

**Universidade Estadual de Maringá**



**CENTRO DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**REGINALDO DE ARAUJO SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DA  
TEMPERATURA INTERNA PARA UM AUTOMÓVEL ESTACIONADO  
DURANTE PERÍODO DE AQUECIMENTO**



**Maringá**

**2016**

REGINALDO DE ARAUJO SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DA  
TEMPERATURA INTERNA PARA UM AUTOMÓVEL ESTACIONADO  
DURANTE PERÍODO DE AQUECIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Ciências Térmicas

Orientador: Prof. Dr. Wagner André dos Santos  
Conceição

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mônica Ronobo Coutinho

Maringá

2016

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)**

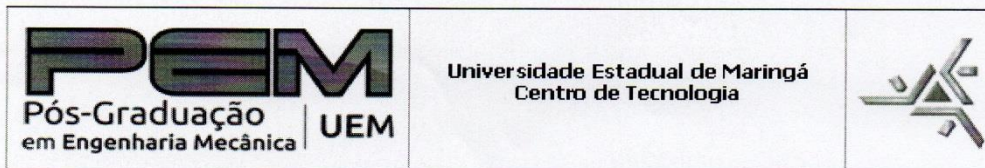
S586d Silva, Reginaldo de Araujo.  
Desenvolvimento de um sistema de controle da temperatura interna para um automóvel estacionado durante período de aquecimento / Reginaldo de Araujo Silva. -- Maringá, 2016.  
100 f. : il., color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Wagner André dos Santos Conceição.  
Coorientador: Profa. Dra. Mônica Ronobo Coutinho.

Dissertação ( Mestre Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Maringá.Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

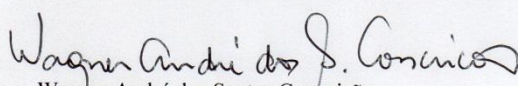
1.Ciências térmicas. 2. Área de controle. 3. Temperatura interna do automóvel. 4. Resfriamento do automóvel. 5. Conforto térmico. 6. Eficiência energética I. Conceição, Wagner André dos Santos, oriet. II. Coutinho, Mônica Ronobo, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá.Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

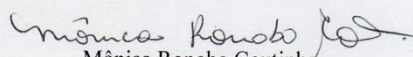
**621.56** CDD 21.ed.

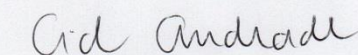


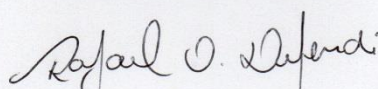
Este é o exemplar definitivo da Dissertação apresentado por **Reginaldo de Araújo Silva**, perante a Comissão Julgadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica em 27/07/2016.

COMISSÃO JULGADORA

  
Wagner André dos Santos Conceição  
Presidente – PEM/UEM

  
Mônica Ronobo Coutinho  
Coorientadora – Unicentro - DEALI

  
Cid Marcos Gonçalves Andrade  
Membro – PEM/UEM

  
Rafael O. Defendi  
Membro – UTFPR/Apucarana

Dedico este trabalho a todos os meus  
familiares e meus amigos, em especial à  
minha esposa e minha filha.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me concedido conhecimento e sabedoria para o início, o desenvolvimento e a conclusão deste projeto.

Agradeço a meu orientador pela paciência e pela compreensão durante a realização deste trabalho e pelo conhecimento transferido.

Assim, ao Rei eterno, imortal, invisível,  
Deus único, honra e glória pelos séculos  
dos séculos. Amém!  
(1 Timóteo 1:17)

## RESUMO

Na sociedade moderna os veículos automotores estão cada vez mais presentes tanto como item de trabalho como de lazer. O grau de conforto que o mesmo pode oferecer aos seus usuários tornou-se um item decisivo no uso dos veículos. Porém, ao deixar um automóvel estacionado sob a incidência da luz solar, o aquecimento do ambiente interno faz com que a temperatura atinja níveis elevados, o que traz vários fatores desagradáveis, como danos aos componentes internos do veículo e um maior consumo de combustível devido ao sistema de ar condicionado e até mesmo riscos a saúde humana. Nos últimos anos vários trabalhos têm sugerido propostas para melhorar as condições de conforto térmico no interior do automóvel e torna-lo mais eficiente.

Neste sentido, este trabalho propôs a construção de um sistema de ventilação capaz de retirar o ar quente do interior do veículo por meio da renovação com o ar do ambiente externo. Para tanto, foi elaborado um sistema de aquisição de dados, que em conjunto com um software comercial, o Matlab<sup>®</sup>, e um micro controlador eletrônico, o Arduino, permitiram obter o perfil térmico no interior do veículo estacionado durante o período de aquecimento e a construção de um sistema de controle para ajustar a velocidade dos ventiladores para obter com qual vazão de ar é possível estabelecer a mínima temperatura no interior do automóvel.

O ajuste do sistema de controle foi possível por meio da utilização do controlador tipo PID, com ações de controle do tipo proporcional, integral e derivativa, agindo ao mesmo tempo. O sistema de sintonia em relações aos parâmetros do controlador permitiu o ajuste para obtenção de mínimos erros. Uma vez colocado em operação a simulação do sistema de controle obteve boa correlação com o sistema experimental possibilitando o alcance dos objetivos estipulados para o trabalho.

A temperatura no interior do automóvel usando o sistema de ventilação alcançou um nível de temperatura bem abaixo da temperatura interna medida sem sistema de ventilação, de 66°C para 42°C, respectivamente, fato este que gera boas perspectivas para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Resfriamento. Ventilação. Automóvel. Temperatura. Controlador.



## **ABSTRACT**

In the modern society the automobiles are more and more presents as much work item as of leisure. The comfort degree that the same can offer to their users became a decisive item in the use of the vehicles. However, when leaving an automobile parked under the incidence of the sunlight, the heating of the internal atmosphere does with that the temperature reaches high levels, what brings several unpleasant factors, as damages to the internal components of the vehicle and a larger consumption of fuel due to the system of conditioned air and even risks the human health. In the last years several works have been appearing with the intention of improving the conditions of thermal comfort inside the automobile and makes it more efficient.

In this sense, this work proposed the construction of a ventilation system to remove the hot air from inside the vehicle by renewing the air in the external environment. For so much, a system of acquisition of data was elaborated, that together with a commercial software, the Matlab®, and a microelectronic controller, the Arduino, allowed to obtain the thermal profile inside the vehicle parked during the heating period and the construction of a control system to adjust the speed of the fans to obtain with which flow of air is possible to establish the minimum temperature inside the automobile.

The adjustment of the control system was possible through the use of the controller type PID, with actions of control of the type proportional, integral and derivative, acting at the same time. The syntony system for the controller's parameters allowed the adjustment for obtaining of minimum errors. Once put in operation the simulation of the control system obtained good correlation with the experimental system making possible the reach of the objectives stipulated for the work.

The temperature inside the automobile using the ventilation system reached a temperature level well below the temperature it interns measured without ventilation system, from 66°C to 42°C , respectively, fact this that generates good perspectives for future works.

**Keywords:** Cooling. Ventilation. Car. Temperature. Controller.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Temperatura das Partes de um Automóvel Exposto ao Sol .....	17
Figura 2: Temperatura Interna do Automóvel com Sistema de Ventilação .....	20
Figura 3: Ventilador Normal com Acionamento por Painel Solar .....	21
Figura 4: Ventilador Forte .....	21
Figura 5: Painel Solar para Alimentação do Ventilador Forte .....	22
Figura 6: Fixação do Ventilador na Janela Aberta do Carro .....	22
Figura 7: Fluxo de Ar no Interior do Automóvel .....	23
Figura 8: Distribuição de Temperatura na Seção Central .....	24
Figura 9: Diagrama das Linhas do Fluxo de Ar na Seção Central do Veículo.....	24
Figura 10: Caixa de Distribuição de Ar.....	30
Figura 11: Painel de Comando da Caixa de Distribuição de Ar.....	31
Figura 12: Arduino Mega .....	32
Figura 13: Sensor de Temperatura LM 35.....	33
Figura 14: Multiplexador CD4051 .....	34
Figura 15: Configuração de Pinos - Multiplexador .....	34
Figura 16: Micro Servo Motor .....	35
Figura 17: Dimmer - Controlador de Potência .....	35
Figura 18: Diagrama de Blocos no Simulink .....	37
Figura 19: Interface Gráfica do Usuário – GUI.....	38
Figura 20: Localização dos Pontos para Medição da Temperatura.....	40
Figura 21: Esquema de Montagem dos Planos.....	41
Figura 22: Base de Fixação dos Sensores de Temperatura LM35 .....	41
Figura 23: Placa Eletrônica com o Multiplexador.....	42
Figura 24: Fixação dos Sensores de Temperatura na Parte Dianteira do Automóvel .....	42
Figura 25: Fixação dos Sensores de Temperatura na Parte Traseira do Automóvel.....	43
Figura 26: Interface Gráfica – Partes.....	44
Figura 27: Posicionamento dos Ventiladores .....	45
Figura 28: Ventilador Adotado no Projeto .....	45
Figura 29: Fluxo de Ar pelo Automóvel .....	46
Figura 30: Sistema de Controle .....	47

Figura 31: Configuração da Malha de Controle .....	47
Figura 32: Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 9h00min .....	50
Figura 33: Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 11h00min .....	51
Figura 34: Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 13h00min .....	52
Figura 35: Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 15h00min .....	53
Figura 36: Variação da Temperatura no Interior do Automóvel .....	54
Figura 37: Temperatura nos Pontos 11, 16, 32 e 35. ....	55
Figura 38: Temperatura Média dos Sensores 11, 16, 32 e 35 .....	56
Figura 39: Variação da Temperatura Média .....	57
Figura 40: Parâmetros da Função Transferência .....	58
Figura 41: Parâmetros da Função Transferência para o Dia 24/01/2016 .....	59
Figura 42: Parâmetros da Função Transferência para o Dia 13/02/2016 .....	59
Figura 43: Parâmetros da Função Transferência para o Dia 15/02/2016 .....	60
Figura 44: Relação da Variação da Temperatura em Relação à Variação do Ângulo do Servo Motor .....	62
Figura 45: Malha Fechada de Simulação para o Sistema de Controle .....	63
Figura 46: Temperatura Interna do Automóvel em 17/03/2016.....	65
Figura 47: Temperatura Interna do Automóvel em 18/03/2016.....	65
Figura 48: Temperatura Interna do Automóvel em 19/03/2016.....	66
Figura 49: Sistema de Controle para Funcionamento com o Arduino .....	67
Figura 50: Variação da Temperatura Real e Simulada - Medida 1 .....	68
Figura 51: Variação da Temperatura Real e Simulada - Medida 2 .....	69
Figura 52: Variação da Temperatura Real e Simulada - Medida 3 .....	69
Figura 53: Variação da Temperatura Real e Simulada - Medida 4 .....	70
Figura 54: Comparação do Controlador Sintonizado com os Parâmetros Iniciais.....	71
Figura 55: Variação da Vazão com a Posição do Eixo do Controlador .....	72
Figura 56: Variação da Temperatura no Interior do Automóvel com Sistema de Controle.....	73
Figura 57: Variação da Posição do Eixo do Sistema de Controle .....	73
Figura 58: Variação da Vazão de Ar no Interior do Automóvel com Sistema de Controle.....	74
Figura 59: Temperatura de Desvio para o Controlador PI .....	76
Figura 60: Comparação entre Controlador PID e PI .....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros para a Função Transferência.....	60
Tabela 2: Relação da Variação do Ângulo do Servo Motor com a Variação da Temperatura	61
Tabela 3: Sintonia dos Parâmetros do Controlador <i>PID</i> .....	63
Tabela 4: Relação do Ângulo do Eixo do Servo Motor com a Vazão dos Ventiladores.....	71
Tabela 5: Sintonia dos Parâmetros do Controlador <i>PI</i> .....	75

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

PID	Controlador Proporcional, Integral e Derivativo
MATLAB	Matrix Laboratory
ISA	The Instrumentation, Systems and Automation Society
ISE	Integral Square Error
Mux	Multiplexador
GUI	Interface Gráfica do Usuário
GUIDE	Ambiente de Desenvolvimento da Interface Gráfica do Usuário

## LISTA DE SIMBOLOS

SP	Set Point ou Referência
S	Variável controlada ou Saída
E	Erro
$K_p$	Ganho da ação proporcional
$K_i$	Ganho da ação integral
$K_d$	Ganho da ação derivativa
t	Tempo
Pb	Banda Proporcional
$\tau_i$	Tempo do termo integral
$\tau_d$	Tempo do termo derivativo
s	Variável “s” no domínio de Laplace
$Y_{sp}$	Valor de Referência
Y	Valor de Saída

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	15
1.1 Objetivo .....	15
1.2 Justificativa .....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1 Temperatura Interna nos Automóveis e Seus Efeitos .....	16
2.2 Sistemas de Controle e Controladores .....	25
2.2.1 Ação Proporcional.....	26
2.2.2 Ação Integral .....	26
2.2.3 Ação Derivativa.....	26
2.2.4 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) .....	27
2.2.5 Sintonia do Controlador .....	28
2.2.6 Índice de Desempenho .....	28
2.3 Caixa de distribuição de ar de um veículo .....	29
2.4 Componentes eletrônicos .....	31
2.4.1 Arduino.....	31
2.4.2 Sensor de Temperatura LM 35 .....	33
2.4.3 Multiplexador .....	33
2.4.4 Micro Servo Motor.....	34
2.4.5 Dimmers .....	35
2.5 Matlab .....	36
2.5.1 Simulink .....	36
2.5.2 Interface Gráfica do Usuário- GUI.....	37
3 METODOLOGIA.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	49
4.1 PERFIL DE TEMPERATURA .....	49
4.2 IDENTIFICAÇÃO DO MODELO DO PROCESSO.....	55
4.3 AJUSTE DOS PARÂMETROS DE CONTROLE .....	61
4.4 CONTROLE EXPERIMENTAL DO SISTEMA.....	66
5 CONCLUSÃO.....	77

REFERÊNCIA .....	79
6 Apêndice.....	82
6.1 Apêndice A .....	82
6.2 Apêndice B .....	92
6.3 Apêndice C .....	100



## 1 INTRODUÇÃO

Os veículos automotores tornaram-se um artigo indispensável para o trabalho ou lazer em uma civilização desenvolvida industrialmente. Um item importante é o grau de conforto que o mesmo pode oferecer, sendo que um equipamento bastante requerido pelos usuários de automóveis é o sistema de ar condicionado para controle da temperatura interna, principalmente em países tropicais, onde no verão, ocorrem elevadas temperaturas. (HUANG *et al.*, 2006)

Porém, quando um carro é estacionado e exposto diretamente aos raios solares, isto pode trazer vários inconvenientes, como as elevadas temperaturas no interior do veículo que podem causar danos à saúde humana bem como afetar o nível de atenção na direção e mesmo que o ar condicionado seja ligado no instante que a pessoa entre no veículo, demorará algum tempo até a que a temperatura atinja valores confortáveis. (MEZRHAB; BOUZIDI, 2006) Além disso, quando o ar condicionado é ligado, como requer uma carga térmica maior para diminuir a temperatura, e como o motor ainda não está trabalhando em seu regime de trabalho ideal, acaba gerando um consumo adicional de combustível, além da elevação do efeito de abrasão (desgaste) do motor. (HUANG *et al.*, 2005)

Vários trabalhos nos últimos anos, como Huang *et al.*, 2005 e Saidur; Masjuki; Hasanuzzaman, 2009, estão se dedicando à pesquisa do conforto térmico na cabine dos automóveis e, pensando nesse fato, esse trabalho propõe a realização da análise e controle experimental da temperatura de um automóvel estacionado durante período de aquecimento por meio da circulação de ar externo pelo interior do veículo promovido por um exaustor, cuja vazão será ajustada por um controlador PID (proporcional, integral e derivativo) implementado via software, o MATLAB (Matrix Laboratory). O monitoramento da temperatura no interior do automóvel também será executado por componentes e circuitos eletrônicos, onde se destaca o Arduino.

### 1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é a construção de um sistema para aquisição de dados da temperatura interna de um veículo e de um sistema de ventilação que permita a diminuição da temperatura de seu interior, exposto ao sol enquanto estiver parado (estacionado). Utilizando um software disponível comercialmente, o Matlab<sup>®</sup>, pretende-se realizar o controle e o comando do sistema de aquisição de dados, funcionando em conjunto com uma placa de

circuito eletrônico, o Arduino. Também será realizado o processo de sintonia de um Controlador PID responsável pelo controle da velocidade dos ventiladores e monitoramento da variação de vazão de ar para o estabelecimento de uma temperatura constante no interior do automóvel.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Permitir que o sistema de ventilação, quando em funcionamento com o carro estacionado, diminua a temperatura interna no automóvel exposto ao sol promovendo um melhor conforto e mais segurança para a saúde humana com a aplicação do sistema. A diminuição de temperatura também poderá gerar um aumento da vida útil dos componentes internos dos veículos, principalmente os localizados no painel de instrumentos e também uma diminuição do consumo de combustível devido à diminuição da carga térmica do aparelho de ar condicionado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TEMPERATURA INTERNA NOS AUTOMÓVEIS E SEUS EFEITOS

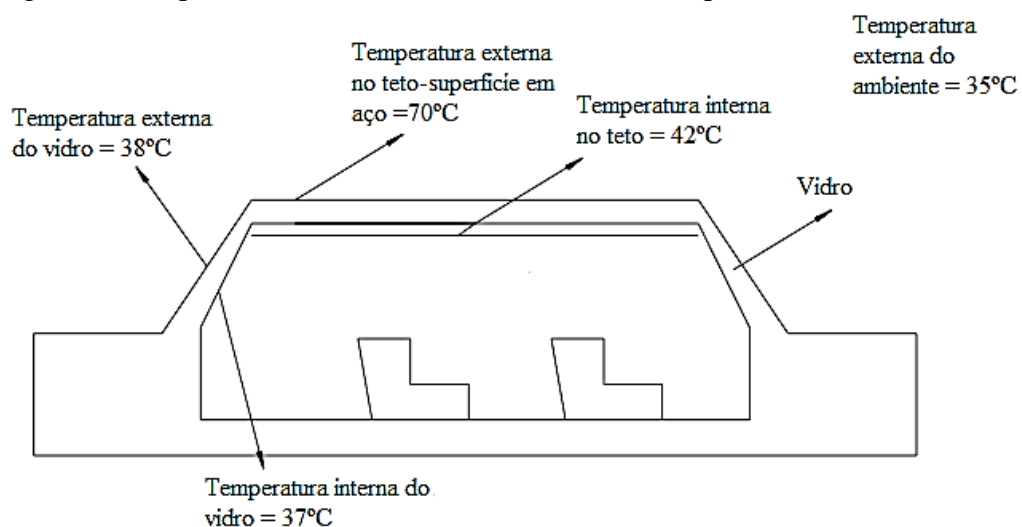
No Brasil, o número de automóveis passou de pouco mais de 24,5 milhões, em 2001, para 50,2 milhões em 2012, um crescimento de 104,5%, sendo que o crescimento populacional, entre os dois últimos Censos demográficos (2000 e 2010), foi de apenas 11,8%. Vale ressaltar ainda que, apenas em 2012, houve um acréscimo de 3,5 milhões de automóveis, cerca de 14,6 % do crescimento total de carros no período relacionado. (RODRIGUES, 2013)

Com uma frota de automóveis aumentando consideravelmente nos últimos anos, os espaços para estacionamento desses veículos se tornam cada vez mais escassos, e é frequente a parada em lugares ensolarados, com a luz solar incidindo diretamente sobre os veículos.

A temperatura interna do veículo é extremamente afetada pela condição climática externa do ambiente. Em países tropicais, principalmente no verão, um carro exposto por diversas horas à radiação solar, pode alcançar facilmente temperaturas na faixa dos 60°C, e mesmo em dias nublados, a temperatura interna pode atingir 55°C. (SAIDUR; MASJUKI; HASANUZZAMAN, 2009). A temperatura na superfície do painel de instrumentos na parte dianteira do veículo, quando a luz solar incide diretamente sobre o mesmo pode atingir aproximadamente 100°C. (MEZRHAB; BOUZIDI, 2006).

O ganho de calor no interior de um automóvel, e consequentemente, a elevação da temperatura, se deve à transferência de energia por três formas: condução, convecção e radiação. A condução está associada à transferência de energia principalmente através do teto do automóvel, fabricado em metal e plástico e combinado com isolante térmico. A transferência de calor por radiação ocorre principalmente pelas janelas do veículo, com a radiação solar passando através dos vidros e entrando no compartimento do carro. Já por convecção, a transferência de calor ocorre em sua grande parte, pela diferença de temperatura entre o ar interno com os vidros das janelas e com o teto do automóvel. (SAIDUR; MASJUKI; HASANUZZAMAN, 2009). Podemos observar na Figura 1 as temperaturas em algumas partes de um automóvel exposto ao sol com temperatura ambiente de 35°C. Podemos perceber que a superfície externa no teto possui a maior temperatura devido à exposição direta na luz solar. Este aquecimento é transferido através da condução para a superfície interna do teto e então para o ar interno por convecção. A temperatura no vidro é menor porque a radiação incidente atravessa o vidro e entra no compartimento do carro.

Figura 1: Temperatura das Partes de um Automóvel Exposto ao Sol



Fonte: SAIDUR, MASJUKI, & HASANUZZAMAN, 2009 - Modificada pelo Autor

Segundo relatado por Saidur, Masjuki e Hasanuzzaman (2009), quando um carro está exposto ao sol, cerca de 80% do aumento da temperatura ocorre nos primeiros 30 minutos, ou seja, poucos minutos de exposição já bastam para o conforto térmico no interior do veículo ser enormemente afetado.

