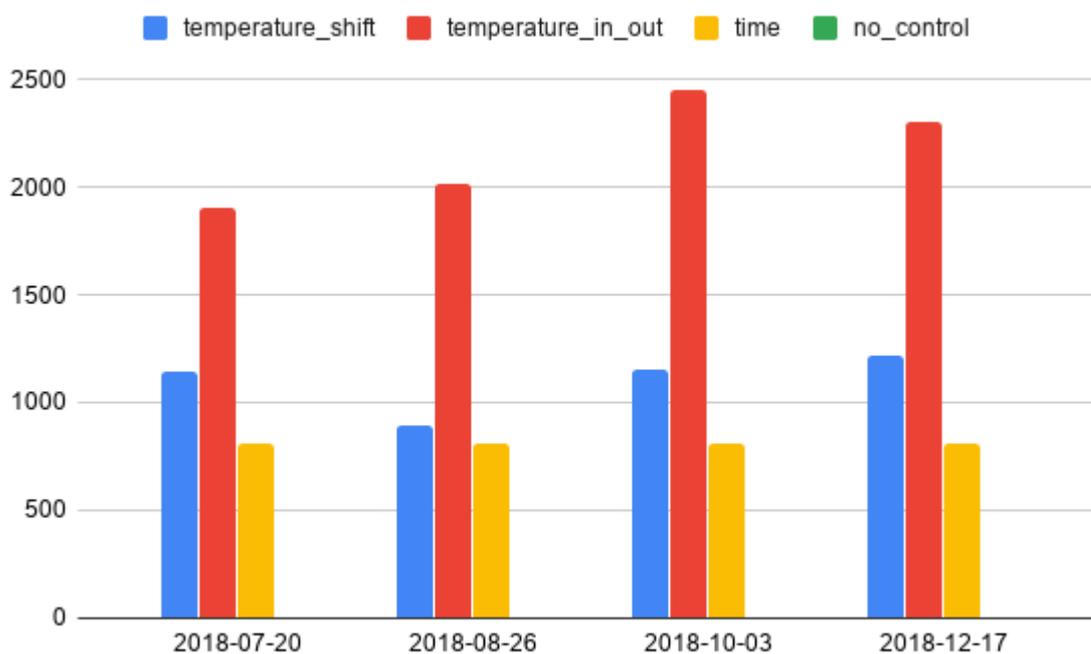
Fonte: Composição do autor.

nos demais modelos, 3°C para o *temperature_shif* e quase 5°C para o modelo *time*. Note que o modelo *time* por vezes tem resultados até piores do que o cenário de simulação não controlado da estufa, e os pontos de erro deles são bastante similares de modo geral.

Considerando as métricas analisadas, é seguro dizer que dentre as abordagens de controle apresentadas, o *temperature_in_out* é o melhor dos modelos, visto que é evidentemente mais eficiente que os demais, bem como apresenta a menor taxa de erro de temperatura fora do intervalo ideal para o plantio. Em contrapartida, ele é o modelo que mais consome energia por hora, chegando eventualmente a ser o dobro que o seu concorrente em segundo lugar, *temperature_shift*. Este, por sua vez, ainda que apresente um nível de gasto energético mais brando, seu nível de eficiência deixa bastante a desejar para 3 dos 4 dias avaliados, bem com seu erro médio absoluto é muito similar ao terceiro e pior dos modelos, *time*.

O modelo *time* foi considerado inviável, visto que sua porcentagem de eficiência é demasiadamente baixa, sua taxa de erro de temperatura fora do intervalo ideal é a maior (chegando a superar a das simulações realizadas sem o sistema de controle, como mencionado anteriormente) e a vantagem de possuir um custo energético constante, acaba por se tornar irrelevante. Em suma, temos que: o modelo *temperature_in_out* é o mais eficiente e com menor taxa de erro de temperatura, porém é o mais custoso; o modelo *time* é de aplicação inviável; e o modelo *temperature_shift*

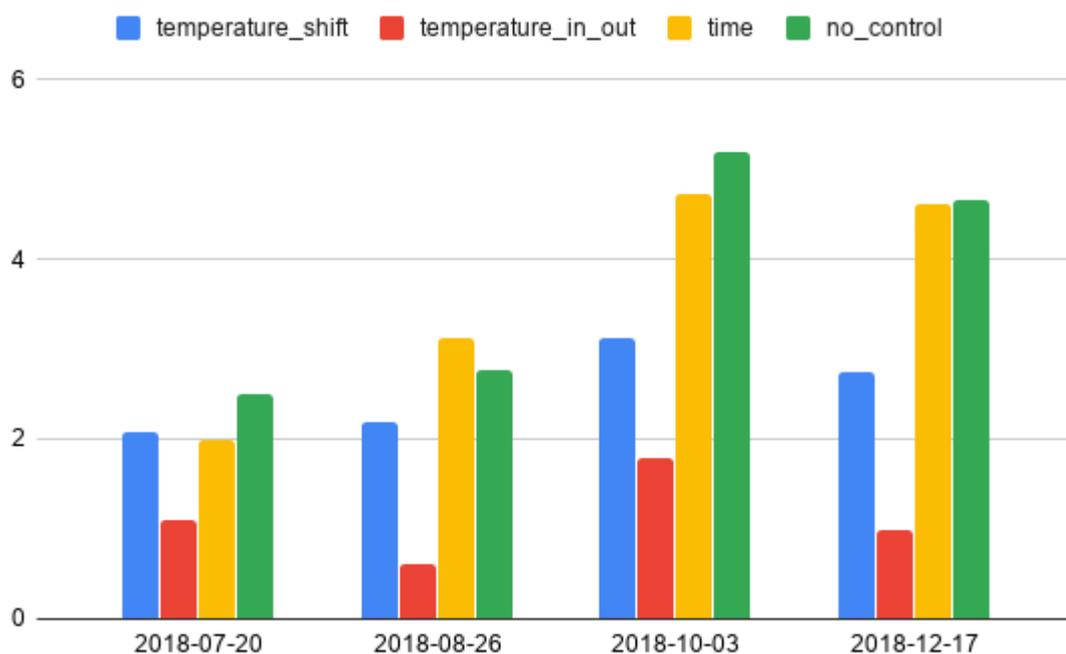
Figura 14 – Gráfico comparativo de gasto energético (em kWh) dos modelos de controle.



Fonte: Composição do autor.