O motorista ao entrar no veículo estacionado ao sol, experimenta uma grande variação de temperatura, afetando principalmente sua saúde. Se o automóvel possuir sistema de ar

condicionado, a condição climática no interior do veículo melhora, porém essa mudança demora algum tempo até se concretizar, aproximadamente, 10 minutos. Sem ar condicionado, se o ambiente externo permanecer quente, até mesmo uma ventilação com um fluxo forte não pode garantir a evacuação do excedente do calor acumulado. (MEZRHAB; BOUZIDI, 2006).

Além das pessoas não suportarem confortavelmente as altas temperaturas ao entrarem no veículo, componentes internos, como painel de instrumentos, bancos, acessórios plásticos, dentre outros itens, deterioram-se mais rapidamente quando expostos à altas temperaturas por longos períodos de tempo. Além disso, quando o ar condicionado é ligado para diminuir a temperatura, uma carga maior é exigida do motor, e como o mesmo ainda não está trabalhando em sua temperatura ideal de funcionamento, ocorre um aumento do consumo de combustível neste momento, além de um efeito maior de abrasão entre os componentes mecânicos do motor. (HUANG *et al.*, 2005).

Segundo um estudo nos Estados Unidos, que investigou a influência de 10 fatores principais na ocorrência dos acidentes de trânsito, a temperatura no interior de um automóvel é um importante fator, ocupando o terceiro lugar. (FARZANEH; TOOTOONCHI, 2008). De acordo com o mesmo trabalho, um melhor controle da temperatura em um automóvel promove um conforto térmico que resulta em um aumento da precaução do motorista e assim melhora a desempenho na direção e promove uma melhor segurança sob diversas condições de trânsito. A exposição ao calor excessivo causa elevação da temperatura do corpo humano e sonolência, podendo gerar riscos de acidentes. (GOMES, 2005)

Atualmente, existe um esforço mundial para alcançar uma melhor utilização da energia consumida pelos automóveis e uma performance mais eficiente. Por isso há uma demanda crescente na investigação e análise de sistemas e arquiteturas que visam melhorar o ambiente interno dos veículos, como por exemplo, a necessidade de reduzir a carga térmica que entra nos compartimentos dos passageiros tornou-se uma questão importante nos estágios iniciais de design do veículo, conseguindo assim um melhor conforto térmico e também redução substancial nos custos. O desenvolvimento de novos automóveis está orientado para um maior conforto, condições de luxo e economia de energia. (ZHANG *et al.*, 2009). Estima-se que nos Estados Unidos, aproximadamente 26 bilhões de litros de combustível são consumidos anualmente apenas para refrigeração do compartimento dos passageiros nos automóveis. (ALAHMER *et al.*, 2011).

O gerenciamento do consumo de energia em veículos modernos é um aspecto crucial, especialmente no caso de veículos elétricos e o ar condicionado constitui uma fonte de consumo considerável de energia. (MARCOS *et al.*, 2014)

Em veículos recém-manufaturados expostos à elevadas temperaturas, segundo Filho (2008), ainda podem ocorrer a liberação de várias substâncias, cerca de 46 compostos orgânicos voláteis, onde se destaca o formaldeído e o acetaldeído. A concentração de formaldeído até apresentou valores acima do limite de exposição sugeridos pelo Ministério da Saúde, Trabalho e Bem-estar do Japão, já que o Brasil ainda não possui legislação própria para o assunto, enquanto que as concentrações de acetaldeído ficaram bem próximas ao limite estabelecido oficialmente no Japão. Vale ressaltar que a pesquisa foi realizada com os automóveis estacionados expostos ao sol com temperatura externa de  $32\pm 3^{\circ}\text{C}$  e temperatura interna do veículo alcançando 58 à  $65^{\circ}\text{C}$ , no estado de São Paulo, na região no ABC e no campus da Universidade de São Paulo, Butantã, cidade de São Paulo. (FILHO, 2008).

A emissão destes compostos orgânicos voláteis se dá principalmente pela utilização de certos materiais na montagem interna dos veículos, como peças plásticas, feltros (isolante acústico), carpetes, adesivos e colas para fixação, borrachas e pinturas de acabamento, dentre outras. (FILHO, 2008).

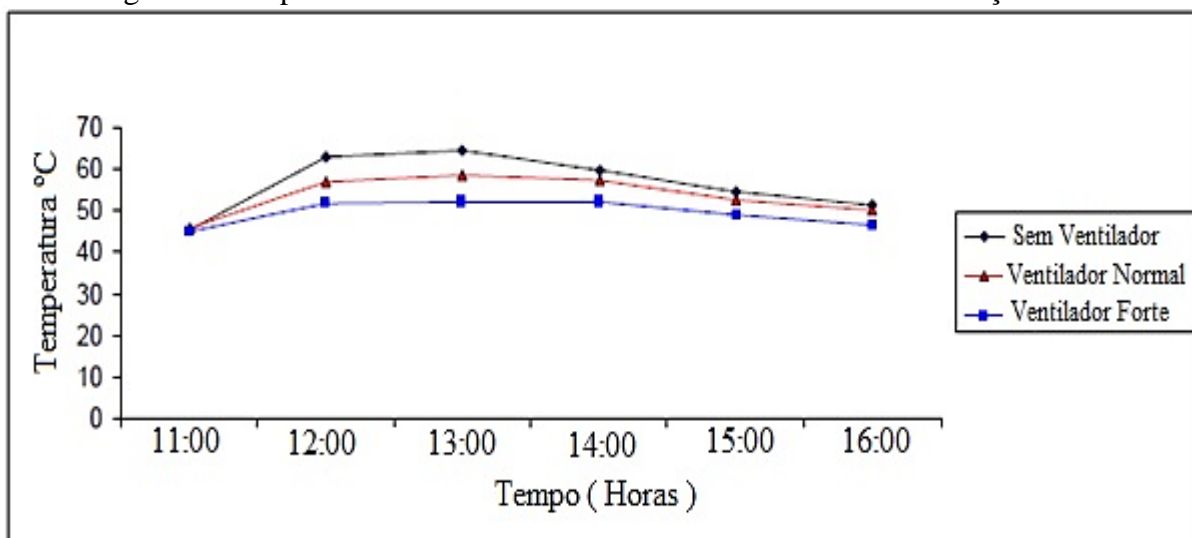
As principais substâncias liberadas nos carros recém-manufaturados, o formaldeído e o acetaldeído, são respectivamente, um agente carcinogênico (cancerígeno) e um agente teratogênico (capaz de produzir dano e malformações ao embrião ou feto durante a gravidez). Além disso, estes e os outros compostos orgânicos voláteis também podem causar irritação nos olhos e na mucosa do trato respiratório, dores de cabeça, náuseas, vômitos, alterações da pressão arterial, etc. (FILHO, 2008).

Uma das formas de reduzir a temperatura interna dos veículos e também retirar gases nocivos à saúde humana seria a construção de um sistema de ventilação que permitisse a retirada do ar quente gerado durante o período em que um automóvel permanece estacionado, ou seja, quando um veículo parado está exposto ao sol, a radiação solar e outras formas de transferência de calor fazem com que o ar no compartimento dos passageiros vá aquecendo até atingir altas temperaturas. Se houvesse uma renovação do ar no compartimento, o fluxo provido pelos ventiladores retiraria o ar quente interno do veículo ao mesmo tempo que admitiria ar externo na temperatura ambiente, reduzindo a temperatura no compartimento e consequentemente, diminuindo a carga térmica do ar condicionado, gerando economia de combustível. A forma de energia a ser utilizada para alimentação do sistema de ventilação poderia ser a energia solar, uma vez que, como o carro está exposto ao sol, essa energia seria de fácil obtenção através de um painel solar fotovoltaico, além de ser uma fonte limpa, sem poluentes.

A retirada de ar quente do interior de um veículo estacionado com o intuito de melhorar o conforto e diminuir o consumo de combustível devido às elevadas temperaturas, tem sido tema de vários trabalhos nos últimos anos, onde se destaca o de Saidur, Masjuki e Hasanuzzaman (2009).

Neste trabalho, os autores instalaram pequenos ventiladores no interior de um veículo (um Nissan da cor cinza) estacionado em um ambiente exposto à luz solar, para retirada do ar quente, e obtiveram resultados interessantes. A utilização de um sistema de ventilação operando com uma vazão de aproximadamente 9,44 L/s (Ventilador Normal) foi capaz de reduzir a temperatura interna de um automóvel no horário das 13h00min (horário com temperatura mais elevada) de 64,5°C para 58,5°C enquanto que um fluxo de 52,15 L/s (Ventilador Forte) reduziu a temperatura no interior de um carro para 52,1°C no mesmo horário conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2: Temperatura Interna do Automóvel com Sistema de Ventilação



Fonte: (SAIDUR, MASJUKI, & HASANUZZAMAN, 2009) - Modificada pelo Autor

O ventilador normal referido anteriormente é um modelo comercialmente vendido acionado por um pequeno painel solar como mostrado na Figura 3. A imagem no item a) indica a parte frontal com o rotor e as hélices do ventilador e o item b) mostra o painel solar na parte traseira do ventilador.

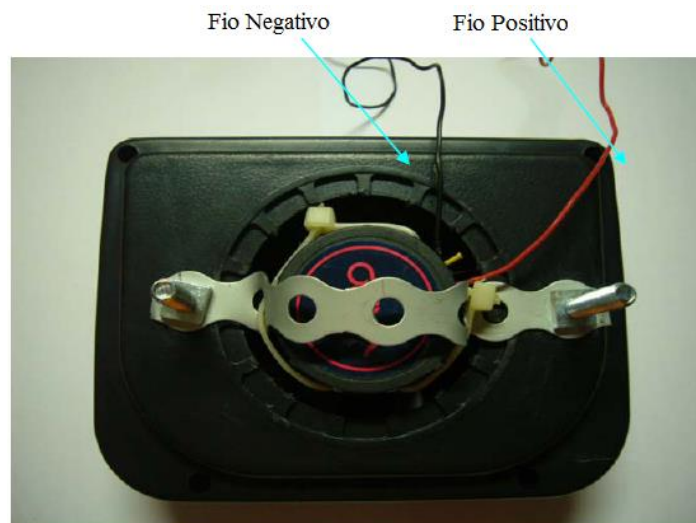
Figura 3: Ventilador Normal com Acionamento por Painel Solar



Fonte: (SAIDUR; MASJUKI; HASANUZZAMAN, 2009)

Já o ventilador forte, refere-se à uma modificação realizada pelos autores no ventilador normal (modelo vendido comercialmente) por meio da instalação de um motor e de hélices maiores a fim de promover um fluxo de ar mais elevado. A imagem do ventilador forte é mostrada na Figura 4. A alimentação deste ventilador foi realizada por um painel solar maior, separado do ventilador, mostrado na Figura 5 e colocado no teto do automóvel.

Figura 4: Ventilador Forte



Fonte: (SAIDUR; MASJUKI; HASANUZZAMAN, 2009) – Modificada pelo autor

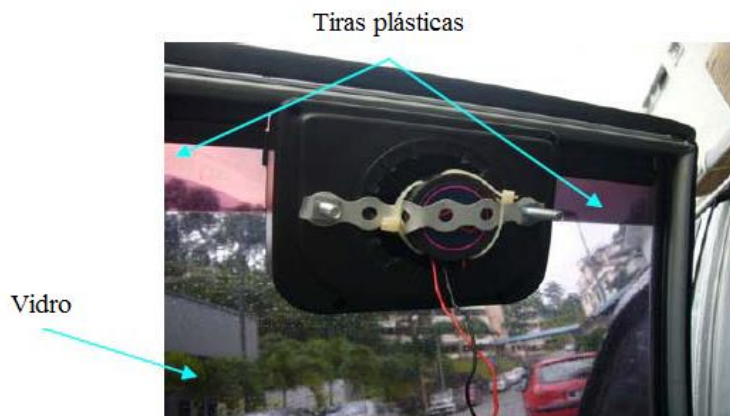
Figura 5: Painel Solar para Alimentação do Ventilador Forte



Fonte: (SAIDUR; MASJUKI; HASANUZZAMAN, 2009)

O tipo de ventilador vendido comercialmente e usado no trabalho de Saidur, Masjuki e Hasanuzzaman (2009) é um modelo que se encaixa entre a coluna metálica superior da porta e o vidro da janela, que deve permanecer um pouco aberto para permitir a fixação do ventilador, conforme mostrado na Figura 6. O espaço vazio entre o ventilador e a janela aberta é ocupado por tiras plásticas ou borracha para vedação.

Figura 6: Fixação do Ventilador na Janela Aberta do Carro

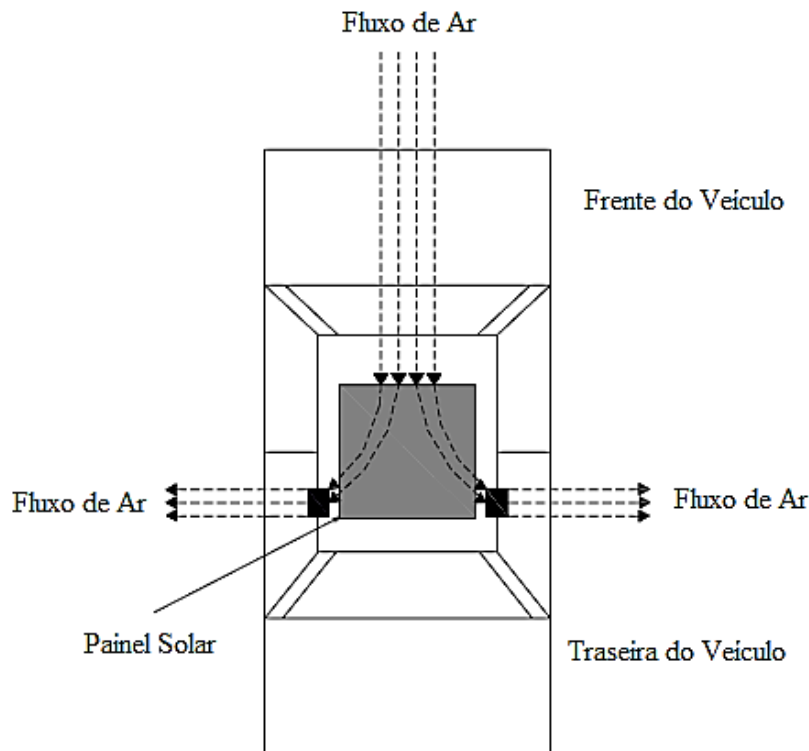


Fonte: (SAIDUR; MASJUKI; HASANUZZAMAN, 2009) - Modificada pelo Autor

Com o sistema de ventilação ligado, o ar externo com uma temperatura mais baixa é sugado para o interior do automóvel através das entradas de ar própria do veículo no painel frontal, e o ar interno com uma temperatura mais elevada, passa pelos ventiladores e sai, conforme mostrado na Figura 7, promovendo assim, a renovação de ar no ambiente e a diminuição da temperatura interna do carro. Vale ressaltar, que para o sistema de ventilação com fluxo de ar de 52,15 l/s, foram utilizados dois ventiladores fortes.



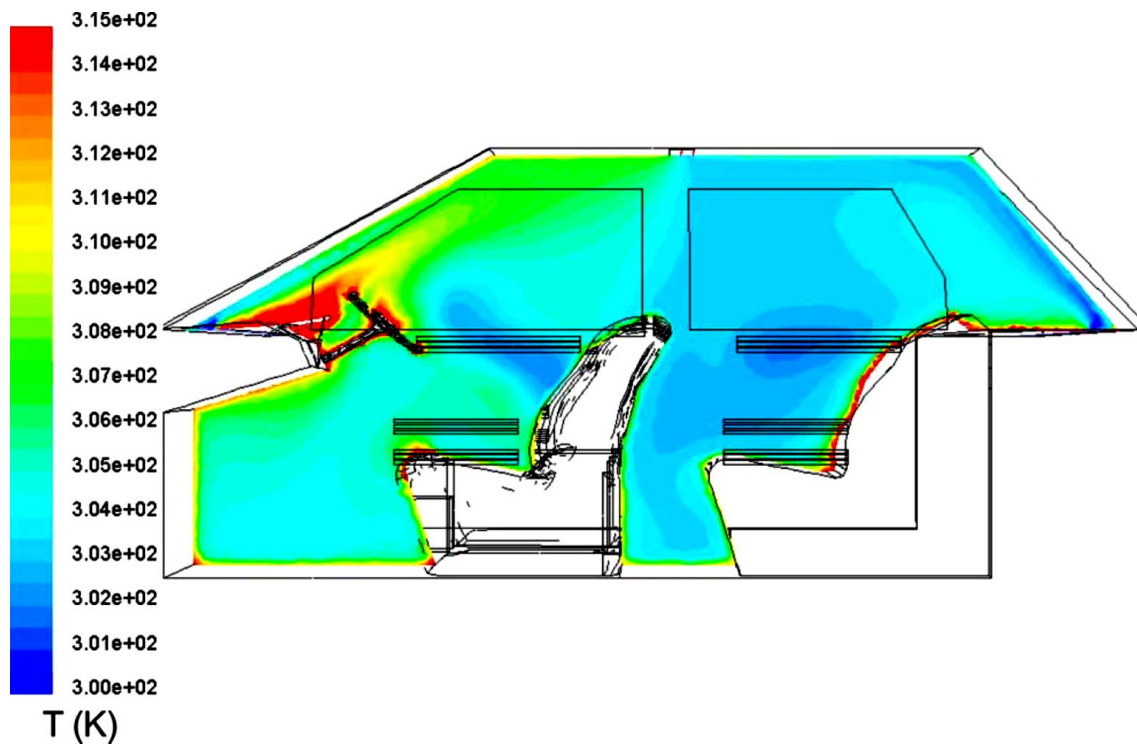
Figura 7: Fluxo de Ar no Interior do Automóvel



Fonte: (SAIDUR, MASJUKI, & HASANUZZAMAN, 2009) - Modificada pelo Autor

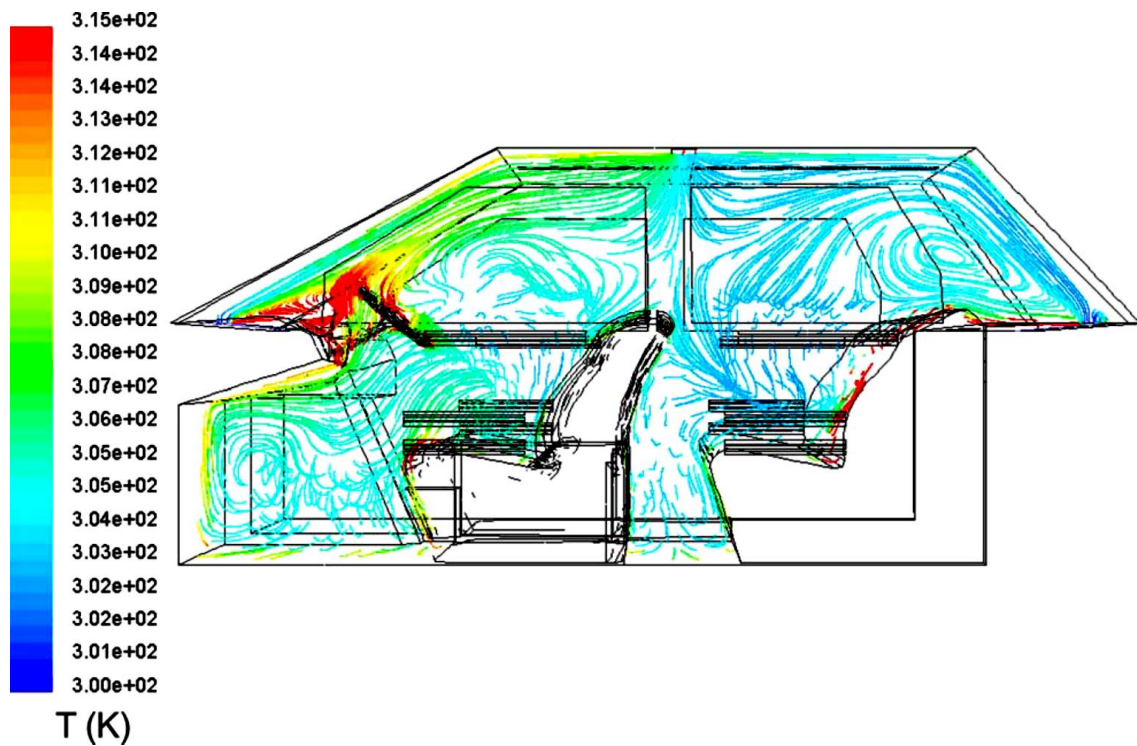
No trabalho de Huang *et al.* (2005), por meio da simulação das condições de um veículo estacionado à céu aberto em um dia ensolarado, a análise de um fluxo de ar levando ar externo para o ambiente interno do veículo com o intuito de diminuir a temperatura, mostrou que a uma melhor condição para a entrada de ar em um automóvel, seria no painel frontal próximo ao volante, isso porque, esta área é a que concentra as temperaturas mais elevadas. Assim, a entrada de ar neste local, removeria o ar quente rapidamente. Neste trabalho, os autores consideraram também entradas de ar nas laterais e junto ao painel traseiro (acima do porta-malas) do veículo, e a saída de ar no teto, na parte central do veículo. A simulação da distribuição de temperatura em uma seção central de um automóvel é mostrada na Figura 8. As áreas com cor azul escuro representam temperaturas próximas de 300K (27°C), que seria também a temperatura do ar externo. As áreas em vermelho escuro representam temperaturas mais elevadas, na ordem de 315K (42°C). O gradiente de temperatura entre 300 e 315K, é representado em escala através do gradiente de cores entre o azul escuro e o vermelho escuro. A simulação do diagrama das linhas do fluxo de ar no interior no veículo é representada na Figura 9. O diagrama de temperaturas e cores é o mesmo apresentado na Figura 8.