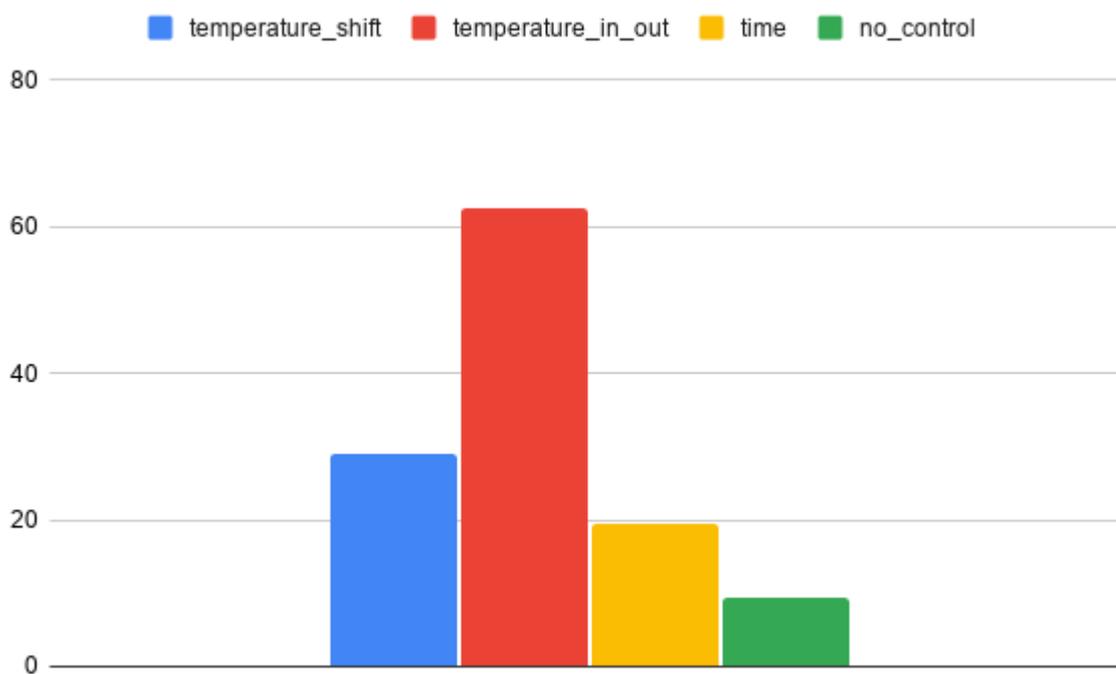
não tem uma relação de custo-benefício muito atraente em relação ao seu concorrente mais robusto. As médias dos resultados para os dias avaliados (vide 4.2) se encontram nos gráficos ilustrados nas Figuras 16, 17 e 18.

Figura 15 – Gráfico comparativo de erro absoluto médio (em °C) dos modelos de controle.



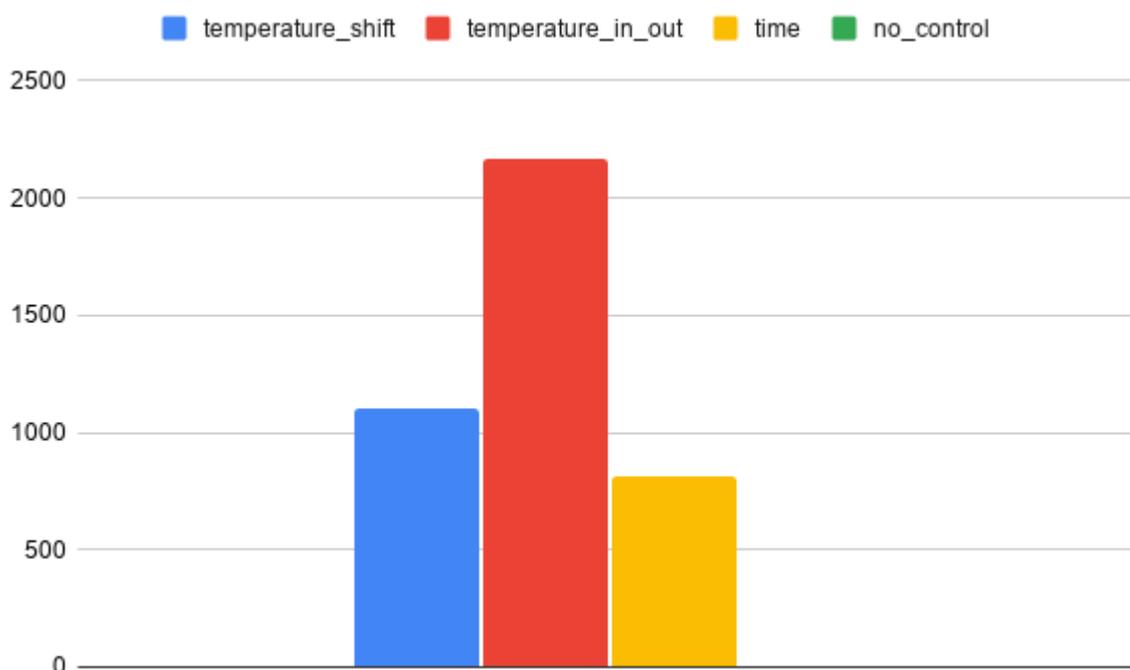
Fonte: Composição do autor.

Figura 16 – Gráfico comparativo da média de eficiência dos modelos de controle para os dias avaliados.



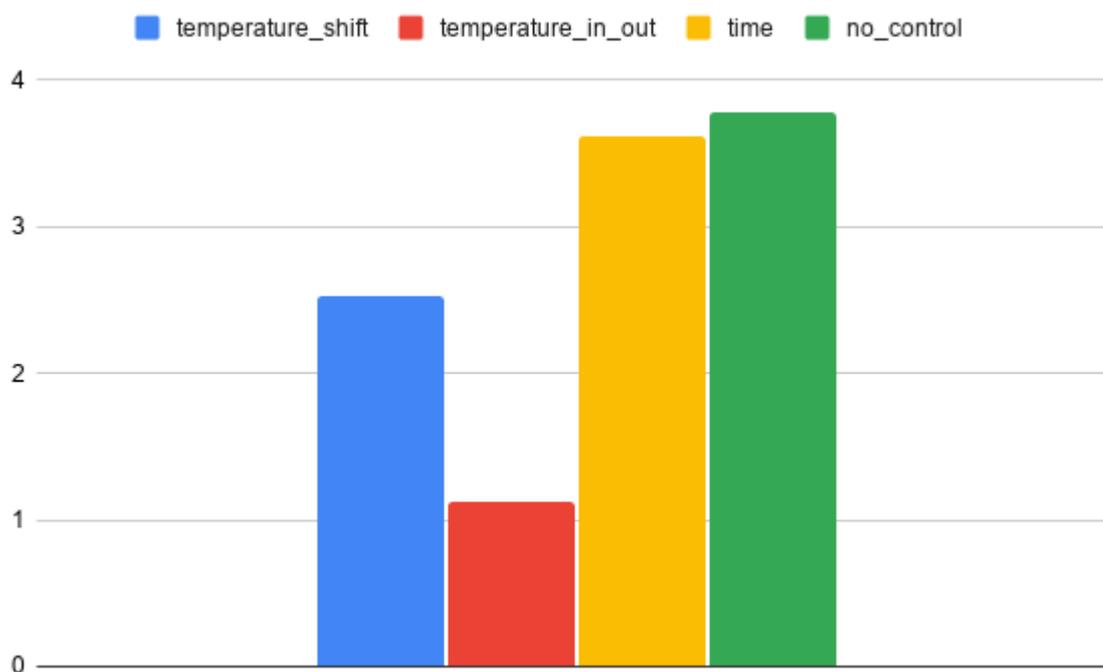
Fonte: Composição do autor.

Figura 17 – Gráfico comparativo da média de gasto energético (em kWh) dos modelos de controle para os dias avaliados.



Fonte: Composição do autor.

Figura 18 – Gráfico comparativo da média de erro absoluto (em °C) dos modelos de controle para os dias avaliados.



Fonte: Composição do autor.

6 Conclusão

Este trabalho se propôs a apresentar três propostas de modelagem para o desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura de estufas baseado em eventos e utilizando o método de Controle Supervisório, analisando a viabilidade em termos de eficiência, consumo energético e taxa de erro destes dos modelos e validando-os através de um simulador virtual de estufas, utilizando dados reais.