Figura 8: Distribuição de Temperatura na Seção Central



Fonte: (HUANG *et al.*, 2005)

Figura 9: Diagrama das Linhas do Fluxo de Ar na Seção Central do Veículo



Fonte: (HUANG *et al.*, 2005)

A simulação foi realizada no software FLUENT e considerou a incidência dos raios solares diretamente sobre o para-brisa dianteiro do veículo. Os autores também citam que a alimentação do sistema de ventilação poderá ser feita através da energia solar utilizando painéis solares com células fotovoltaicas.

Na conclusão do artigo, Saidur, Masjuki e Hasanuzzaman (2009), cita que a elevação do fluxo de ar de 9,44 l/s (Ventilador Normal) para 52,15 l/s (Ventilador Forte) foi capaz de reduzir a temperatura de pico do interior do automóvel em cerca de 11%, e também que um resultado melhor poderia ser obtido se o fluxo de ar fosse elevado, podendo reduzir ainda mais a temperatura interna. Esta hipótese será testada no experimento deste trabalho, uma vez que será adotado um sistema de ventilação capaz de exercer um fluxo maior que os 52,15 l/s.

## 2.2 SISTEMAS DE CONTROLE E CONTROLADORES

Os sistemas de controle possuem alguns componentes e definições básicas:

- a. Processo ou Planta: combinação de componentes que atuam em conjunto para realizar uma determinada operação ou processo;
- b. Referência ou Entrada (*Set Point-SP*): é o valor da variável de entrada à qual se deseja obter ou manter no processo;
- c. Variável Controlada ou Saída (S): é a grandeza do processo ou sistema à qual é controlada;
- d. Variável Manipulada: é a informação geralmente processada pelo controlador com o objetivo de alterar a grandeza de saída de um sistema;
- e. Transdutor: equipamento ou instrumento responsável pela medição da informação da grandeza a ser controlada de um processo;
- f. Controlador: equipamento e/ou mecanismo que faz o processamento de informações pertinentes às grandezas de um sistema e realiza ações de controle com determinadas características;
- g. Erro(E): diferença entre as grandezas de entrada e saída de um processo com sistema de controle.

Um controlador que tem sido muito utilizado nas indústrias ao longo dos últimos anos e apresentado um bom desempenho é o Controlador *PID*. A sigla *PID* refere-se às três ações que esse controlador é capaz de exercer: Proporcional, Integral e Derivativo, podendo

assegurar um controle estável e preciso do processo. (GOMES, 2008). Cada ação determina uma característica ao processo de controle.

### 2.2.1 Ação Proporcional

Neste tipo de ação, a correção a ser feita pelo controlador age proporcionalmente entre a diferença da entrada com a saída do sistema.

A equação 1 representa a ação de controle proporcional, em que o valor da variável de saída (S) em determinado tempo (t) é igual ao produto do ganho proporcional ( $k_p$ ) pelo erro (E) do sistema no tempo t analisado.

$$S(t) = k_p \cdot E(t) \quad (1)$$

### 2.2.2 Ação Integral

A ação integral é proporcional à amplitude e duração do erro, ou seja, é proporcional à integral do erro do sistema (GOMES, 2008). A variável de saída do controlador com ação proporcional e integral pode ser expressa pela equação (2):

$$S(t) = k_p \cdot \left[ E(t) + k_i \int E(t) dt \right] \quad (2)$$

em que  $K_i$  representa o ganho referente à parcela integral do controlador.

### 2.2.3 Ação Derivativa

Sua função é agir proporcionalmente à taxa de variação do erro do sistema (derivada do erro). A equação que descreve o valor da saída em um controlador com ação proporcional e derivativa, é mostrada na equação (3):

$$S(t) = k_p \cdot \left[ E(t) + k_d \frac{d E(t)}{dt} \right] \quad (3)$$

em que  $K_d$  representa o ganho referente a ação derivativa do controlador .

### 2.2.4 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Segundo Dennis Bernstein, editor chefe da Revista IEEE Control Systems Magazine, “O Controlador PID é uma das poucas ideias que as pessoas recordam de um curso de controle e este tipo de controlador é muito utilizado na indústria. De fato, o Controlador PID, é um dos que possuem forte relação entre o campo de pesquisas acadêmicas e o uso industrial.” (BERNSTEIN, 2006).

O controlador PID possui uma padronização definida pela ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society ) que fornecem as equações que modelam o seu funcionamento. (CERCHIARO, 2006) .O modelo do controlador PID pode ser descrito pela equação (4), que nada mais é que a soma das ações de controle proporcional, integral e derivativa realizadas ao mesmo tempo:

$$S(t) = k_p \cdot \left[ E(t) + k_i \int E(t) dt + k_d \frac{d E(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

Os parâmetros livres para a determinação do controlador são  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , sendo que:

$$k_i = \frac{K_p}{\tau_i} \quad (5)$$

$$k_d = K_p \tau_d \quad (6)$$

em que  $\tau_i$  é o tempo do termo integral em segundos e  $\tau_d$  é o tempo do termo derivativo em segundos.

Em termos da Transformada de Laplace, temos que a equação do controlador PID é dada pela equação (7). (OGUNNAIKE; RAY, 1994)

$$c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) E(s) \quad (7)$$

em que  $E(s)$  é a transformada de Laplace do sinal de erro do controlador e  $c(s)$  é a transformada de Laplace do sinal de saída do controlador.

A função transferência para o controlador PID é então dada por:

$$g_c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (8)$$

em que  $g_c(s)$  representa o ganho da variável do processo. (OGUNNAIKE; RAY, 1994)

### 2.2.5 Sintonia do Controlador

O grande empecilho no uso dos Controladores  $P$ ,  $PI$ ,  $PD$  e  $PID$  é o ajuste apropriado dos parâmetros  $K_p$ ,  $\tau_i$  e  $\tau_d$  necessários para se produzir uma resposta adequada da variável controlada que atenda aos objetivos do controle. Este processo, denominado de Sintonia do Controlador, pode ser realizado de várias formas onde se destaca o manual por meio de gráficos da resposta do processo, como exposto por Ziegler e Nichols (1942), que se baseou na determinação de características dinâmicas de diversos processos indústrias que culminaram nas definições dos ganhos dos controladores. Também existem vários estudos e métodos desenvolvidos que buscam alcançar regras de sintonia generalizadas para diversos tipos de processos, como Åström e Hägglund (1995) e Åström e Hägglund (2004). Outro método desenvolvido é o de Cohen e Coon (1953), denominado de método da curva de reação do processo. Uma outra forma muito comum de sintonia é ligar o controlador no modo manual e ir ajustando os parâmetros na medida em que o valor da variável de saída vai se aproximando do valor desejado, porém esta técnica requer muita experiência do operador e demanda muito tempo para o ajuste preciso dos ganhos. (THIMOTIO, 2005) . (FERMINO, 2014). Outro método é utilizar métodos de minimização da resposta erro, como Conceição (2007), assim obtendo os parâmetros desejados.

### 2.2.6 Índice de Desempenho

O Índice de Desempenho pode ser definido como um número que indica a qualidade do desempenho do sistema de controle em relação à sintonia ótima dos parâmetros do controlador PID. (CONCEIÇÃO, 2007). Conforme Thimotio, 2005, “Definido um índice de desempenho para o sistema a ser controlado, determinar o ganho do controlador  $PID$  de maneira que, dentro do intervalo de tempo especificado, a resposta do sistema de controle composto pelo processo e o controlador minimize o índice...”.

Então, se escolhido um critério de erro como um índice de desempenho, este seria um número que indica a qualidade do desempenho do sistema onde o sistema de controle é

declarado ótimo se os valores dos parâmetros do controlador são escolhidos de forma a minimizar o índice.

O Critério *ISE* (*Integral Square Error* - Integral do Erro Quadrático) é frequentemente utilizado devido à facilidade de ser computado tanto analiticamente quanto experimentalmente. (FERMINO, 2014). O critério ISE é definido matematicamente pela equação (9):

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (9)$$

$$e(t) = Y_{SP}(t) - Y(t) \quad (10)$$

em que  $Y_{SP}(t)$  é o Set Point ou valor de referência e  $Y(t)$  é o valor da saída.

O limite superior  $\infty$  pode ser substituído pelo tempo  $T$ , que é escolhido grande o suficiente para que  $e(t)$  seja desprezível para  $T > t$ . Este índice de desempenho pode ser usado tanto para entradas determinísticas (como entrada em degrau) quanto para entradas aleatórias. O *ISE* sofre variação conforme os parâmetros selecionados para o controlador PID, logo, para minimizar o *ISE*, será necessário modificar os parâmetros.

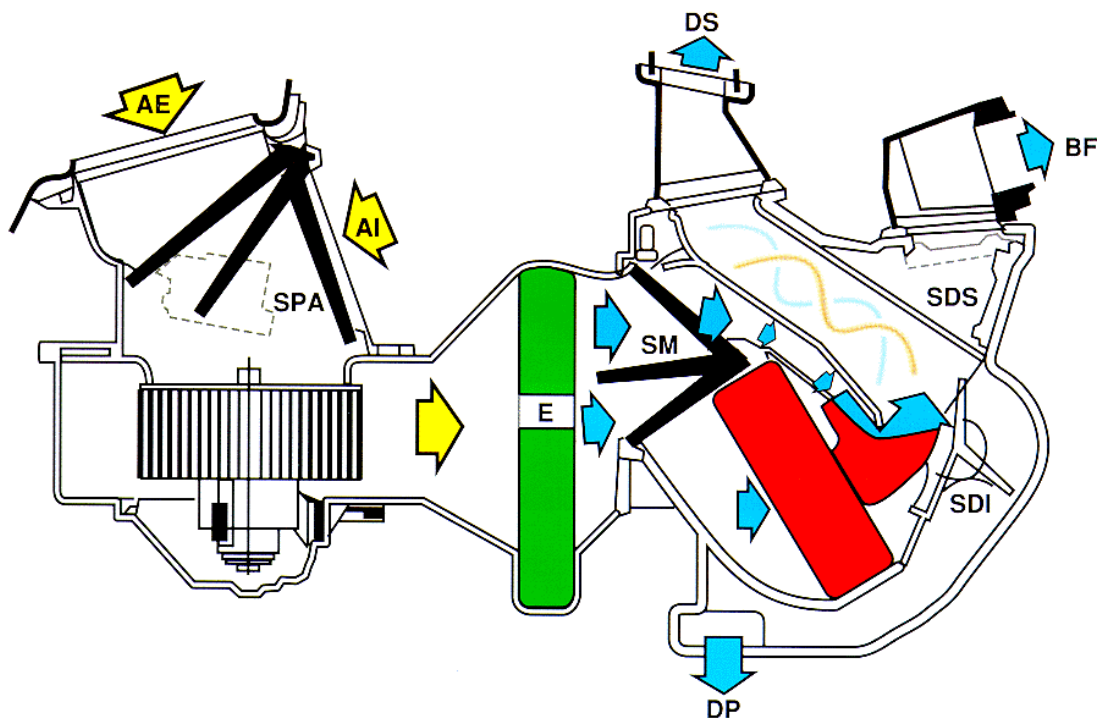
O controlador e o sistema de controle serão utilizados para conseguir o ajuste da vazão de ar que passa pelo automóvel promovendo a diminuição da temperatura interna do mesmo com o mínimo de potência elétrica fornecida aos ventiladores, ou seja, conseguir com o mínimo de vazão de ar, a máxima diminuição de temperatura possível.

### 2.3 CAIXA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR DE UM VEÍCULO

A caixa de distribuição de ar de um veículo consiste em um dispositivo dotado de dutos e compartimentos, onde um fluxo de ar antes de ser transferido para o compartimento dos passageiros tem sua configuração ajustada conforme o desejo do condutor do veículo. Dessa forma, a fim de possibilitar certo tipo de ventilação, a caixa de ar possui inúmeras saídas de ar que devem prover uma circulação geral ou específica sobre os passageiros do veículo. Os sistemas de ventilação operam de dois modos: recirculação ou ventilação. Operando no modo recirculação, o ar interno proveniente da recirculação do ar do compartimento é combinado com o ar externo. Operando no modo ventilação, o ar externo proveniente de captação externa é forçado a passar por um filtro, é refrigerado e então entra

no compartimento dos passageiros. A Figura 10 apresenta a caixa de distribuição de ar em corte com os possíveis escoamentos, onde AE – Ar externo do compartimento, AI – Ar interno do compartimento, SPA – Palheta de seleção, E – Elemento filtrante, SM – Seleção máximo frio / quente, DP – Distribuição pés, SDI – Seleção de distribuição inferior, DS – Distribuição superior, SDS – Seleção de distribuição superior, BF – Boqueta frontal. (PEREIRA; LOURENÇO; PEREIRA, 2010)

Figura 10: Caixa de Distribuição de Ar



Fonte: (PEREIRA; LOURENÇO; PEREIRA, 2010)

Na Figura 11 é mostrado o painel de comando da caixa de distribuição de ar de um veículo Chevrolet modelo Celta ano 2001.

O elemento filtrante, responsável por impedir que as impurezas entrem no interior do veículo, é formado por três camadas de fibra ligadas entre si, além de uma camada intermediária carregada eletrostaticamente, fazendo até mesmo que partículas minúsculas sejam atraídas pelas fibras, que as retém mantendo o ar dentro da cabine limpo e sem impurezas. O filtro acaba gerando uma perda de carga, fazendo com que uma considerável pressão seja exercida pelo ar apenas para entrar no interior do veículo. Essa perda de carga varia conforme a vazão de ar e também conforme o estado do filtro (novo ou usado). (PEREIRA; LOURENÇO; PEREIRA, 2010)



Figura 11: Painel de Comando da Caixa de Distribuição de Ar



Fonte: Autor

A caixa de distribuição de ar do automóvel representa uma possibilidade para entrada do ar externo para o interior do veículo.

## 2.4 COMPONENTES ELETRÔNICOS

Serão adotados neste projeto alguns componentes eletrônicos para aquisição de dados e realização do controle do processo. Os principais são mostrados a seguir.

### 2.4.1 Arduino

A automação industrial passou por inúmeras transformações ao longo dos últimos anos e houve um avanço considerável. Neste cenário, destaca-se o uso dos chamados microcontroladores, que podem ser definidos como um sistema de circuitos integrados, encapsulado em um único *chip*, com memória, “*clock*” e periféricos mais limitados do que um computador. (GOMES; TAVARES, 2013). Dentre as plataformas de desenvolvimento que utilizam microcontroladores, o Arduino tem ganhado um grande destaque.

O Arduino é uma plataforma de computação física de fonte aberta, com base em uma placa simples de entrada/saídas (input/output ou I/O) baseada em hardwares e softwares flexíveis e de fácil utilização, além de possuir um baixo custo. Outro ponto importante está na

substituição do microcontrolador queimado, que a baixos custos, possíveis erros acarretarão pequenos prejuízos. (BANZI, 2011) . Ele foi criado em 2005, na cidade de Ivrea, na Itália, por Massimo Banzi, com intuito de ensinar a disciplina Design de Interação, que segundo o criador, “... é uma disciplina de design que coloca a prototipagem no centro de sua metodologia”. Atualmente existem vários tipos e modelos de Arduino. Na Figura 12 é mostrado um Arduino Mega, uma placa desenvolvida para projetos mais complexos, por ter um maior número de entradas e saídas para sensores e atuadores.

Figura 12: Arduino Mega



Fonte: (ARDUINO, 2016)

Apesar da criação recente, o Arduino já vem sendo utilizado em muitas Universidades e Centros de pesquisas, em experiências de laboratório, como sistema de aquisição de dados, sistemas de controles automáticos e robótica. Candelas *et al.* (2015), obteve êxito utilizando o Arduino em várias experiências, como um controle de temperatura utilizando controladores PID para uma impressora 3D, automação de um Robô cartesiano, Programação de um Robô Humanoide e várias outras atividades envolvendo automação e robótica. O Arduino também tem sido empregado com êxito, em microestações de pesquisa para obter informações de temperatura, umidade do ar e pressão em áreas de interesses de pesquisadores, geralmente em áreas de floresta, do Experimento de Grande Escala da Biosfera – Atmosfera na Amazônia (LBA) que é um programa de cooperação científica internacional liderado pelo Brasil que tem

estudado as mudanças climáticas e ambientais na Amazônia. (MOREIRA; PORTELA; SILVA, 2012).

#### 2.4.2 Sensor de Temperatura LM 35

O LM 35 é um sensor de temperatura de baixa voltagem, ou seja, ele gera uma voltagem baixa, que é linearmente proporcional à temperatura em graus Celsius. Para este sensor, o fator de escala de saída é de  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ . Não requer uma calibração externa, sendo que possui uma precisão de  $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$  à temperatura ambiente ( $25^{\circ}\text{C}$ ) e  $\pm 0,75^{\circ}\text{C}$  para o intervalo completo de medição, entre  $-55^{\circ}\text{C}$  até  $150^{\circ}\text{C}$ . (INSTRUMENTS, 2016). A Figura 13 mostra o sensor de temperatura LM 35.

Figura 13: Sensor de Temperatura LM 35

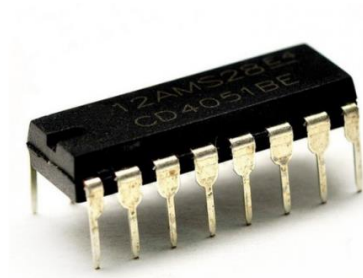


Fonte: (ELETROGATE, 2016)

#### 2.4.3 Multiplexador

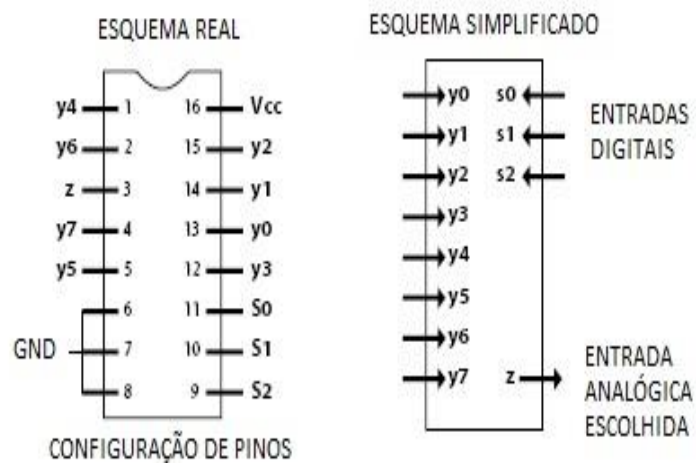
O Multiplexador ou Mux é um circuito combinacional dedicado com a finalidade de selecionar, por meio de variáveis de seleção, uma de suas entradas, conectando-a eletronicamente à uma única saída. A cada instante de tempo, o valor da saída é igual ao valor de uma das entradas, conforme determinado por um conjunto de linhas de controle. (WEBER, 2012). A Figura 14 mostra um tipo de Multiplexador, o CD4051 e a Figura 15 sua configuração de pinos. Com três variáveis de seleção ( $S_0$ ,  $S_1$  e  $S_2$ ), que pode ser codificado de oito modos diferentes (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111), ele comunica oito canais de entrada, ( $y_0, y_1, \dots, y_8$ ) à uma única saída ( $z$ ).

Figura 14: Multiplexador CD4051



Fonte: (ELETRÔNICA, 2016)

Figura 15: Configuração de Pinos - Multiplexador



Fonte: (ARDUINO, 2016) – Modificado pelo Autor

Os multiplexadores são importantes, uma vez que neste projeto, são utilizados 40 sensores de temperatura, um número que ultrapassa as entradas de sensores presentes no microprocessador Arduino.

#### 2.4.4 Micro Servo Motor

O Micro Servomotor é um equipamento que possui um sistema de engrenagens acoplado a um eixo que pode ser controlado precisamente. O eixo pode ser posicionado em vários ângulos, geralmente entre 0 e 180°. São pequenos e leves e possuem alto torque de saída. (ARDUINO, 2016). Na Figura 16 é mostrado um Micro Servo Motor e, ao lado, suas dimensões em milímetros.

Figura 16: Micro Servo Motor



Fonte: (MICROPIK, 2016)

O servo motor é usado neste projeto com o intuito de variar o controlador de potência do exaustor usado para remover o ar quente de dentro do veículo estacionado.

#### 2.4.5 Dimmers

Os “*Dimmers*” são controladores de potência que permitem, através de uma regulação, controlar cargas elétricas, como o uso para controlar o brilho de lâmpadas, velocidade de motores e a potência de chuveiros. (BRAGA, 2014). Na Figura 17 é apresentado um *Dimmer* utilizado neste projeto.