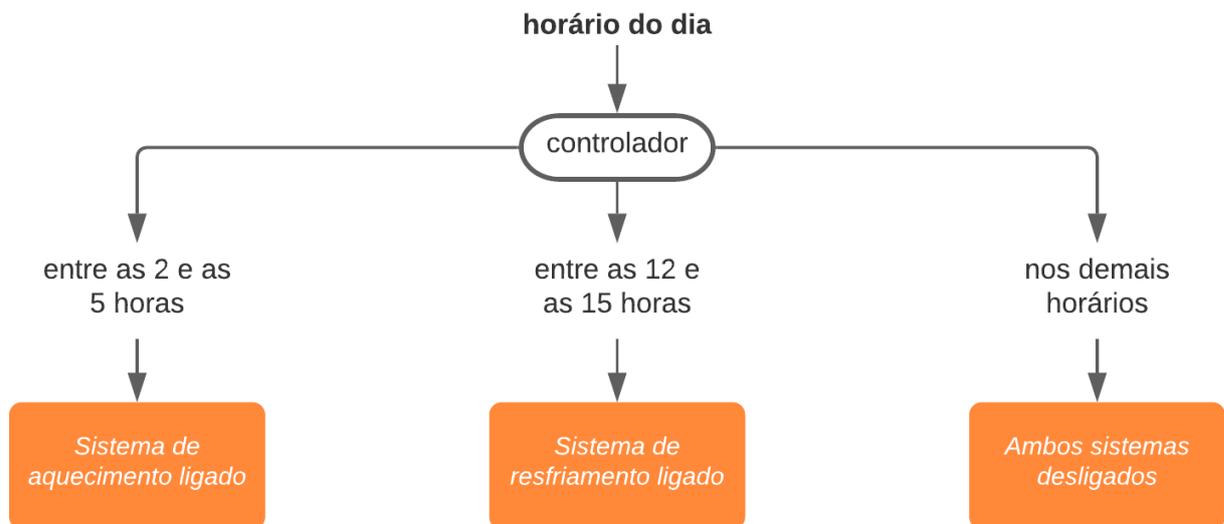
Dados os três modelos propostos *time*, *temperature_shift* e *temperature_in_out*, baseados em períodos do dia e nas temperatura interna e externa da estufa, e considerando o contexto das simulações e os dados ambientais utilizados, constatou-se a inviabilidade dos dois primeiros modelos em relação ao último, no que diz respeito às métricas avaliadas, que são sua eficiência, taxa média de erro e consumo energético.

É importante destacarmos que o sistema possui limitações. Os modelos de controle lidam apenas com os estados de ligado e desligado dos atuadores, ou seja, considerando apenas a utilização total ou nenhuma de suas potências. Bem como ignora o tempo que o atuador pode levar para chegar a sua potência máxima. Também podemos relatar que a quantidade de dados das simulações é massiva. Inicialmente planejava-se simular um período de aproximadamente 6 meses de dados. Contudo, considerando que pra cada dia simulado a interpolação dos dados gera um total de 86.400 entradas registradas, a análise dos dados tornou-se inviável para o tempo disponível para este trabalho, fazendo com que houvesse a restrição para os 4 dias estratégicos analisados.

Trabalhos futuros podem abordar a análise de desempenho destes modelos em locais que possuem clima com temperaturas mais baixas, climas não equatoriais; utilizar diferentes configurações de estufa para analisar a resposta do sistema de controle; ou alterar a composição dos modelos para que possam representar os estados dos atuadores de uma forma mais robusta, considerando níveis de potência dos atuadores, por exemplo.

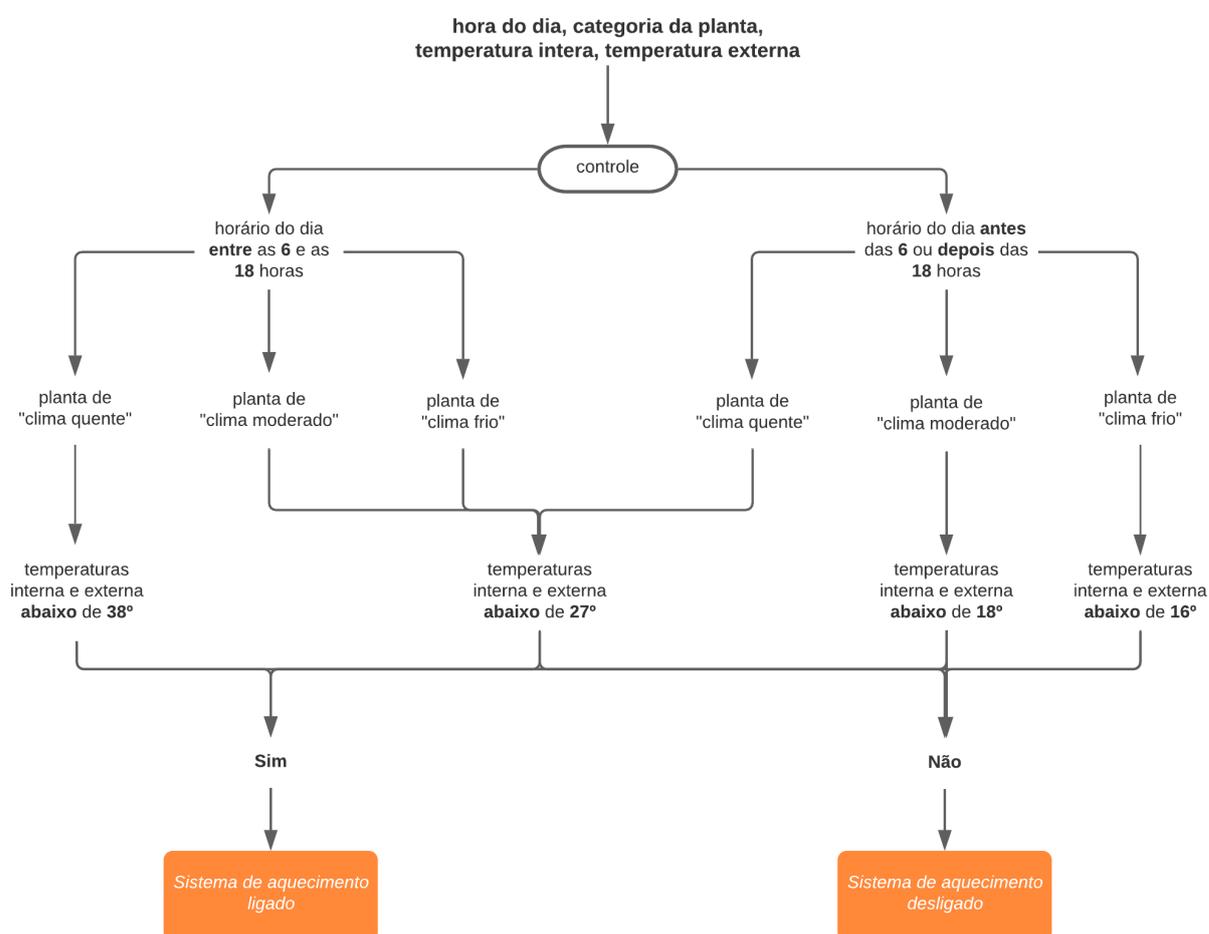
A Representação Gráfica das Regras de Contrato

Figura 19 – Regras de controle dos atuadores do sistema para o modelo baseado no horário do dia (time).