Figura 17: Dimmer - Controlador de Potência



Fonte: (ADVANCEDG-12, 2016)

## 2.5 MATLAB

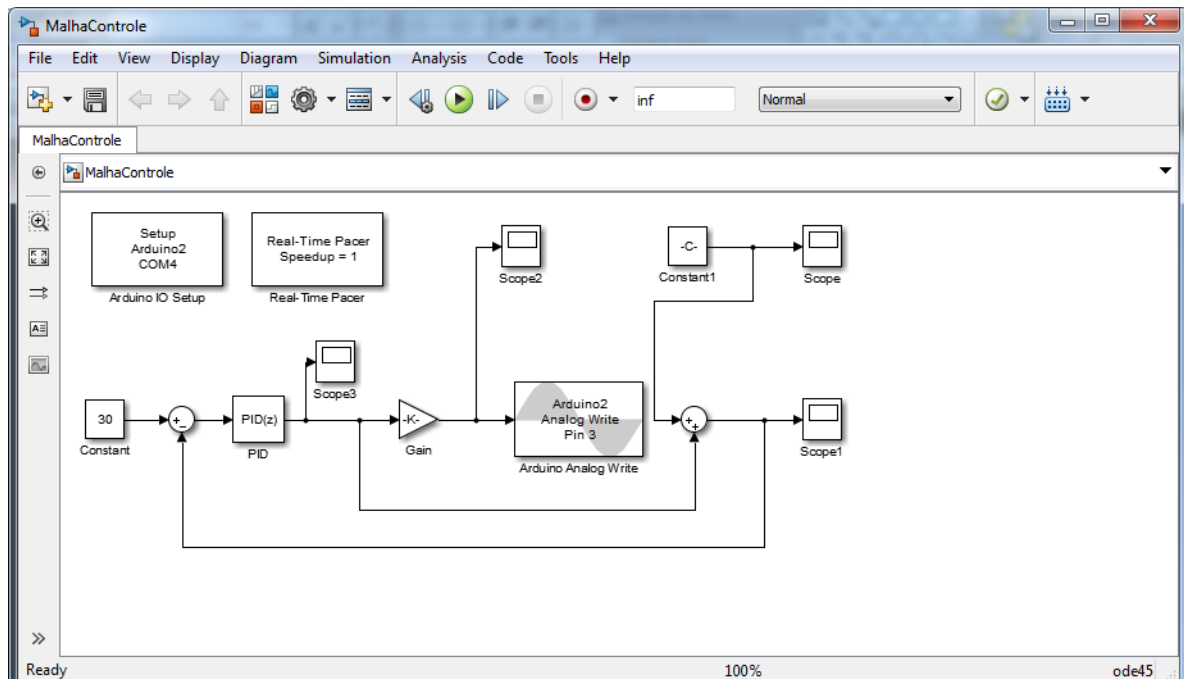
O Matlab<sup>®</sup> (Matrix Laboratory –Laboratório de Matrizes) é um programa interativo para a realização de cálculos numéricos e gráficos, dentre outras ferramentas, visando a otimização para executar tais tarefas. Foi criado no fim dos anos 1970 por Cleve Moler, então presidente do departamento de ciências da computação da Universidade do Novo México. Embora tenha nascido para realizar operações matemáticas com matrizes, daí o seu nome, transformou-se em um sistema computacional bastante útil e flexível, que logo se espalhou para outras universidades e encontrou um forte uso no âmbito da comunidade de matemática aplicada, e com o seu desenvolvimento, já possui muitas funções especializadas internamente implementadas, permitindo a criação e manipulação de gráficos e conteúdos científicos facilmente. (CHAPMAN, 2003)

O software Matlab possui a função *fminsearch*, que é parte do pacote *Optimization Toolbox*, que é um método de otimização que encontra o valor mínimo de uma função escalar de várias variáveis a partir de uma estimativa inicial. (FERMINO, 2014). Esta função será utilizada no projeto para determinação do índice de desempenho de erro.

### 2.5.1 Simulink

O ambiente Simulink é uma extensão do software Matlab<sup>®</sup> e é utilizado para simulação de vários domínios e modelos através da construção de diagrama de blocos. O mesmo suporta simulações e testes contínuos para verificação de códigos e sistemas embarcados. O Simulink pode ser tratado como um editor gráfico, com bibliotecas de blocos personalizáveis para realizar a modelagem e simulação de sistemas dinâmicos. Uma vez integrado ao Matlab<sup>®</sup>, permite a incorporação de algoritmos para realização de análises e exportação de resultados para uma posterior análise. (MATHWORKS, 2016). A Figura 18 representa um diagrama de blocos construído no ambiente Simulink.

Figura 18: Diagrama de Blocos no Simulink



Fonte: Autor

### 2.5.2 Interface Gráfica do Usuário- GUI

A Interface Gráfica do Usuário é uma ferramenta interessante oferecida pelo software Matlab<sup>®</sup> para criação de um ambiente personalizado que geralmente contém controles, como menus, barras de ferramentas, botões e controles deslizantes, permitindo o controle de aplicativos de softwares com maior facilidade, uma vez que substitui a digitação de comandos e sequencias de rotinas por um simples clique em um determinado botão ou comando. (MATHWORKS, 2016).

As GUIs, são construídas por meio da GUIDE- Ambiente de Desenvolvimento da Interface Gráfica do Usuário, que contém as ferramentas para desenho gráfico das telas e gráficos.

Um exemplo de Interface Gráfica do Usuário – GUI é mostrado na Figura 19.



Figura 19: Interface Gráfica do Usuário – GUI



Fonte: Autor

O Matlab<sup>®</sup> em conjunto com as suas extensões e ferramentas irão permitir o funcionamento e realização do controle de alguns componentes eletrônicos além de otimizar a obtenção e interpretação de alguns resultados.

### 3 METODOLOGIA

As construções e instalações para a execução do trabalho foi baseada no seguinte roteiro de atividades:

- 1) Foi elaborado um sistema para aquisição de dados, que mostrasse o perfil da variação da temperatura em diversos pontos do interior do carro estacionado durante um período de aquecimento, ou seja, durante um período exposto diretamente aos raios solares. Para isto foi realizado o desenvolvimento, fabricação e aquisição dos componentes eletrônicos para o sistema de aquisição de dados, juntamente com a interface gráfica do usuário no software Matlab<sup>®</sup> e a programação computacional.
- 2) Elaborou-se um sistema de ventilação capaz de retirar o ar quente do interior do veículo, proporcionando a diminuição de temperatura.



3) Foi definido o sistema de controle, os seus componentes e a sua construção.

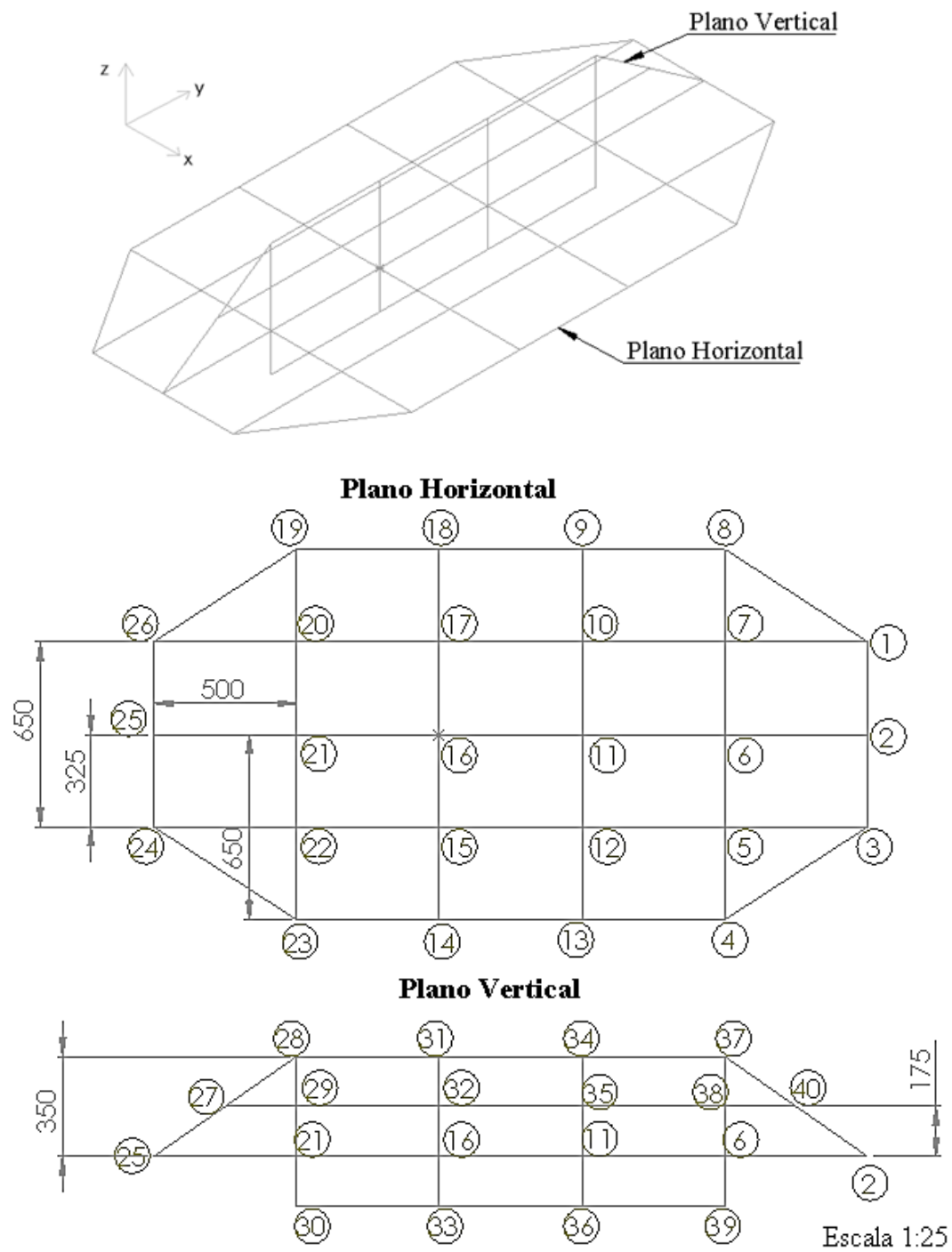
Em relação ao controlador, foram definidas as características técnicas necessárias para sua construção baseada em modelos encontrados comercialmente ou que pudessem ser montados com certa facilidade.

O veículo escolhido foi o modelo Celta, ano 2001, na cor preta e foi estacionado ao ar livre na cidade de Umuarama, estado do Paraná, durante o período de 01 de Dezembro de 2015 à 15 de Maio de 2016 , entre as 9h00min e 18h00min, horário de incidência dos raios solares sobre o veículo, para coleta de dados e implementação do sistema de controle.

Para o sistema de aquisição de dados, primeiramente foram definidos os pontos para a colocação dos sensores de temperatura no interior do veículo. Os pontos para medição de temperatura foram organizados seguindo a orientação de dois planos: um horizontal e um vertical, conforme mostrado na Figura 20. As dimensões estão em milímetros. No total foram definidos 40 pontos (sensores) para coleta dos valores da temperatura cuja posição esta definida pelos círculos com os números em seu interior. Cada número representa um sensor. Os sensores 1, 2 e 3 foram colocados próximo ao painel dianteiro do veículo, ao passo que os sensores 24, 25 e 26 estão na parte traseira. Os sensores 4, 13, 14 e 23 estão na lateral esquerda do automóvel enquanto que os sensores 8, 9, 18 e 19 estão na lateral direita.

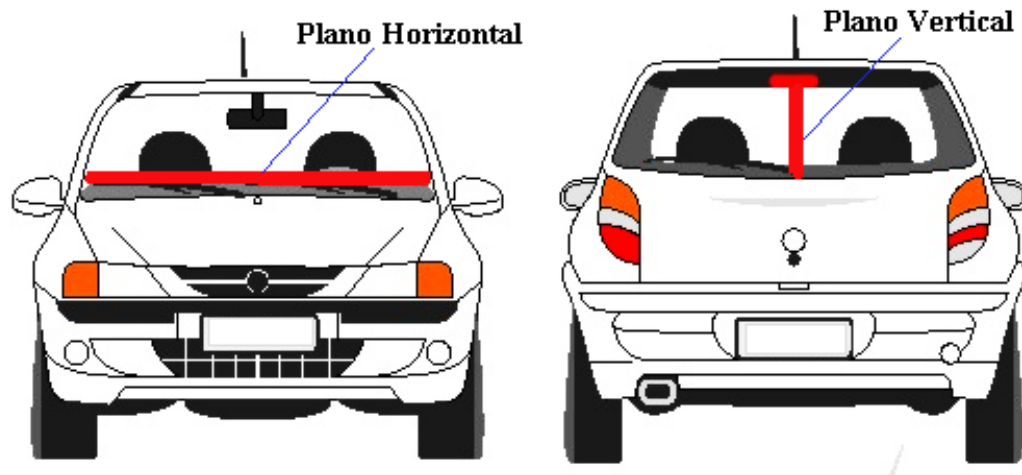
O plano horizontal foi arranjado de modo que pudesse ser fixado sobre o painel de instrumentos do automóvel e o tampão do porta-malas traseiro. Já o plano vertical foi organizado de modo a ser colocado no meio do veículo, entre os dois bancos dianteiros. O esquema de montagem dos planos está mostrado na Figura 21.

Figura 20: Localização dos Pontos para Medição da Temperatura



Fonte: Autor

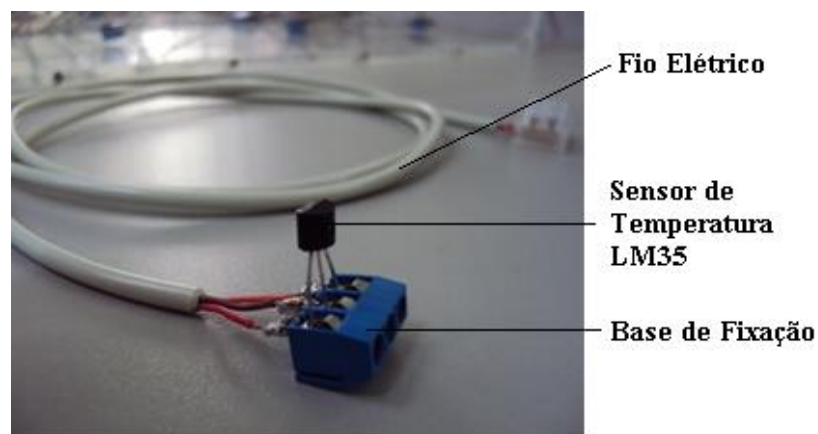
Figura 21: Esquema de Montagem dos Planos



Fonte: (GIGACURSOS, 2014) - Modificado pelo Autor

Após a definição dos pontos de medição, foram montadas as bases de fixação dos sensores de temperatura LM35 juntamente com os fios de ligação, conforme é mostrado na Figura 22.

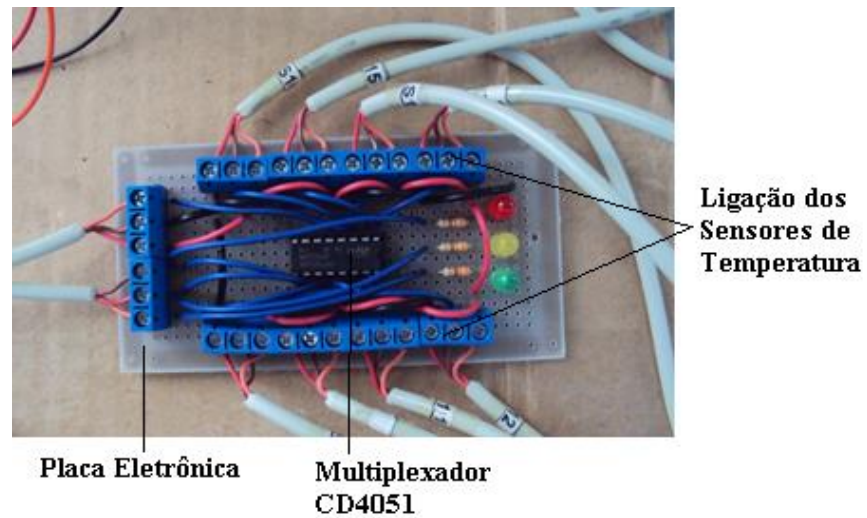
Figura 22: Base de Fixação dos Sensores de Temperatura LM35



Fonte: Autor

Os sensores de temperatura foram ligados a uma placa eletrônica para conexão ao multiplexador CD4051. No total foram utilizados 5 (cinco) multiplexadores, cada um com 8 (oito) sensores de temperatura. Na Figura 23 é mostrada a placa eletrônica com o multiplexador.

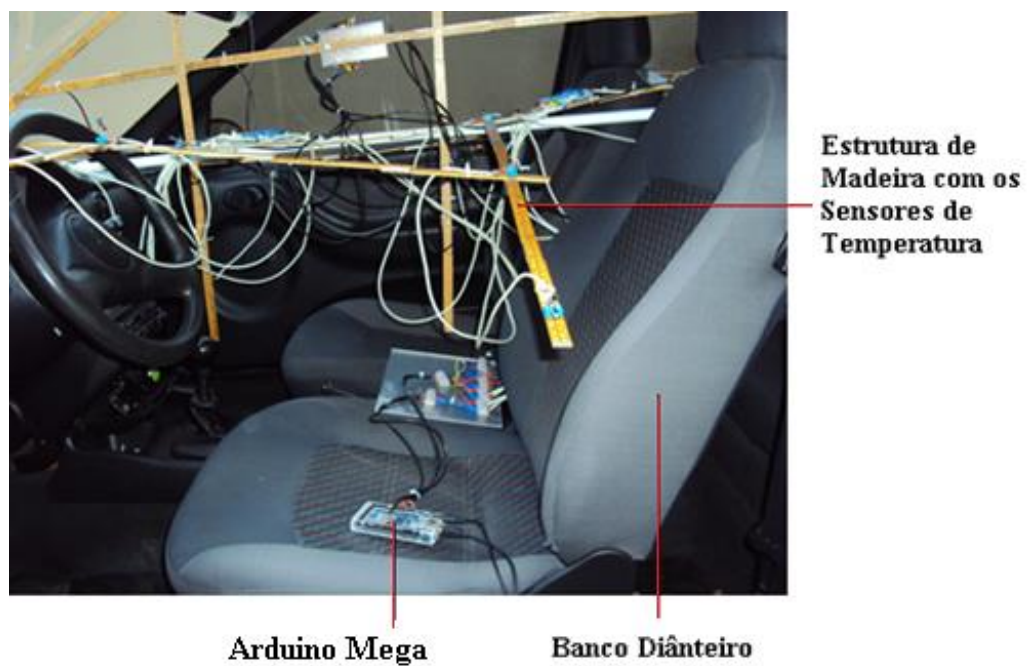
Figura 23: Placa Eletrônica com o Multiplexador



Fonte: Autor

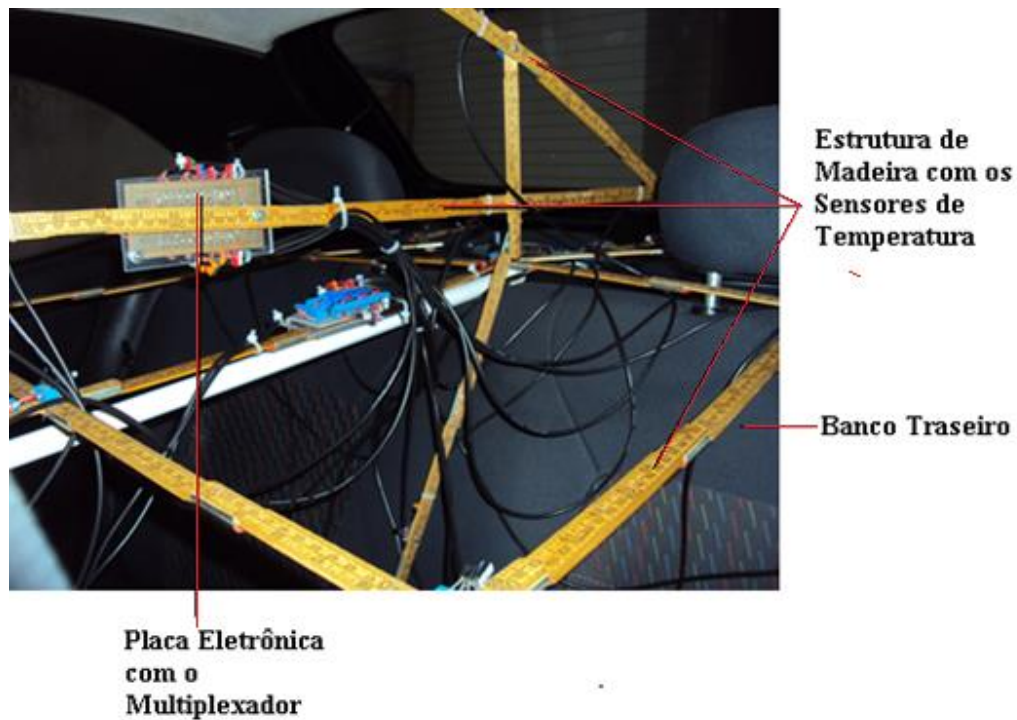
As placas eletrônicas com os sensores de temperatura foram instaladas no interior do veículo e a fixação dos mesmos na posição idealizada na Figura 20 foi realizada por meio de uma estrutura de madeira, conforme é mostrado na Figura 24 que é a parte dianteira do automóvel e na Figura 25 que representa a parte traseira do veículo.

Figura 24: Fixação dos Sensores de Temperatura na Parte Dianteira do Automóvel



Fonte: Autor

Figura 25: Fixação dos Sensores de Temperatura na Parte Traseira do Automóvel



Fonte: Autor

Para maior facilidade na aquisição dos dados, foi construída uma interface gráfica do usuário utilizando o software Matlab<sup>®</sup> por meio da sua extensão Guide. A interface possui quatro partes principais:

Parte 1) Escolha do intervalo de tempo e do número de medições a serem realizadas pelos sensores de temperatura;

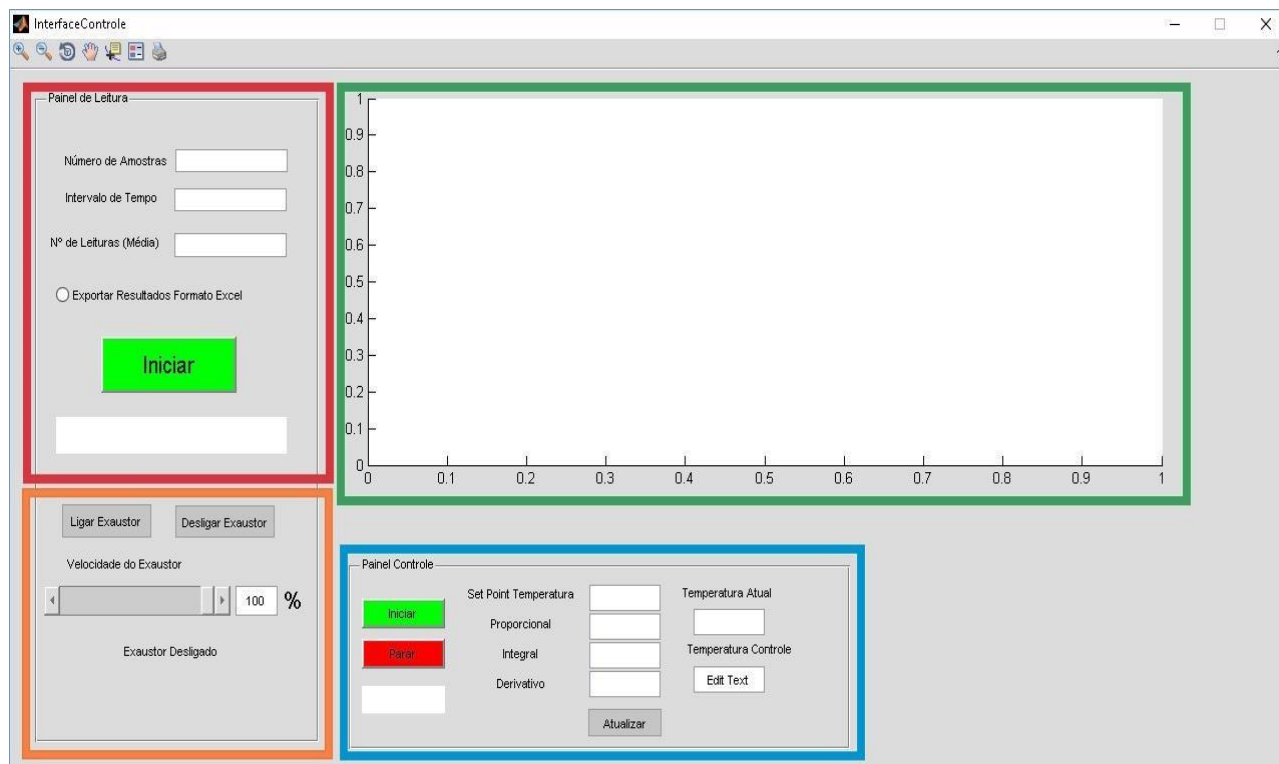
Parte 2) Acionamento manual e seleção da velocidade do sistema de ventilação;

Parte 3) Definição dos Parâmetros do Controlador PID e;

Parte 4) Visualização do perfil térmico gerada pelos sensores de temperatura.

As quatro partes da interface são mostradas na Figura 26.

Figura 26: Interface Gráfica – Partes



LEGENDA	
<span style="display: inline-block; width: 20px; height: 15px; background-color: red; border: 1px solid black;"></span>	PARTE 1
<span style="display: inline-block; width: 20px; height: 15px; background-color: orange; border: 1px solid black;"></span>	PARTE 2
<span style="display: inline-block; width: 20px; height: 15px; background-color: blue; border: 1px solid black;"></span>	PARTE 3
<span style="display: inline-block; width: 20px; height: 15px; background-color: green; border: 1px solid black;"></span>	PARTE 4

Fonte: Autor

Foi construído um modelo de ventilação similar ao proposto por Saidur, Masjuki e Hasanuzzaman, 2009, com os ventiladores posicionados nas janelas laterais do veículo na parte dianteira, conforme pode ser visto na Figura 27. A vedação entre o ventilador e a janela do veículo foi realizada por uma peça de acrílico transparente.

O ventilador foi escolhido de modo a promover uma vazão maior que 52,15 Litros/s, que foi a capacidade do “Ventilador Forte” proposto por Saidur, Masjuki e Hasanuzzaman, 2009, com o intuito de se obter um resultado melhor quanto a diminuição da temperatura dentro do automóvel. O ventilador selecionado é um modelo vendido comercialmente conforme apresentado na Figura 28.

Figura 27: Posicionamento dos Ventiladores



Fonte: Autor

Figura 28: Ventilador Adotado no Projeto



Fonte: (VENTISILVA, 2016)

As características técnicas do ventilador são colocadas a seguir: (VENTISILVA, 2016).

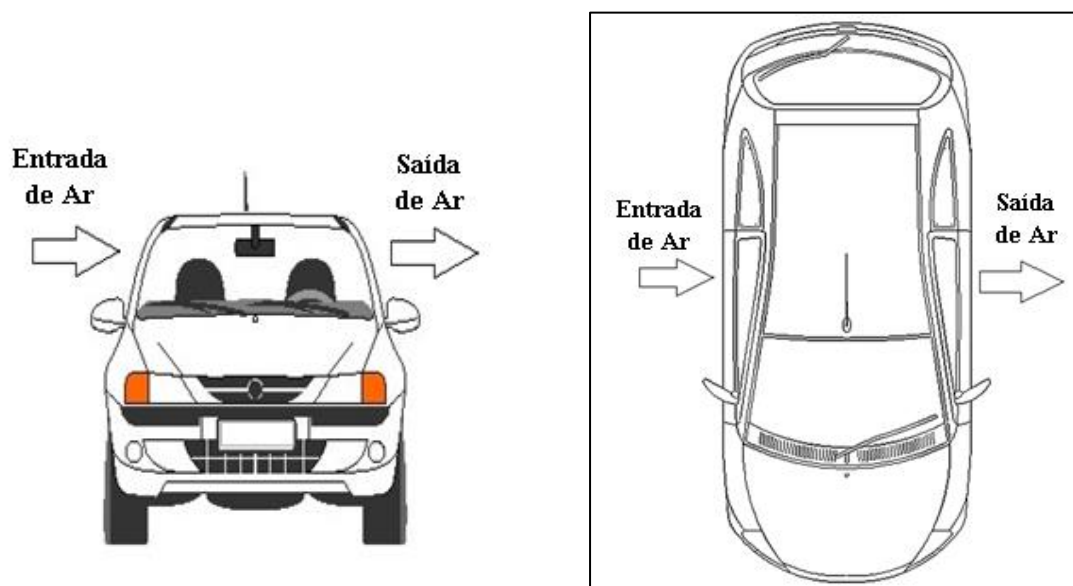
- Dimensões: 162mm x 162mm x 55mm;
- Tensão: 127/220 volts;
- Corrente: 257 miliampere;
- Potência: 31 Watts;
- Rotação: 3320 rpm;



- Vazão: aproximadamente 105 Litros/s;
- Pressão 15 mmca;
- Peso: 0,96 Kg.

Contudo, conforme relatado por Pereira, Lourenço e Pereira, 2010, existe uma perda de carga devido ao elemento filtrante na caixa de distribuição de ar. Para uma vazão aproximada de 378 m<sup>3</sup>/h (105 Litros/s) pode existir uma perda de carga de até 265Pa (27mmca). Sendo assim, o ventilador escolhido não poderia exercer a sua vazão plena de ar através da caixa de distribuição de ar no veículo, por isso resolveu-se adotar que o ventilador de uma janela do veículo seria responsável por sucionar o ar externo para dentro do veículo e o ventilador de outra janela seria responsável por tirar o ar de dentro do automóvel para o ambiente externo, ambos operando com a mesma vazão. A representação do fluxo de ar é ilustrado na Figura 29.

Figura 29: Fluxo de Ar pelo Automóvel



Fonte: (GIGACURSOS, 2014)-Modificado pelo Autor

Salienta-se que a construção do sistema de ventilação foi realizada após a etapa de aquisição dos dados da temperatura no interior do veículo, estando o mesmo já desocupado dos fios e sistemas com os 40 sensores de temperatura.

Um sistema de controle foi desenvolvido com o objetivo de manipular a velocidade dos ventiladores, manipulando assim o fluxo de ar que passa pelo automóvel estacionado e consequentemente, alterando a temperatura no interior do mesmo. O sistema de controle é

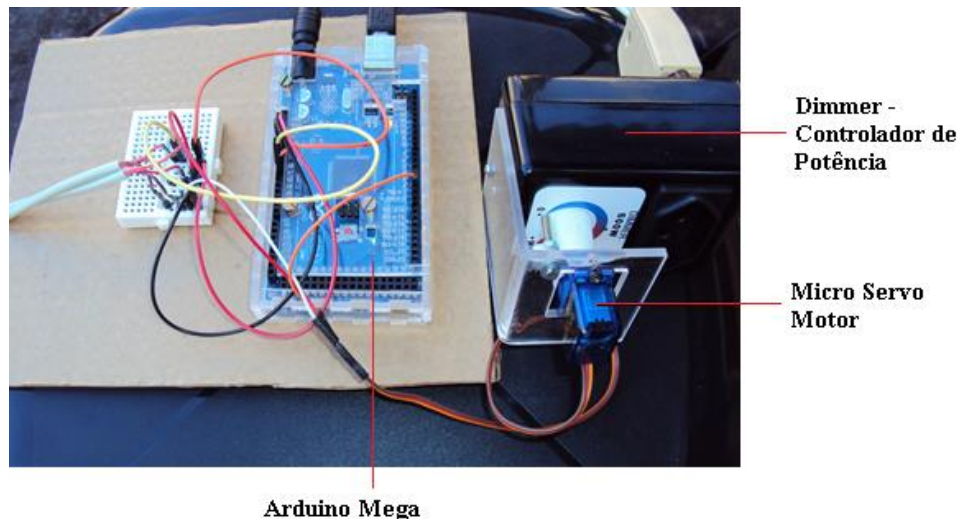


mostrado na Figura 30, constituído basicamente pelo Arduino Mega, um Micro Servo Motor e um *Dimmer*-controlador de potência.

Neste arranjo, o Arduino Mega envia um sinal de controle ao Micro Servo Motor que rotaciona o seu eixo até uma determinada posição, e ligado ao eixo do Servo, está o eixo que aciona o *Dimmer*, ou seja, rotacionando o eixo do Servo, também rotaciona o eixo do controlador de potência, alterando assim a potência elétrica de acionamento dos ventiladores, mudando a sua velocidade e alterando o fluxo de ar que passa pelo automóvel.

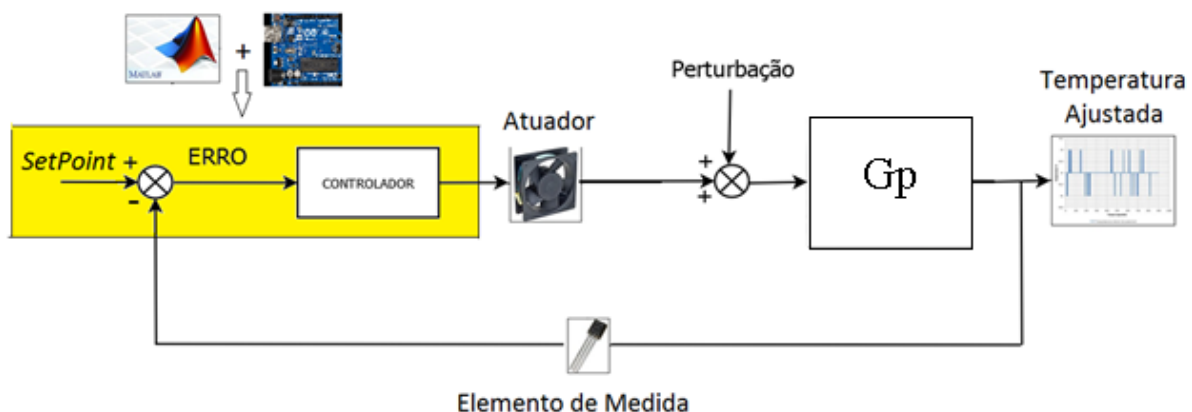
O sinal de controle enviado ao Micro Servo Motor pelo Arduino tem origem na malha de controle elaborada para o projeto, que possui a configuração mostrada na Figura 31. O bloco  $G_p$  representa o ganho do processo.

Figura 30: Sistema de Controle



Fonte: Autor

Figura 31: Configuração da Malha de Controle



Fonte: Autor

Após a etapa das construções e instalações, as tarefas foram organizadas da seguinte forma para obtenção dos resultados:

1. Aquisição do perfil da variação da temperatura no interior do automóvel medida por meio dos 40 sensores de temperatura organizados segundo o plano horizontal e vertical. O período de medição da temperatura foi realizado entre as 9h00min e 18h00min, horário de incidência dos raios solares sobre o veículo.
2. Elaboração de uma malha para simulação do sistema de controle para realização do processo de sintonia do controlador PID por meio da extensão Simulink do software Matlab<sup>®</sup>. Esta etapa foi subdividida em:
  - a) Definição dos sensores de temperatura a serem utilizados para identificação da curva característica do processo e definição dos parâmetros da função transferência. Nesta etapa foi verificado quais as regiões que apresentam as maiores e menores variações de temperatura, para um bom ajuste na identificação dinâmica do processo. Também foram realizadas três medições utilizando apenas um sensor de temperatura localizado na região de interesse.
  - b) Definição do ganho do sistema de controle, ou seja, definição da relação entre a variação do ângulo do servo motor e da variação da temperatura no interior do automóvel.
  - c) Sintonia do controlador, utilizando o critério de desempenho *ISE*.
3. Obtenção da mínima temperatura no interior do automóvel com o sistema de ventilação ligado com potência máxima. Este valor será definido com o valor de referência ou *Set Point* para o sistema de controle. Foram realizadas medições em três dias diferentes utilizando apenas um sensor de temperatura localizado na região de interesse.
4. Elaboração da malha de controle experimental utilizando a extensão Simulink do software Matlab<sup>®</sup> e ligada por meio do Arduino ao sistema de controle composto pelo Micro Servo Motor e o controlador de potência.
5. Comparação entre os resultados obtidos pela malha de controle simulada do item 2. com a malha de controle experimental do item 4. funcionando com o controlador PID sintonizado.
6. Definição da variação da vazão de ar do sistema de ventilação com o sistema de controle em funcionamento no interior do automóvel.

Como o aquecimento da parte interna do carro pode ser considerado um sistema complexo devido a sua geometria, paredes irregulares contendo vários materiais isolantes, entre outros problemas, a melhor opção é a identificação do modelo do processo a partir do tratamento das medidas e coletas a partir de um procedimento experimental.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados e discussão serão apresentados divididos em quatro partes: obtenção do perfil de temperatura interna do carro; identificação do modelo do processo que representa o sistema; ajuste dos parâmetros de controle; controle experimental.

### **4.1 PERFIL DE TEMPERATURA**

O perfil de temperatura no interior de um automóvel estacionado durante um período de aquecimento permitiu mostrar como ocorre essa variação e quais as áreas que possuem as temperaturas mais elevadas. O período de medição da temperatura foi realizado entre as 9h00min e 18h00min, horário de incidência dos raios solares sobre o veículo, entre os dias 13/01/2016 à 17/01/2016.

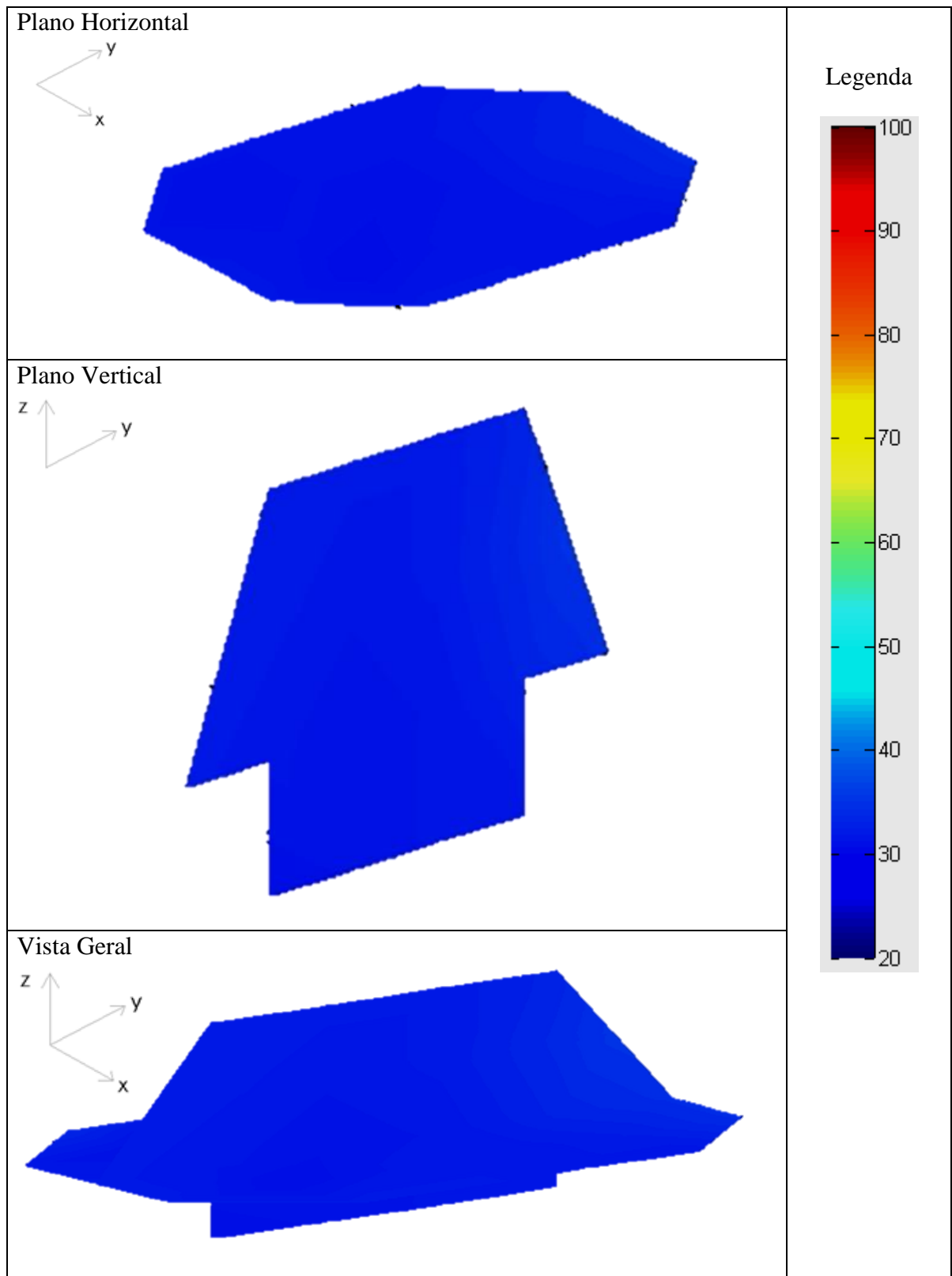
Os resultados são mostrados na Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35, respectivamente nos horários das 9h00min, 11h00min, 13h00min e 15h00min. As áreas com cor azul representam temperaturas próximas da temperatura ambiente em aproximadamente 30°C. As áreas em vermelho escuro representam temperaturas mais elevadas, na ordem de 100°C. O gradiente de temperatura entre 20°C e 100°C, é representado em escala por meio do gradiente de cores entre o azul escuro e o vermelho escuro. As figuras são divididas em três partes: a primeira representa o perfil de temperatura no plano horizontal, a segunda o perfil no plano vertical e a terceira representa o perfil obtido com os dois planos, em uma visão geral.

No Apêndice A são mostrados o perfil de temperatura para os outros horários.

Observa-se que com o passar do tempo, o perfil da temperatura indica a elevação dos valores em todo o interior do automóvel, começando das regiões próximas às superfícies externas, principalmente os vidros, e avançando em direção ao interior do mesmo.

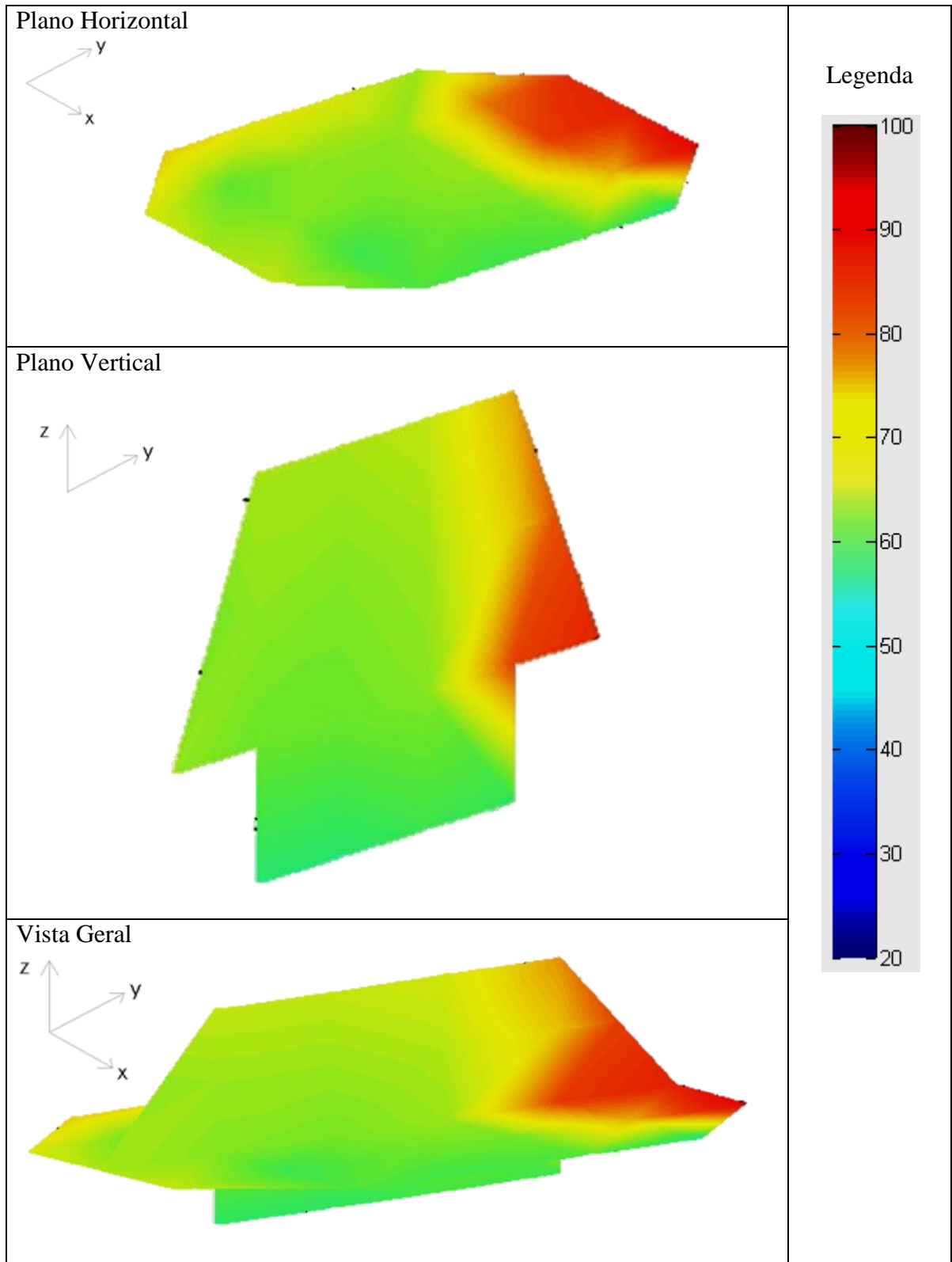
Também se observa que conforme a posição do sol sobre o veículo, as áreas de maior temperatura vão se alterando, começando na frente do veículo-Sol nascente- e indo para a parte traseira-Sol poente- (da direita e indo para a esquerda nas Figuras de 32 à 35).