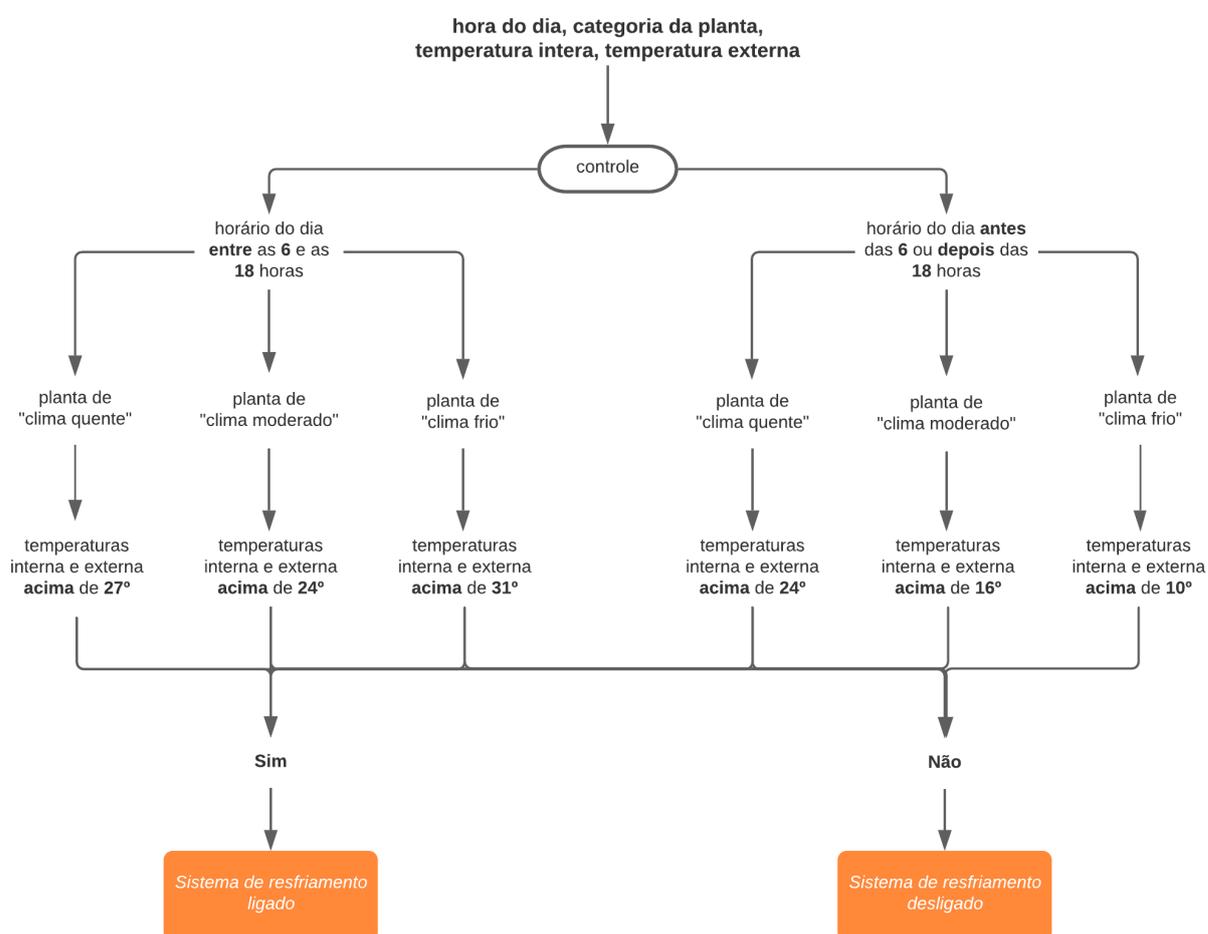
Fonte: Composição do autor.

Figura 20 – Regras de controle do sistema de aquecimento para o modelo baseado nas temperaturas interna e externa da estufa (temperature_in_out).



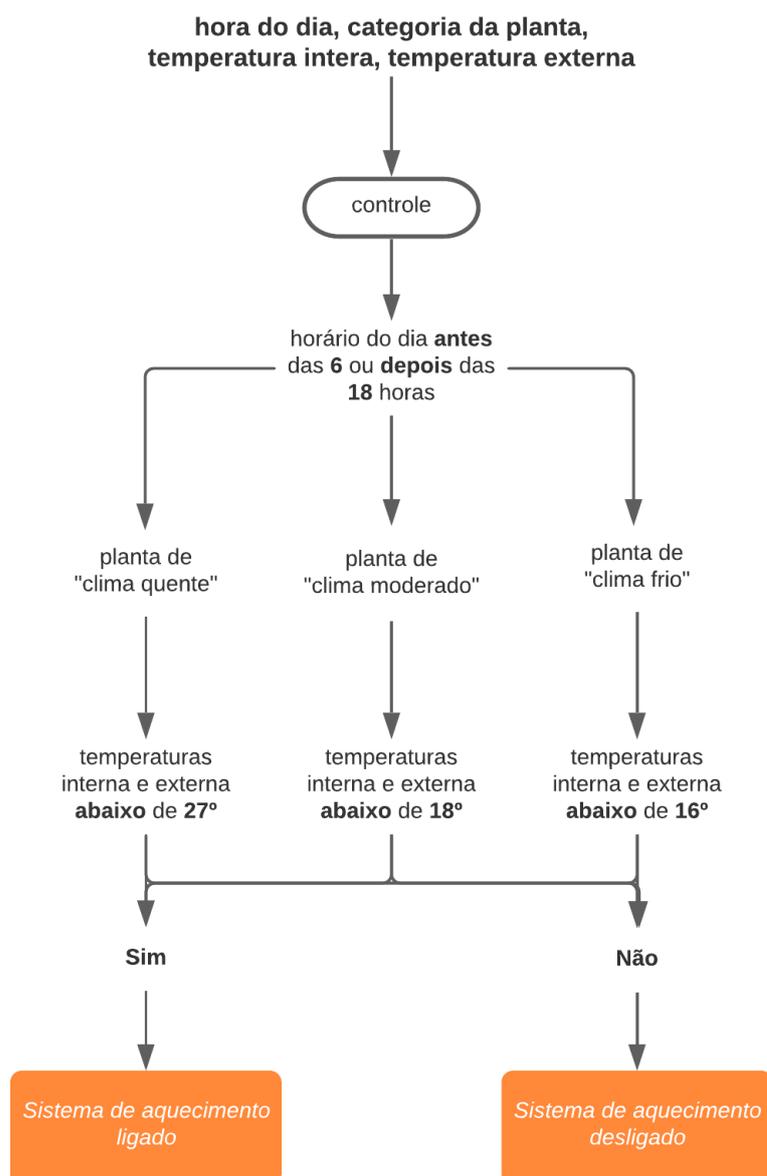
Fonte: Composição do autor.

Figura 21 – Regras de controle do sistema de resfriamento para o modelo baseado nas temperaturas interna e externa da estufa (temperature_in_out).