Figura 32: Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 9h00min



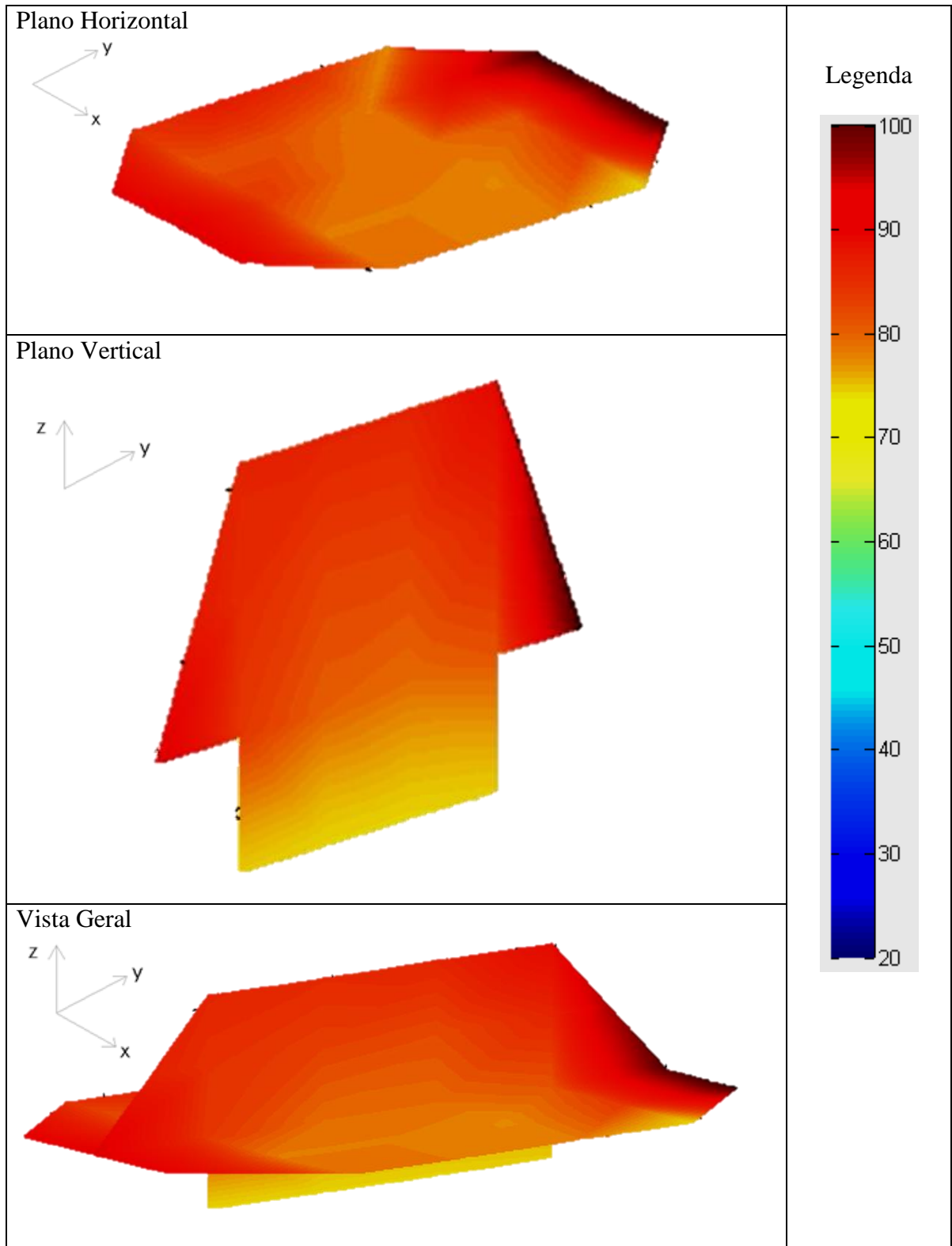
Fonte: Autor

Figura 33: Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 11h00min



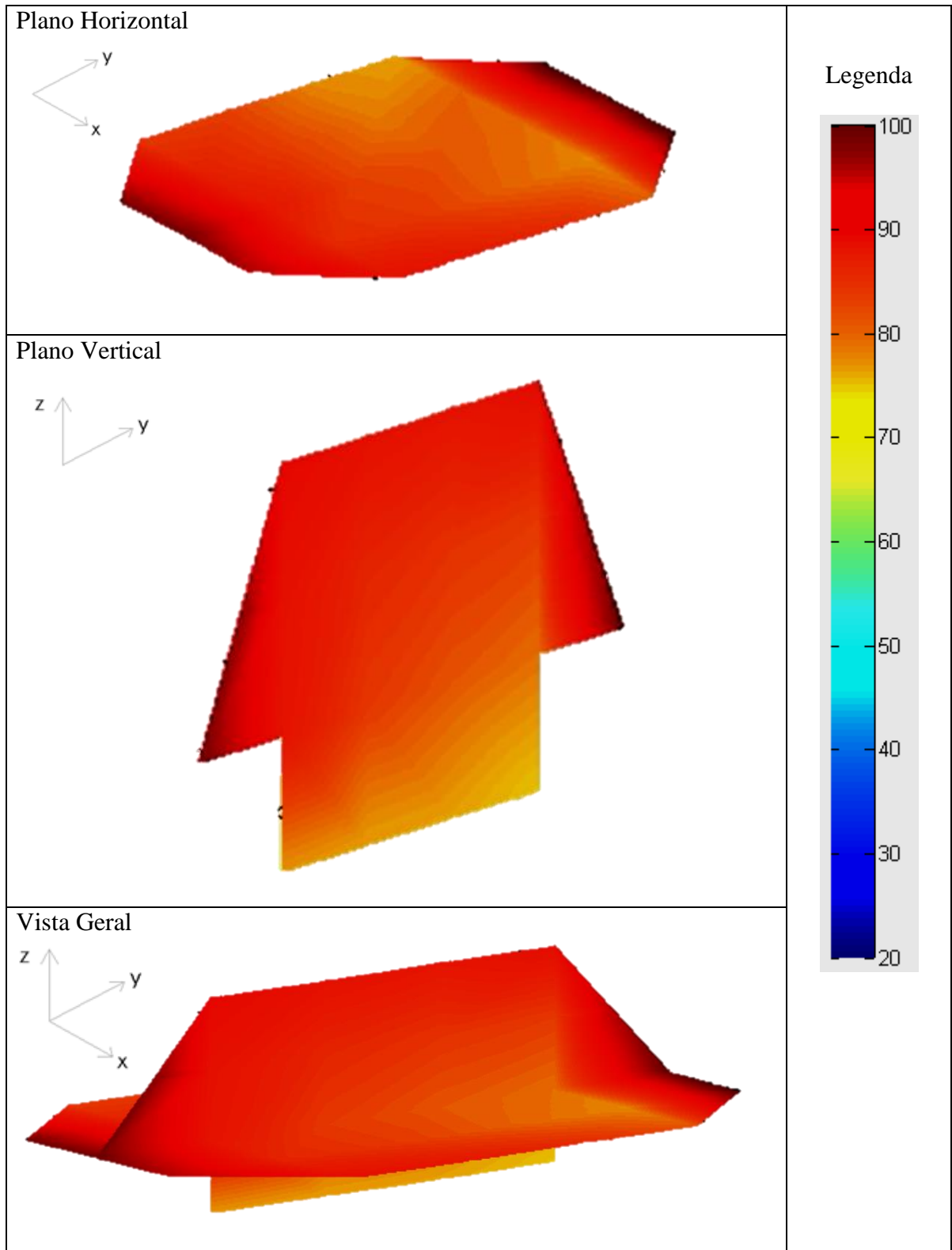
Fonte: Autor

Figura 34: Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 13h00min



Fonte: Autor

Figura 35: Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 15h00min

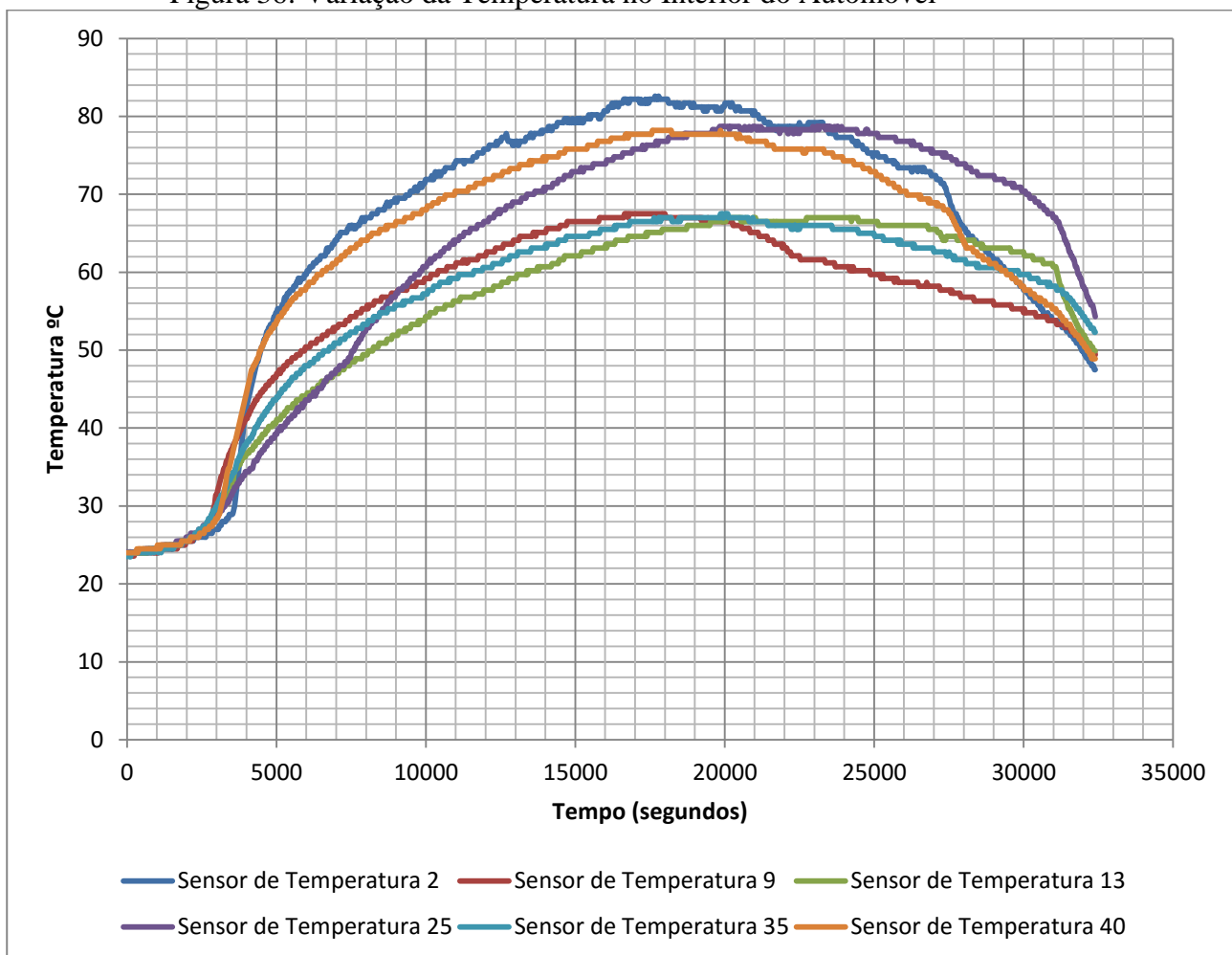


Fonte: Autor

Os valores das temperaturas para os sensores de temperatura 2, 9, 13, 25, 35 e 40 são mostrados na Figura 36. O eixo das ordenadas representa a temperatura em graus Celsius e o eixo das abscissas representa a variação do tempo em segundos entre as 9h00min até 18h00min.

Os sensores de temperatura 2, 9, 13, 25 e 40 mostram os valores próximos aos vidros do veículo, conforme esquematizado na Figura 20. Já o ponto 35 representa a temperatura em um ponto intermediário entre os bancos dianteiros.

Figura 36: Variação da Temperatura no Interior do Automóvel



Fonte: Autor

Observa-se que a temperatura próxima à superfície do painel de instrumentos do automóvel (Sensor de Temperatura 2) chega aproximadamente a 82°C às 14h00min (18000 segundos). Neste horário ou próximo dele, vários sensores também atingem as temperaturas máximas. Os dados coletados para todos os sensores se encontram disponíveis no Apêndice B.

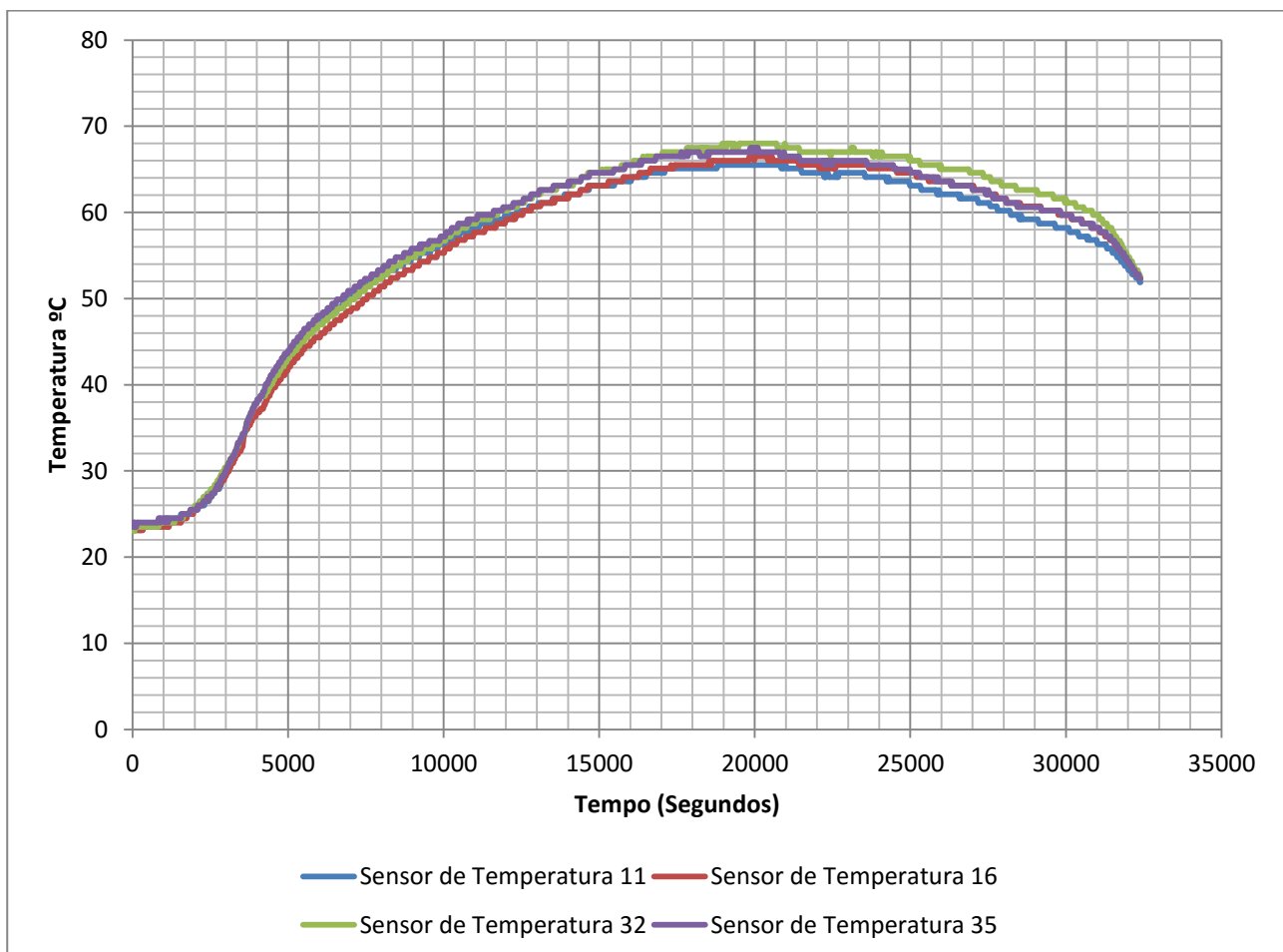


## 4.2 IDENTIFICAÇÃO DO MODELO DO PROCESSO

A partir dos dados coletados é possível identificar o caráter dinâmico do processo de aquecimento do ambiente interno do carro.

Para um bom ajuste na identificação dinâmica do processo o primeiro passo foi verificar quais as regiões que apresentam as maiores e menores variações de temperatura e estabelecer os pontos principais que serão utilizados para o sistema de controle da temperatura. Os pontos 11, 16, 32 e 35 foram escolhidos por estarem próximos ao corpo do motorista quando sentado e também por não sofrerem alterações bruscas de temperatura devido à mudança da posição do sol durante o tempo de medição. A Figura 37 mostra o comportamento dos valores da temperatura nestes pontos.

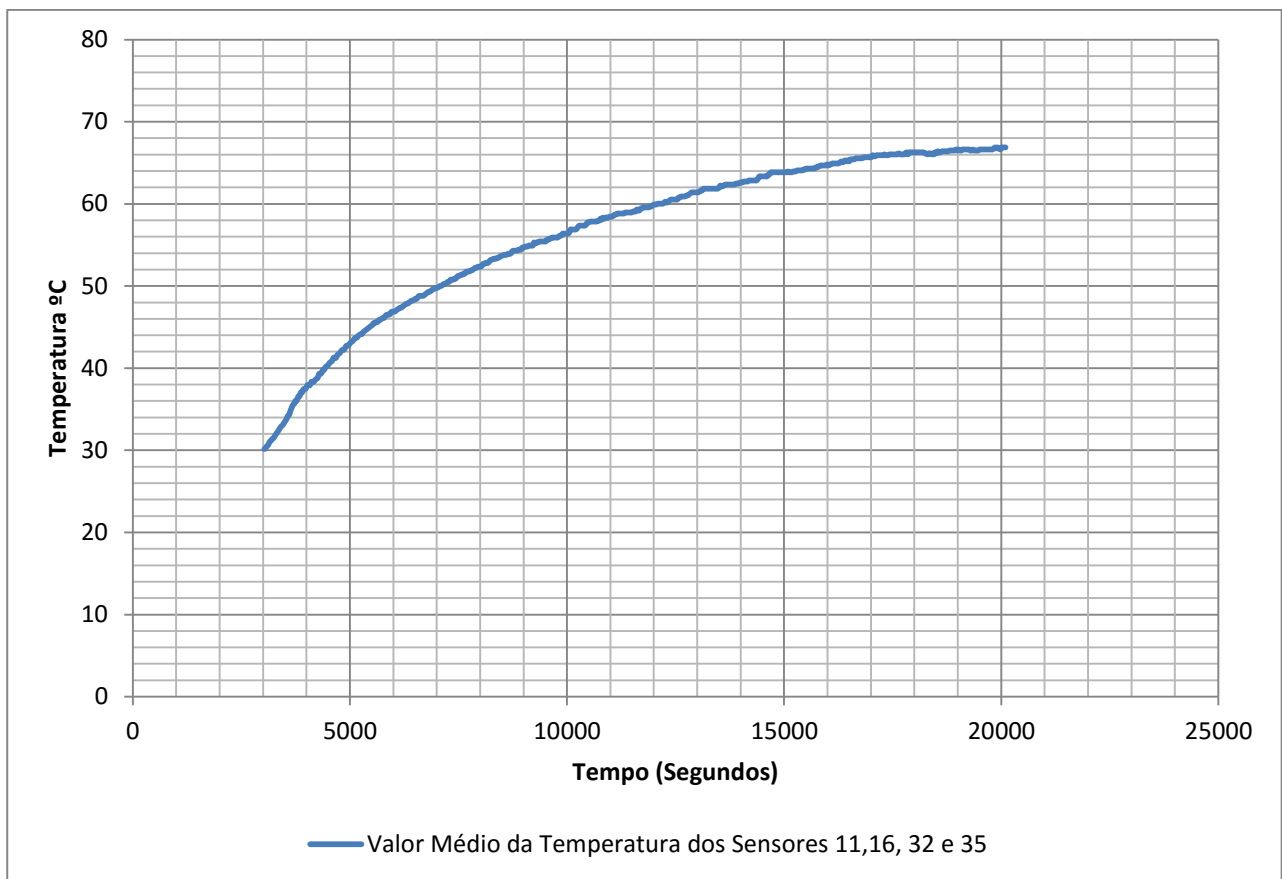
Figura 37: Temperatura nos Pontos 11, 16, 32 e 35.



Fonte: Autor

Com os valores da temperatura nos pontos escolhidos foi possível parametrizar uma curva de aquecimento para o processo. Tomando o valor médio dos quatro sensores e limitando o processo entre o tempo de 3030 segundos até 20100 segundos, obtemos a curva média mostrada na Figura 38. O limite inicial do tempo de 3030 segundos (aproximadamente 9h50min) foi escolhido quando o valor da temperatura média ficou aproximadamente em 30°C, que era a temperatura ambiente para este horário. Já o limite final de 20100 segundos (aproximadamente 14h35min) foi estabelecido quando a temperatura média se estabilizou no valor máximo alcançado.

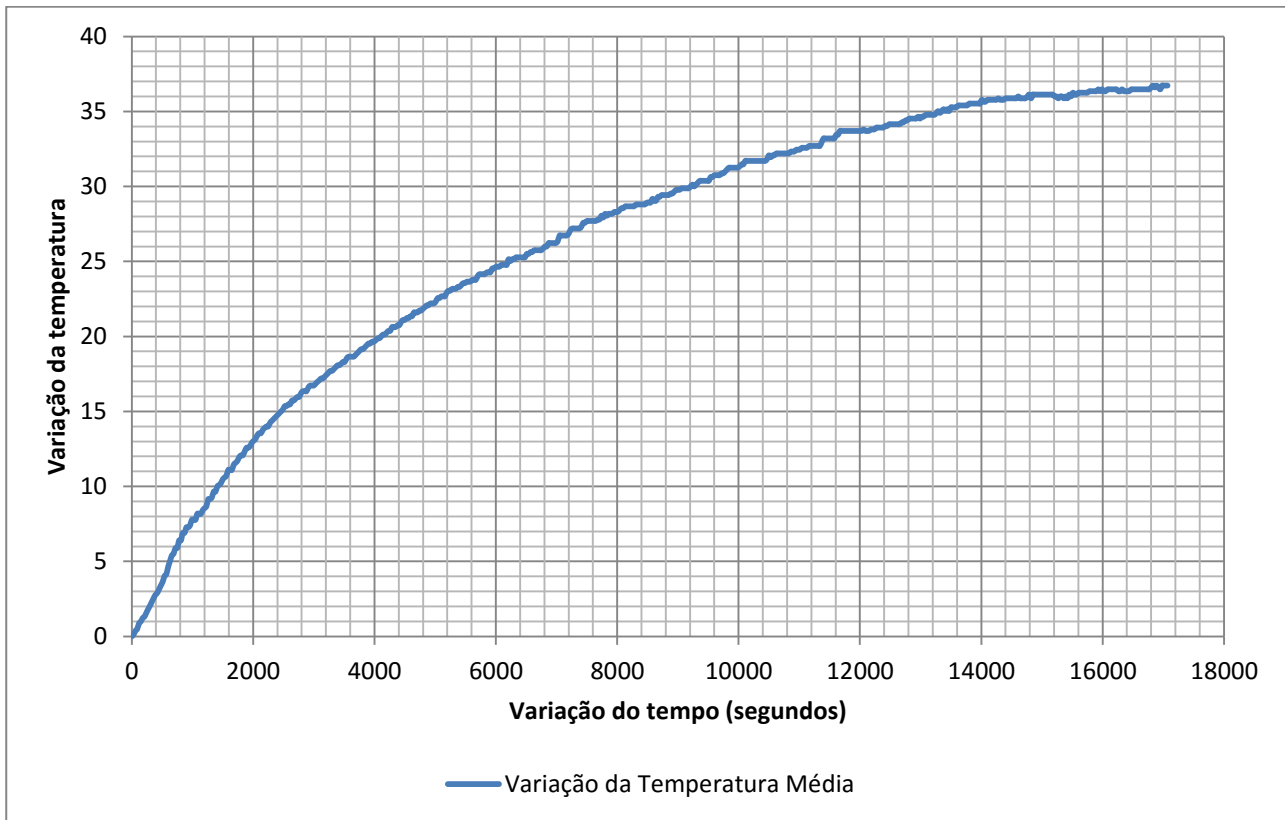
Figura 38: Temperatura Média dos Sensores 11, 16, 32 e 35



Fonte: Autor

A variação dos valores da temperatura média e do tempo em relação aos valores iniciais é mostrada na Figura 39, ou seja, foi considerado o início do tempo como 3030 segundos e o início da temperatura como 30°C.

Figura 39: Variação da Temperatura Média em Relação aos Valores Iniciais



Fonte: Autor

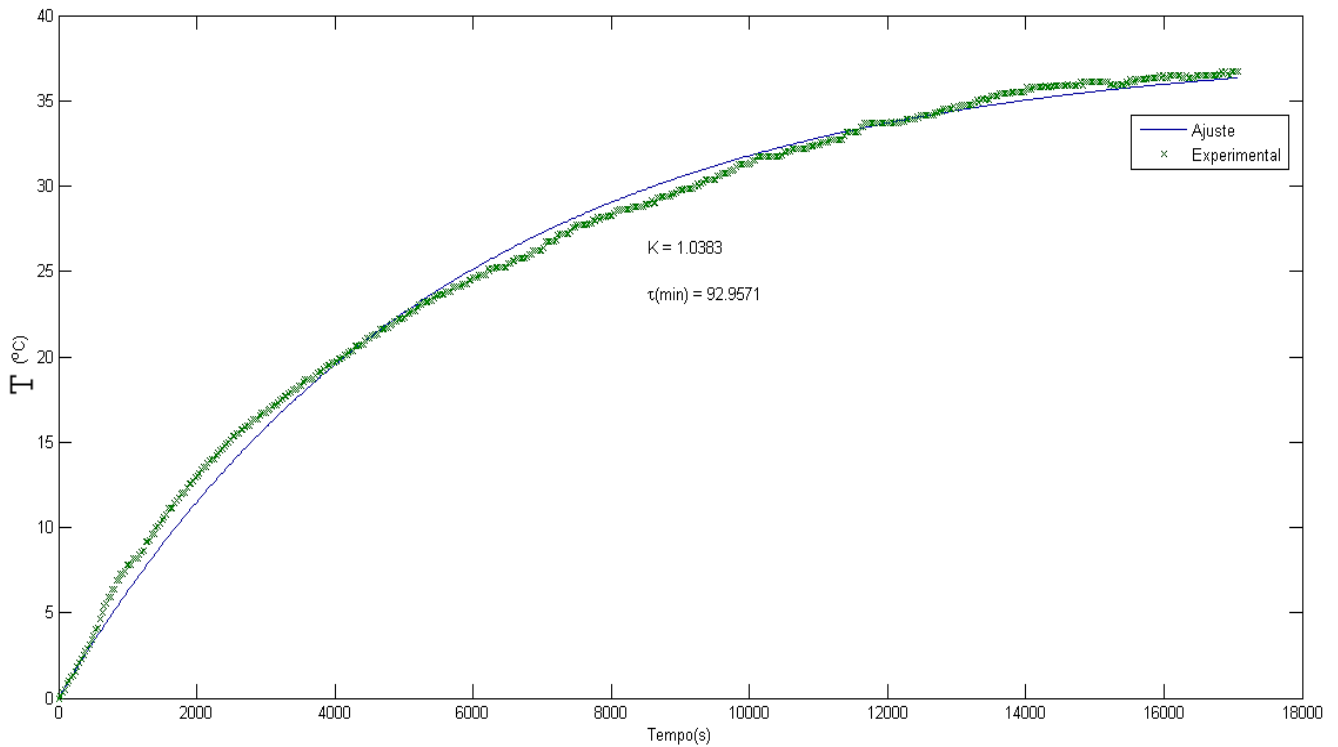
Assim, a identificação do processo por meio da curva de aquecimento foi realizada utilizando uma função transferência de primeira ordem cuja forma é apresentada na equação 11.

$$F(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (11)$$

em que  $K$  representa o coeficiente do numerador e  $\tau$  o coeficiente do denominador

Os parâmetros da função transferência no domínio da variável “s” de Laplace da curva mostrada na Figura 39 foram obtidos por meio do software Matlab, utilizando a função *fminsearch*. O resultado é mostrado na Figura 40. Os valores obtidos foram  $K=1,038$  e  $\tau = 92,957$  e percebe-se que a identificação do processo pelo modelo da função transferência de primeira ordem é considerada adequada, portanto não foram testadas outras possibilidades de função transferência.

Figura 40: Parâmetros da Função Transferência

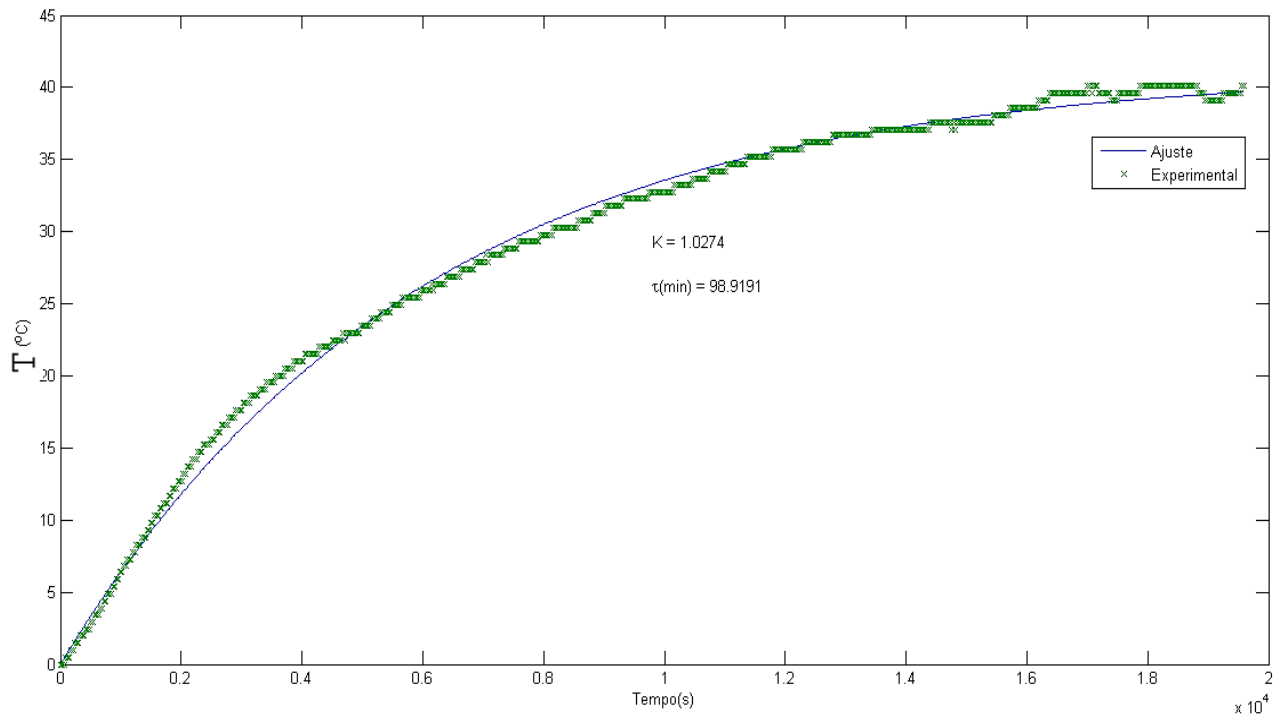


Fonte: Autor

Para estabelecer os parâmetros da função transferência da curva de aquecimento foram realizadas mais três medições, porém desta vez, foram medidas com apenas um sensor de temperatura na posição intermediária entre os outros quatro sensores (11, 16, 32 e 35). As medições foram realizadas nos dias 24/01/2016, 13/02/2016 e 15/02/2016. Os resultados obtidos para dias de medição são mostrados respectivamente, na Figura 41, Figura 42 e Figura 43.

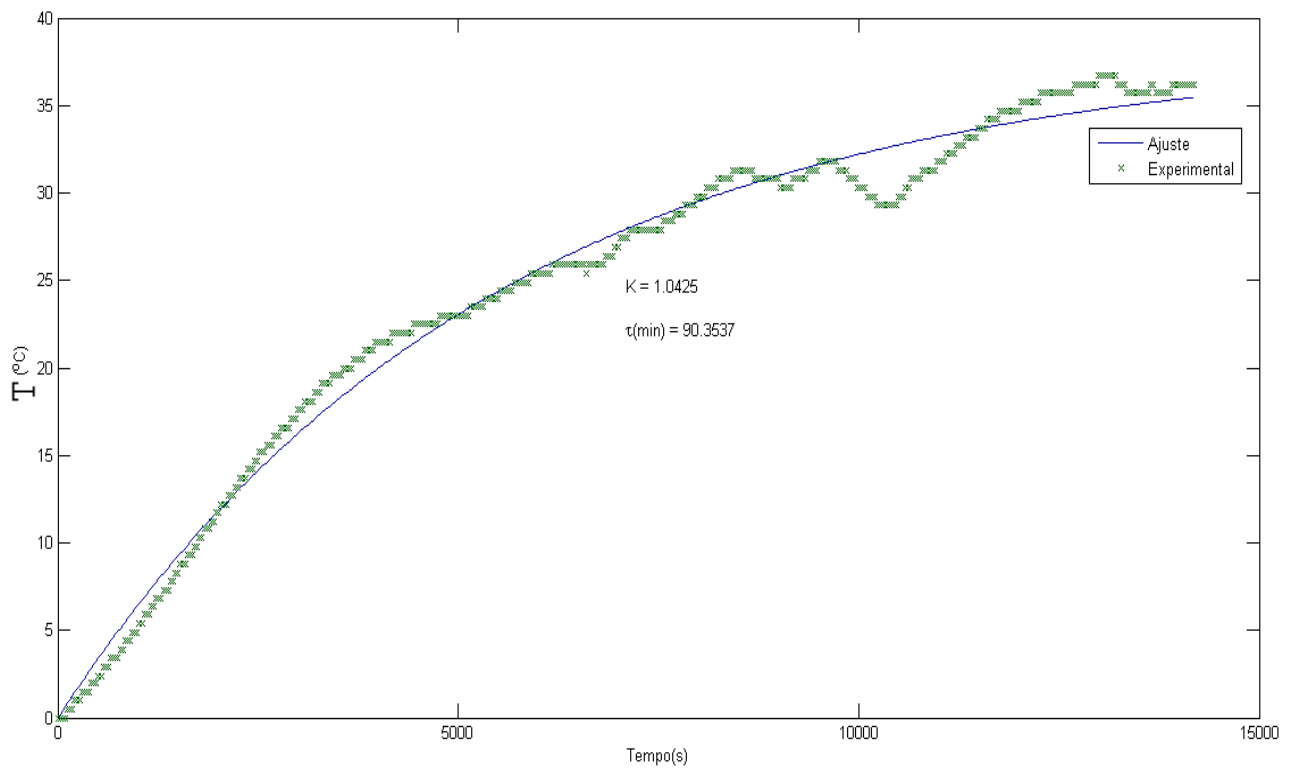
Pode ser observado que durante os dias 13 e 15/02/2016 houve medições que destoam da curva de tendência gerada, fato este ocasionado pela presença de nuvens que durante um breve período de tempo, geraram sombra sobre o veículo estacionado.

Figura 41: Parâmetros da Função Transferência para o Dia 24/01/2016



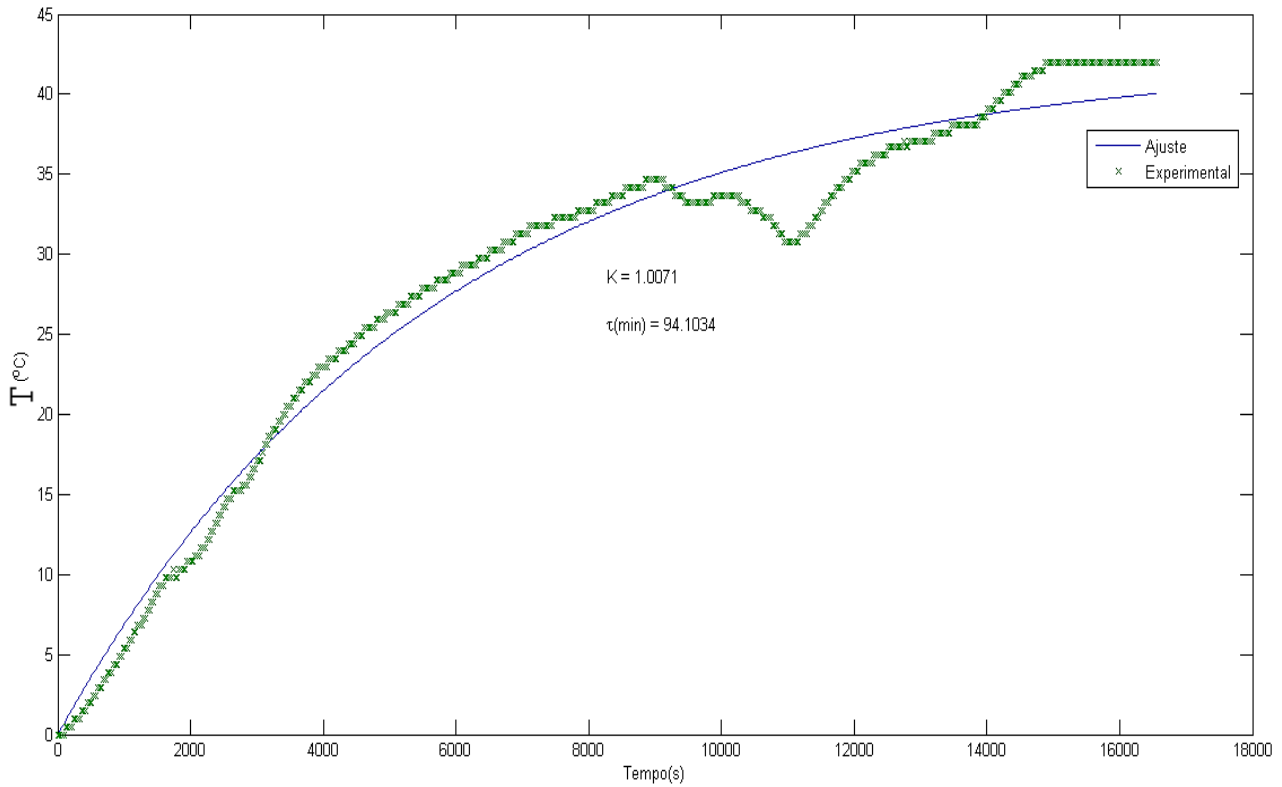
Fonte: Autor

Figura 42: Parâmetros da Função Transferência para o Dia 13/02/2016



Fonte: Autor

Figura 43: Parâmetros da Função Transferência para o Dia 15/02/2016



Fonte: Autor

Os valores dos parâmetros gerados para as três medições de um único sensor, juntamente com os valores dos parâmetros obtidos pela média da medição dos sensores 11, 16, 32 e 35 são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros para a Função Transferência

Data da Medição	Parâmetro $K$	Parâmetro $\tau$
17/01/2016	1,0383	92,9571
24/01/2016	1,0274	98,9191
13/02/2016	1,0425	90,3537
15/02/2016	1,0071	94,1034
<b>Valor Médio</b>	1,0288	94,0833

Fonte: Autor

O método de identificação fornece uma boa precisão para os parâmetros da função transferência que representa o processo.

### 4.3 AJUSTE DOS PARÂMETROS DE CONTROLE

Para o ajuste do sistema de controle é necessário determinar além da função transferência que descreve o processo, os outros parâmetros presentes na malha de controle fechada.

O ganho do conjunto micro servo motor e *dimmer* (controlador de potência) foram medidos para se obter a relação da variação temperatura no interior do automóvel estacionado em função da variação do ângulo do servo. Os resultados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Relação da Variação do Ângulo do Servo Motor com a Variação da Temperatura

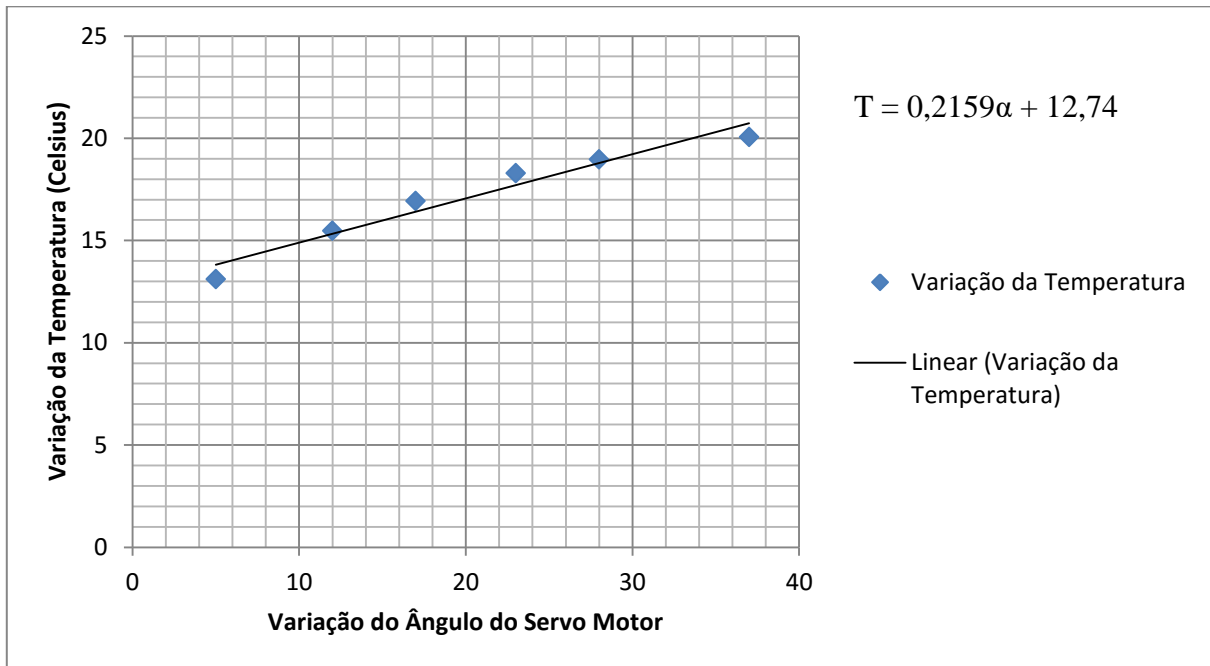
Ângulo do Servo Motor (°)	Temperatura (°C) Medida 1	Temperatura (°C) Medida 2	Temperatura (°C) Medida 3	Temperatura (°C) Medida 4	Temperatura (°C) Medida 5	Valor Médio
5	13,2	12,7	9,8	16,1	13,7	13,1
12	15,7	14,2	13,2	18,1	16,1	15,46
17	17,6	15,2	15,1	19,6	17,1	16,92
23	19,1	17,1	16,1	20	19,1	18,28
28	19,6	17,1	17,1	21	20	18,96
37	20,1	19,1	18,1	22	21	20,06

Fonte: Autor

Para valores de ângulos do servo motor maiores que 37°, a variação da temperatura no interior do automóvel é desprezível se comparado aos outros resultados, por esta razão foi medido até este valor.