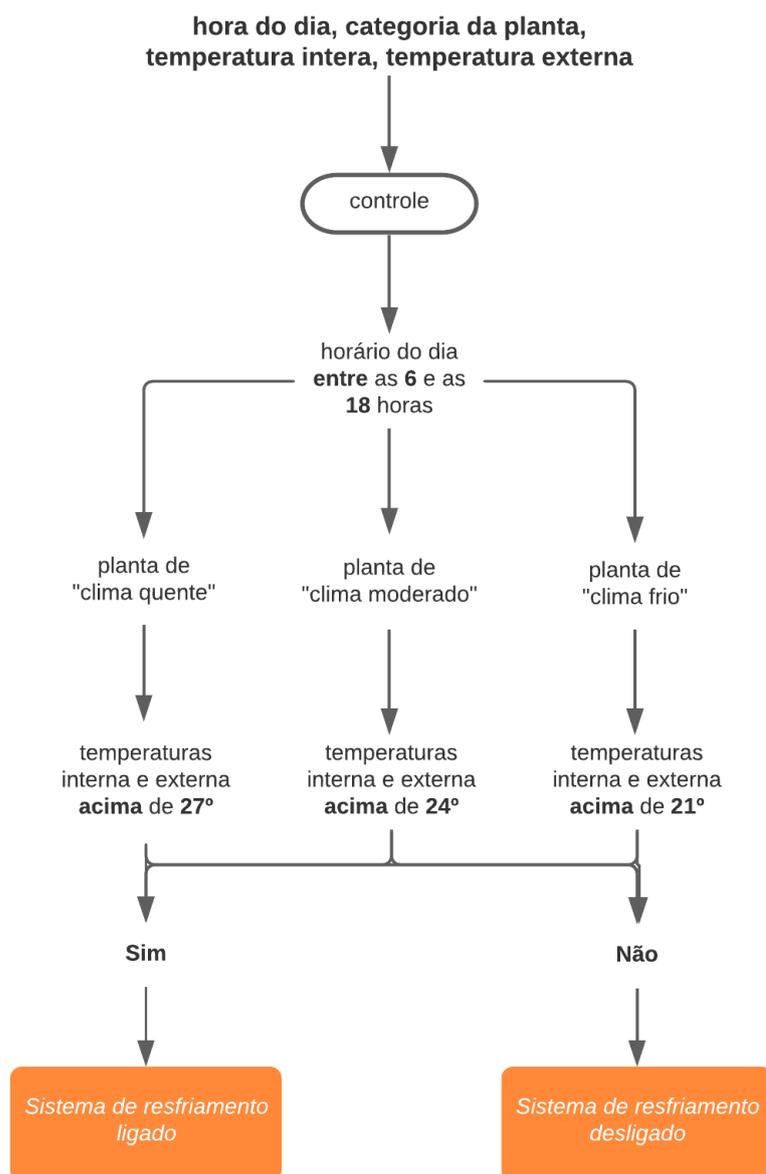
Fonte: Composição do autor.

Figura 22 – Regras de controle do sistema de aquecimento para o modelo baseado na temperatura interna e turno do dia (temperature_shift).



Fonte: Composição do autor.

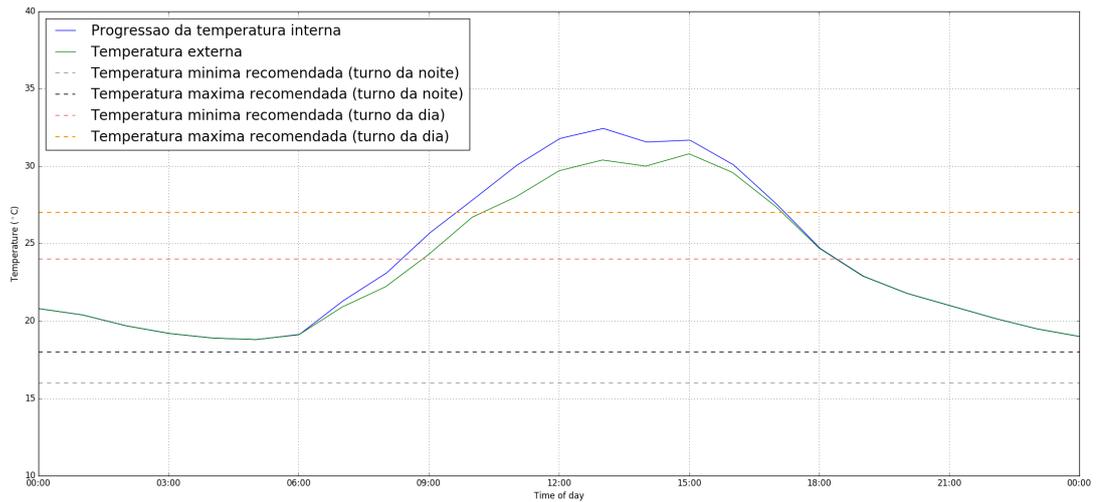
Figura 23 – Regras de controle do sistema de resfriamento para o modelo baseado na temperatura interna e turno do dia (temperature_shift).



Fonte: Composição do autor.

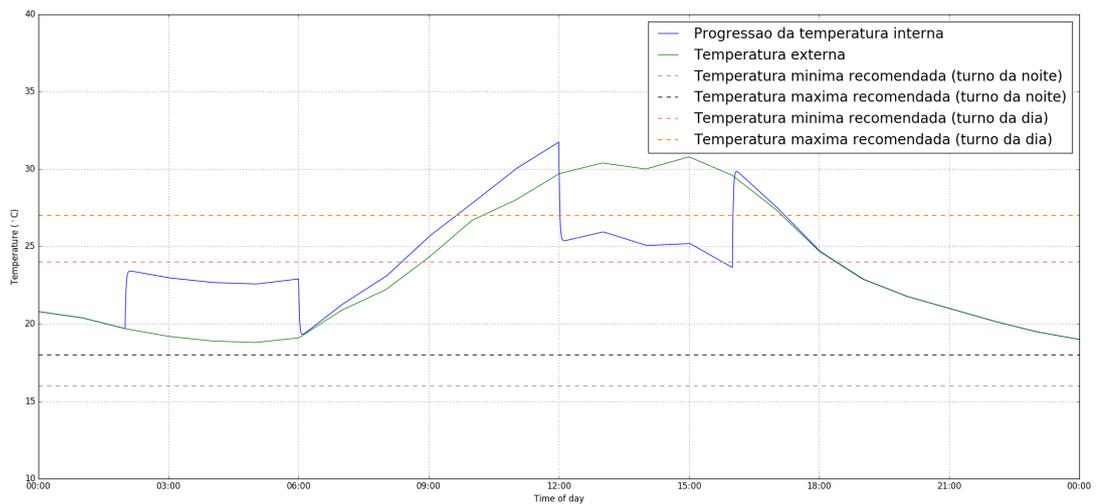
B Gráficos de Progressão de Temperatura

Figura 24 – Progressão de Temperatura para 26 de Agosto de 2018, controle desabilitado.



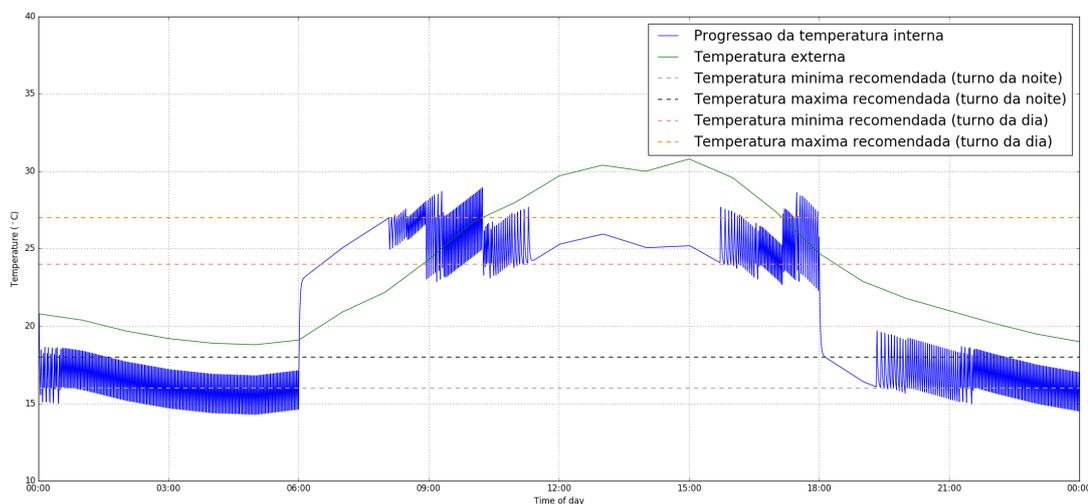
Fonte: Composição do autor.

Figura 25 – Progressão de Temperatura para 26 de Agosto de 2018, controle baseado no tempo (time) habilitado.



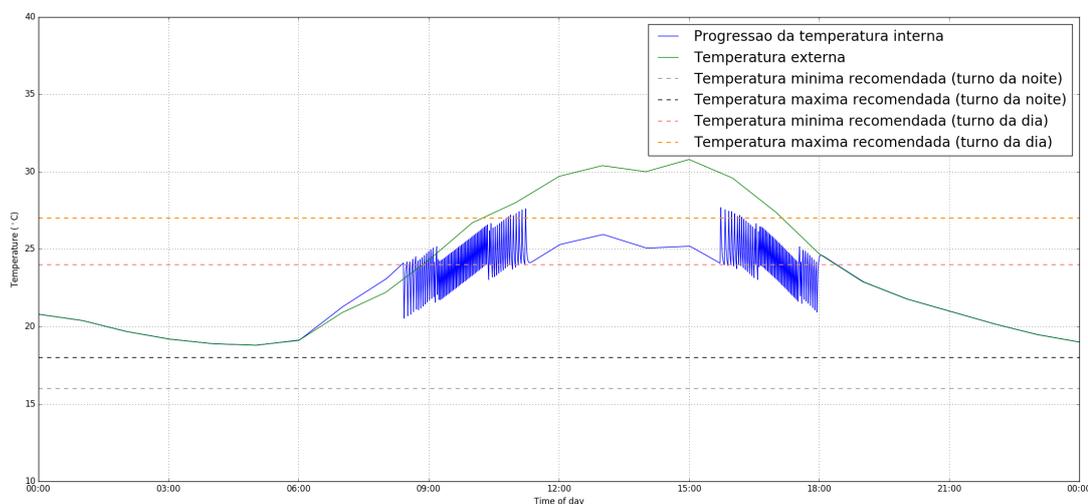
Fonte: Composição do autor.

Figura 26 – Progressão de Temperatura para 26 de Agosto de 2018, controle baseado na temperatura interna e externa da estufa (temperature_in_out) habilitado.



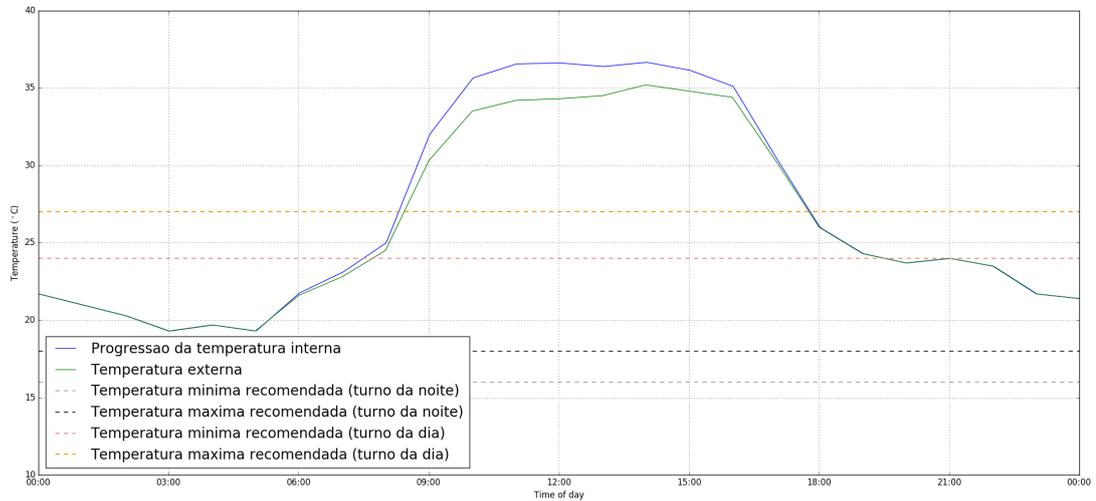
Fonte: Composição do autor.

Figura 27 – Progressão de Temperatura para 26 de Agosto de 2018, controle baseado na temperatura interna da estufa e turno do dia (temperature_in_out) habilitado.



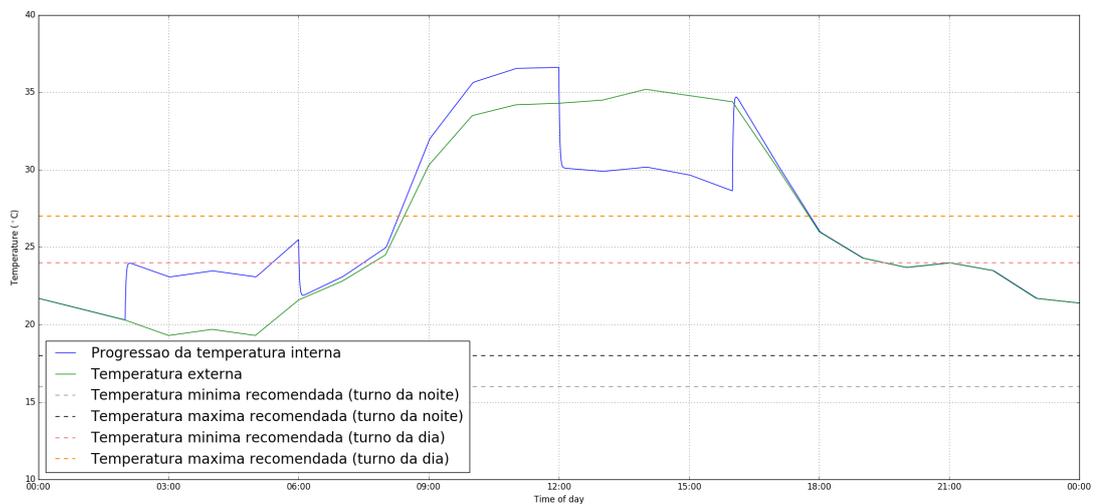
Fonte: Composição do autor.

Figura 28 – Progressão de Temperatura para 03 de Outubro de 2018, controle desabilitado.



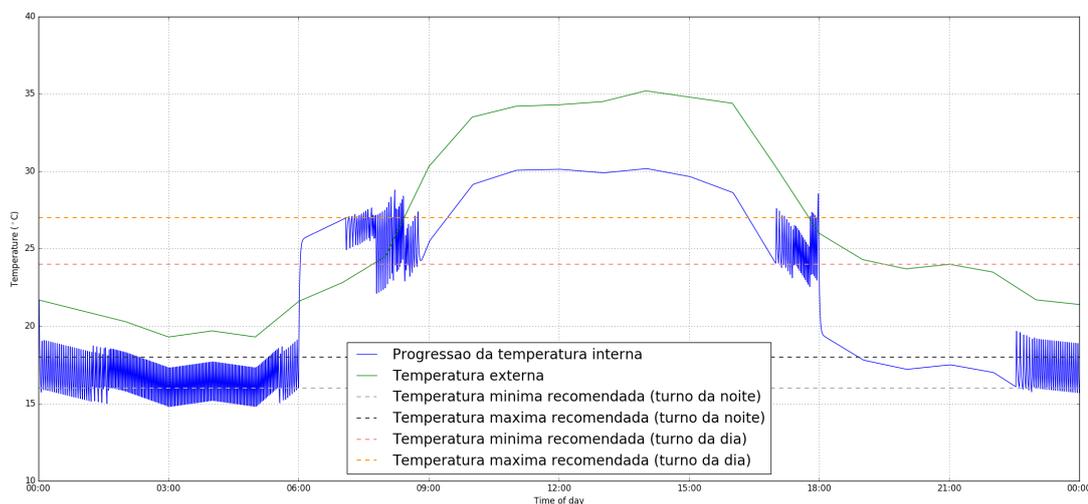
Fonte: Composição do autor.

Figura 29 – Progressão de Temperatura para 03 de Outubro de 2018, controle baseado no tempo (time) habilitado.



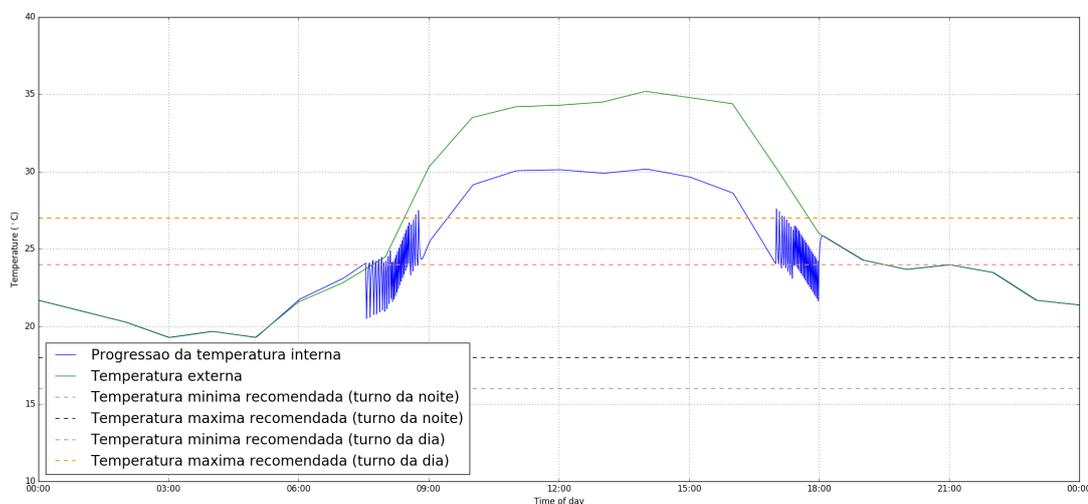
Fonte: Composição do autor.

Figura 30 – Progressão de Temperatura para 03 de Outubro de 2018, controle baseado na temperatura interna e externa da estufa (temperature_in_out) habilitado.



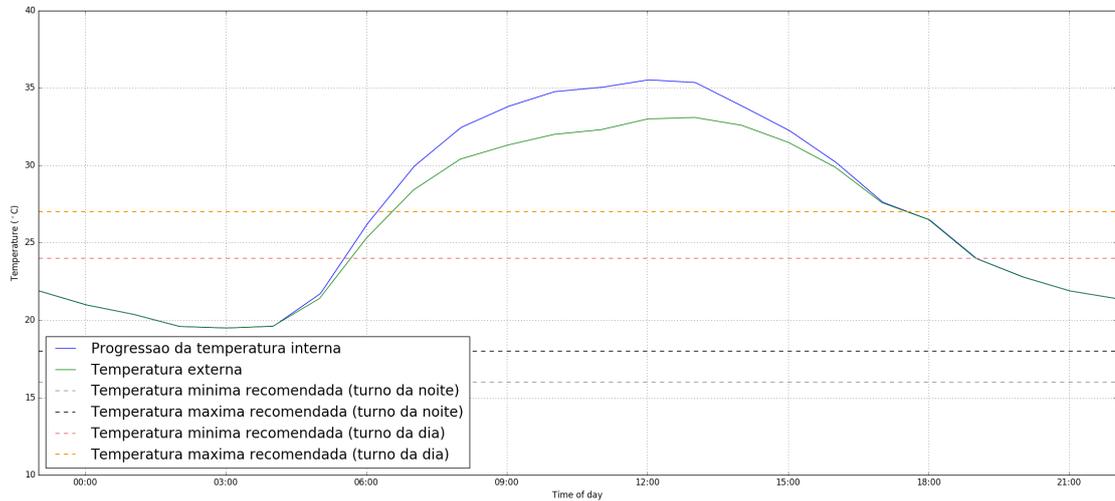
Fonte: Composição do autor.

Figura 31 – Progressão de Temperatura para 03 de Outubro de 2018, controle baseado na temperatura interna da estufa e turno do dia (temperature_shift) habilitado.



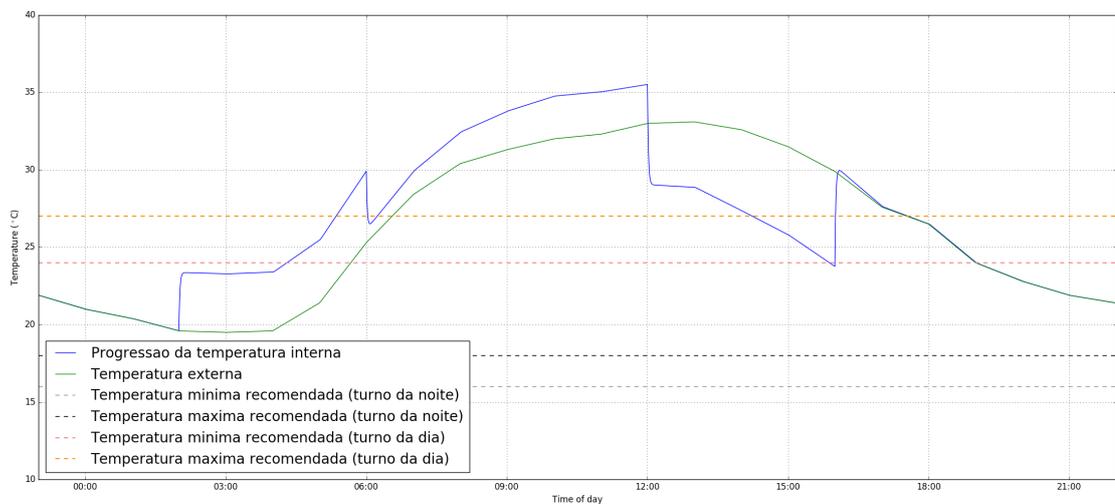
Fonte: Composição do autor.

Figura 32 – Progressão de Temperatura para 17 de Dezembro de 2018, controle desabilitado.



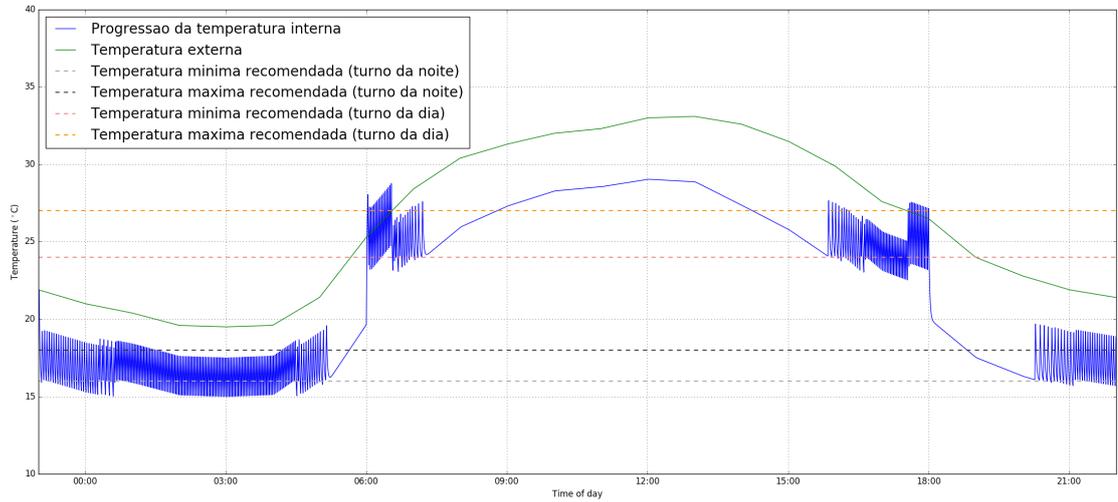
Fonte: Composição do autor.

Figura 33 – Progressão de Temperatura para 17 de Dezembro de 2018, controle baseado no tempo (time) habilitado.



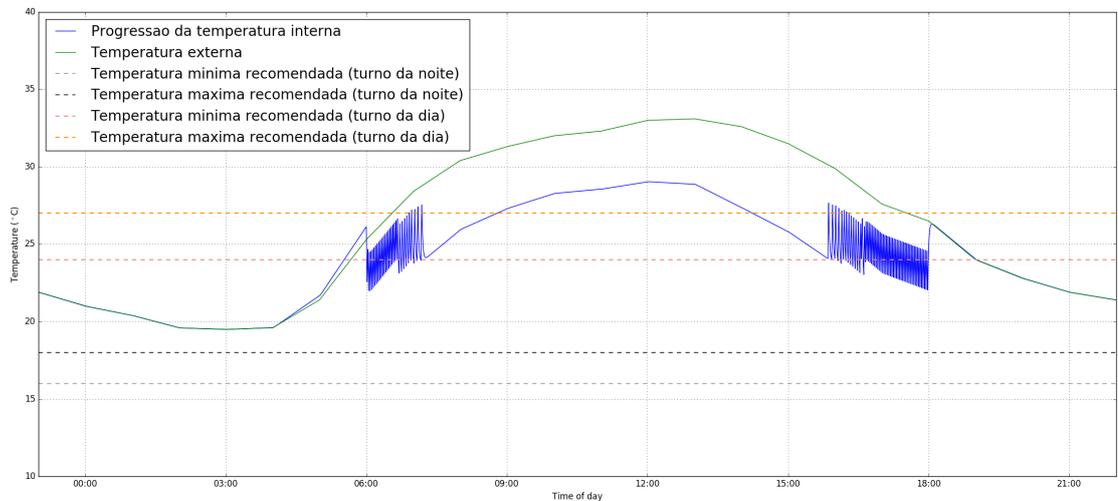
Fonte: Composição do autor.

Figura 34 – Progressão de Temperatura para 17 de Dezembro de 2018, controle baseado na temperatura interna e externa da estufa (temperature_in_out) habilitado.



Fonte: Composição do autor.

Figura 35 – Progressão de Temperatura para 17 de Dezembro de 2018, controle baseado na temperatura interna da estufa e turno do dia (temperature_shift) habilitado.



Fonte: Composição do autor.

Referências

- BEZERRA, D. de F. Automatic synthesis of controllers for the internet of things. 2020. Citado na página 23.
- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. *Introduction to Discrete Event Systems*. Second edition. [S.l.]: Springer, 2010. Citado na página 16.
- CURY, J. E. R. *Teoria de Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos*. [S.l.: s.n.], 2001. Citado na página 18.
- DALRYMPLE, D. G. Controlled environment agriculture: A global review of greenhouse food production. *Foreign Agricultural Economic Report*, n. 89, 1973. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 30.
- FITZ-RODRÍGUEZ, E. et al. Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 70, n. 1, p. 105–116, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- GUILLET, S.; BOUCHARD, B.; BOUZOUANE, A. Correct by construction security approach to design fault tolerant smart homes for disabled people. *Procedia Computer Science*, v. 21, p. 257–264, 2013. Citado na página 23.
- IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola estatística da produção agrícola. 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2415/epag_2019_jan.pdf>. Citado na página 30.
- INMET. *Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET*. 2011. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Citado na página 30.
- MONTGOMERY, E. Sistemas a eventos discretos. 2002. Citado na página 17.
- RAMADGE, P.; WONHAM, W. Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAM Journal on Control and Optimization*, v. 25, n. 1, p. 206–230, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 22.
- RIBEIRO, K. In natura ou processado? Líder em tomate industrial e significativo em tomate mesa. goiás encara altos custos de produção. *Revista Campo*, n. 239, 2015. Citado na página 30.
- SIPSER, M. *Introduction to the Theory of Computation*. Second edition. [S.l.]: Thomson, 2006. Citado na página 17.
- STENSMANN, B. *Propagação do Calor*. 2002. Acessado em 29 de Agosto de 2020. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef008/mef008_02/Berenice/aula3.html>. Citado na página 20.
- SYLLA, A. N.; LOUVEL, M.; RUTTEN, E. *Design Framework for Reliable and Environment Aware Management of Smart Environment Devices*. 2017. Journal of Internet Services and Applications. Citado na página 23.

- SYLLA, A. N. et al. *Modular and Hierarchical Discrete Control for Applications and Middleware Deployment in IoT and Smart Buildings*. 2018. IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). Citado na página 23.
- TAKAKURA, T. Development of veth chart using computer. 1976. Citado na página 28.
- TAKAKURA, T.; FANG, W. Climate under cover. *Springer Science and Business*, 2002. Citado na página 28.
- The SciPy Community. *What is NumPy?* 2008. Acessado em 27 de Setembro de 2020. Disponível em: <<https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html>>. Citado na página 31.
- ZABELTITZ, C. von. Design criteria for greenhouses. In: *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates*. [S.l.]: Springer, 2011. cap. 4, p. 45–58. Citado na página 21.
- ZABELTITZ, C. von. Greenhouse structures. In: *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates*. [S.l.]: Springer, 2011. cap. 5, p. 59–135. Citado na página 21.
- ZHAO, M. et al. *Discrete Control for the Internet of Things and Smart Environments*. 2013. Feedback Computing. Citado na página 23.