A relação da variação da temperatura pode ser aproximada por uma tendência linear cuja equação da reta possui coeficiente angular de 0,2159, que representa o ganho da variável temperatura (°C) em relação à modificação do ângulo do servo motor ( $\alpha$ ). O resultado é mostrado na Figura 44.

Figura 44: Relação da Variação da Temperatura em Relação à Variação do Ângulo do Servo Motor



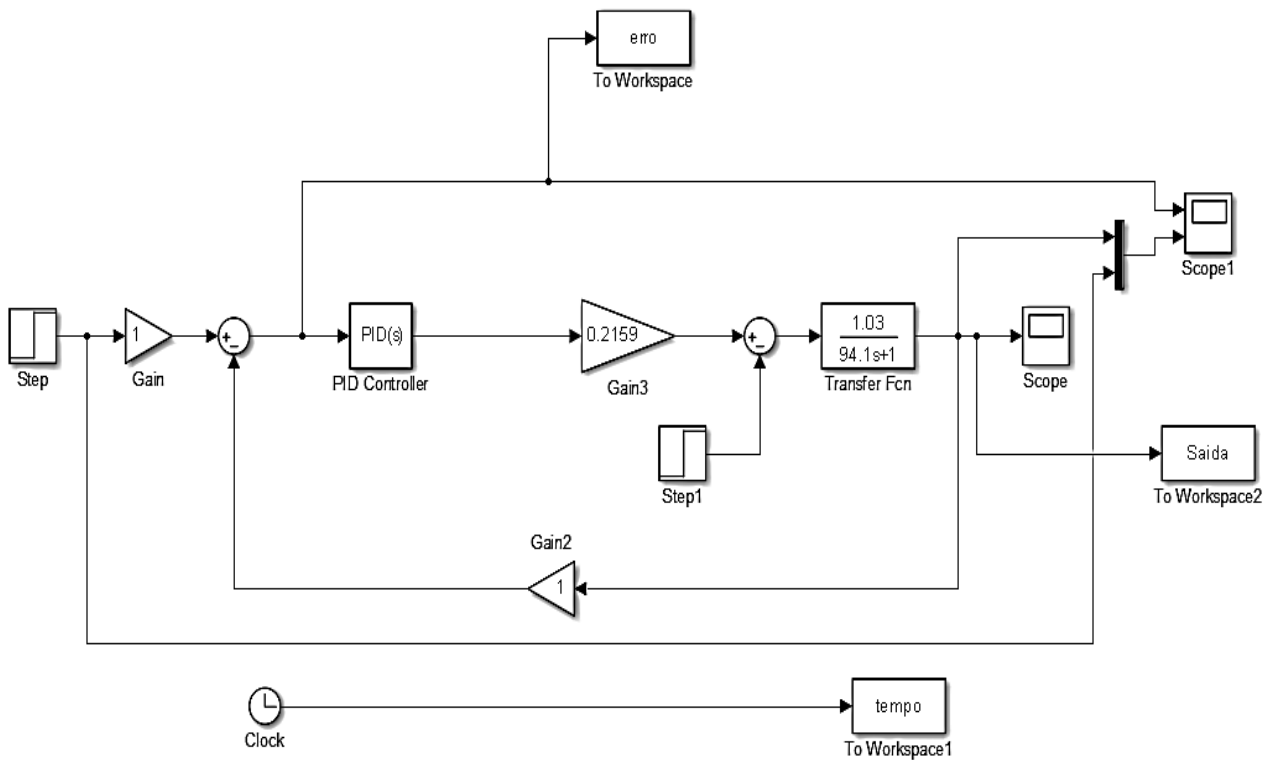
Fonte: Autor

Definidos a função transferência do processo de aquecimento e o ganho representado pela relação da variação da temperatura em função da variação do ângulo do servo motor e controlador de potência representando o conjunto controlador, foi implementado no software Matlab®, no ambiente Simulink, uma malha de simulação para o sistema de controle do processo conforme mostrado na Figura 45.

Por meio da simulação da malha de controle, utilizando a função *fminsearch*, e o índice de desempenho com o critério ISE foi possível realizar a sintonia dos parâmetros do controlador *PID*. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos e o *ISE* para cada conjunto de parâmetros *PID*. Os valores de P, I e D, são os parâmetros livres para a determinação do controlador  $K_p$ ,  $\tau_i$  e  $\tau_d$ , respectivamente.



Figura 45: Malha Fechada de Simulação para o Sistema de Controle



Fonte: Autor

Tabela 3: Sintonia dos Parâmetros do Controlador *PID*

Iteração	$K_p$	$\tau_i$	$\tau_d$	<i>ISE</i>
1	10	1	1	0,2221
2	10,5	1	1	0,2149
3	10	1,05	1	0,2116
4	10	1	1,05	0,2221
5	10,3333	1,0333	1,0333	0,2102
6	10,5	1,05	1,05	0,2046
7	10,6667	1,0667	0,9833	0,1993
8	11	1,1	0,95	0,1891
9	10,5	1,1333	1	0,1897
10	11,3333	1,1389	1	0,179
11	12	1,1833	1	0,1654
12	11,8333	1,2278	0,9167	0,161
13	12,5	1,3167	0,85	0,1445
14	13,1667	1,2667	0,8667	0,1445
15	14,1111	1,4111	0,8611	0,1234
16	15,6667	1,5667	0,8167	0,1029

<b>17</b>	15,5556	1,5833	0,6889	0,1025
<b>18</b>	17,3333	1,7833	0,5333	0,0841
<b>19</b>	17,1667	1,8444	0,6	0,0819
<b>20</b>	19,1667	2,1333	0,4667	0,0654
<b>21</b>	22,2778	2,3389	0,3611	0,0533
<b>22</b>	27,1667	2,85	0,1167	0,0379

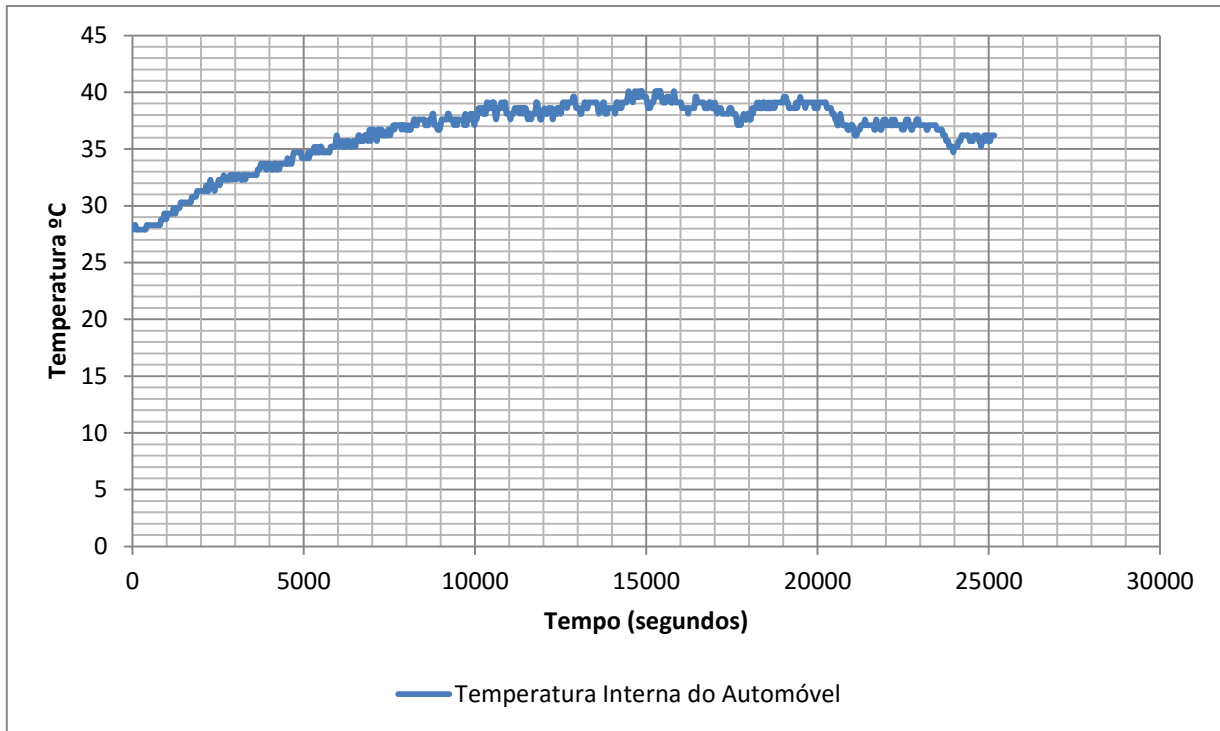
Fonte: Autor

Os parâmetros que geram o mínimo valor para o índice de desempenho ISE foram  $K_p = 27,1667$ ,  $\tau_i = 2,85$  e  $\tau_d = 0,1167$ .

Com o sistema de ventilação instalado no automóvel e apenas um sensor (próximo ao corpo do motorista- posição intermediária entre os sensores 11, 16, 32 e 35) medindo a temperatura interna, foram realizadas medições para se obter o valor da temperatura interna mínima com os ventiladores ligados com a potência total. As medições foram realizadas nos dias 17, 18 e 19 de março de 2016 e os valores da temperatura interna do automóvel são mostrados na Figura 46, Figura 47, e Figura 48, respectivamente.

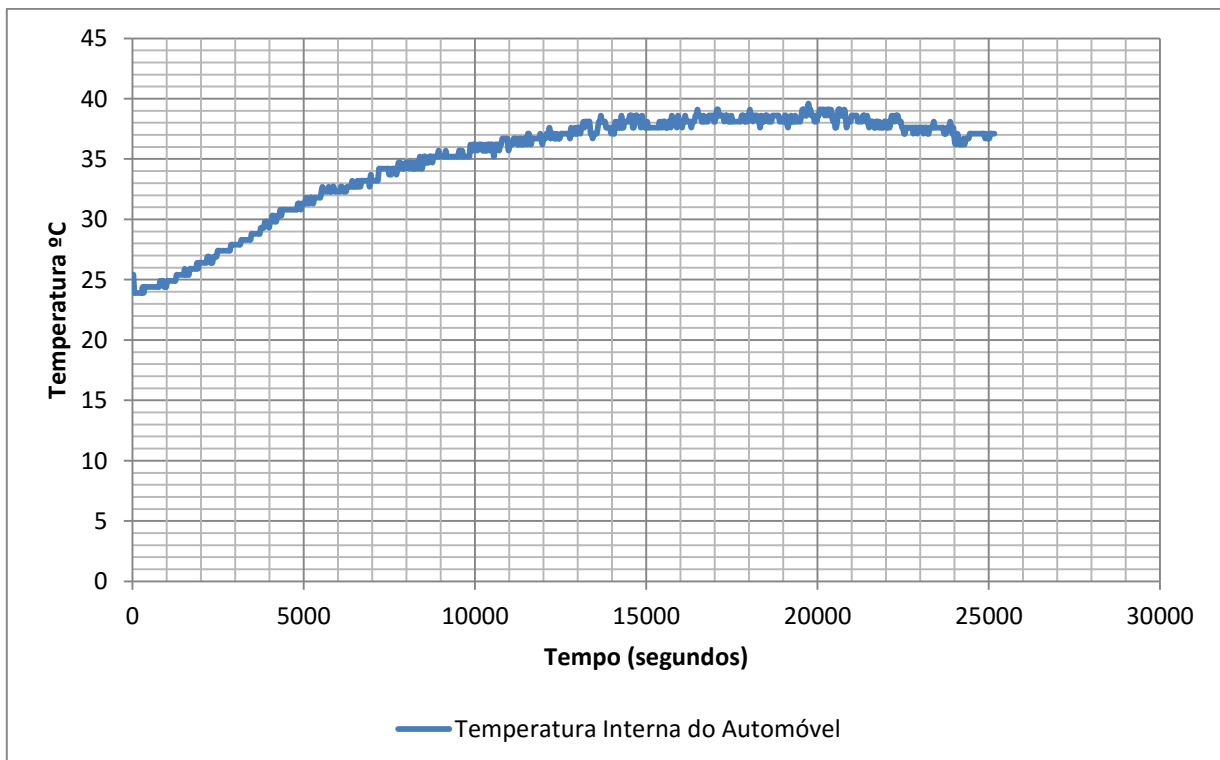
Os valores de temperatura foram medidos entre 9h00min até 14h00min (25200 segundos). Observa-se nas figuras que os valores máximos para a temperatura interna do veículo foram de aproximadamente, 40°C para o dia 17, 39°C para o dia 18 e de 41°C para o dia 19, todas no horário aproximado das 13h00min (14400 segundos) até às 14h30min(19800 segundos). A temperatura ambiente no local para estes horários medidas com termômetro de mercúrio foram de 37°C para o dia 17, 37°C para o dia 18 e de 38°C para o dia 19 de março de 2016.

Figura 46: Temperatura Interna do Automóvel em 17/03/2016



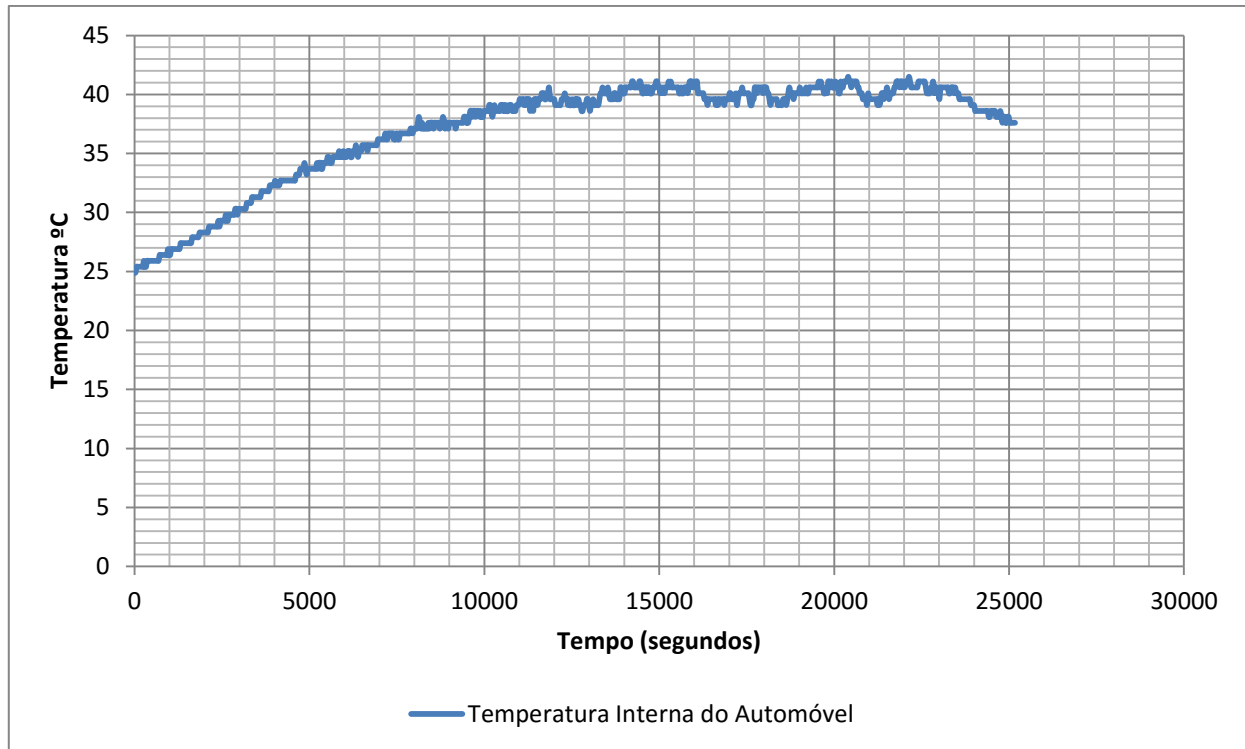
Fonte: Autor

Figura 47: Temperatura Interna do Automóvel em 18/03/2016



Fonte: Autor

Figura 48: Temperatura Interna do Automóvel em 19/03/2016



Fonte: Autor

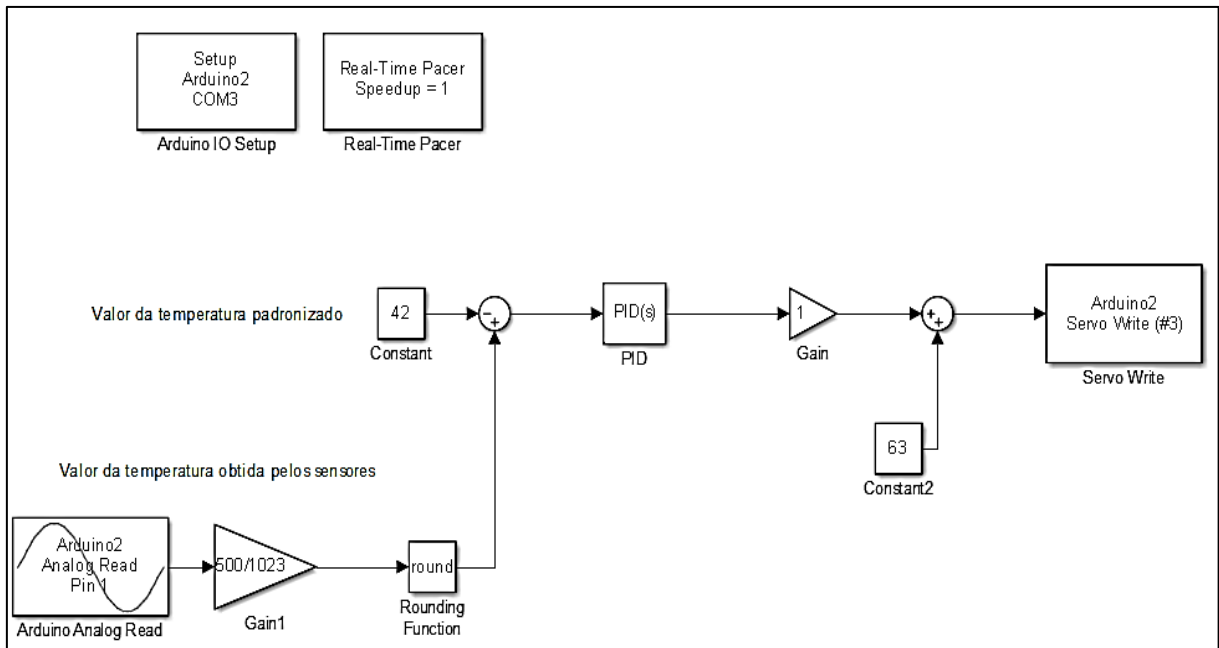
Observa-se que a temperatura mínima alcançada com o sistema de ventilação ligado com a potência máxima foi de aproximadamente 41,5°C no dia 19/03/2016.

Assim, foi estabelecida a temperatura de 42°C para o valor de referência (*Set point*) a ser utilizado no sistema de controle, uma vez que esta temperatura é a temperatura limite que o sistema de controle irá conseguir manter no interior do veículo no horário com as temperaturas mais elevadas.

#### 4.4 CONTROLE EXPERIMENTAL DO SISTEMA

O sistema de controle (conforme mostrado na Figura 49) elaborado para o projeto, foi desenvolvido na extensão Simulink do software Matlab® para comunicação com o sistema servo motor e controlador de potência. Este sistema de controle refere-se à parte destacada em amarelo na Figura 31.

Figura 49: Sistema de Controle para Funcionamento com o Arduino



Fonte: Autor

A malha de controle possui duas entradas e uma saída, sendo a primeira entrada o sinal de referência para o controlador (Valor da temperatura padronizado), ou seja, o *Set Point* identificado pelo bloco “Constant”. Já a segunda entrada é o valor medido da variável que se deseja manipular, a temperatura no interior no veículo estacionado, representada pelo bloco “Arduino2 Analog Read Pin1”. A saída é a variável controlada, neste caso é o ângulo do eixo do Micro Servo Motor que está ligado ao controlador de potência, identificada pelo bloco “Arduino2 Servo Write (#3)”. O bloco “Gain1” representa o valor do ganho para converter o sinal elétrico gerado pelo sensor de temperatura em um valor em graus Celsius. O bloco “Constant2” identifica o valor da posição em graus a partir do qual o eixo do *Dimmer* começa a girar o ventilador. O controlador *PID* é identificado pelo bloco que recebe o mesmo nome. Os outros blocos referem-se a funções de comunicação entre o software Matlab® e o Arduino.

Devido ao fato do Micro Servo Motor funcionar apenas com valores inteiros para posicionamento do eixo, os valores de entrada para a temperatura também foram arredondados para um número inteiro, sendo assim, o sistema de controle atuará com uma percepção mínima de variação de temperatura de 1°C.

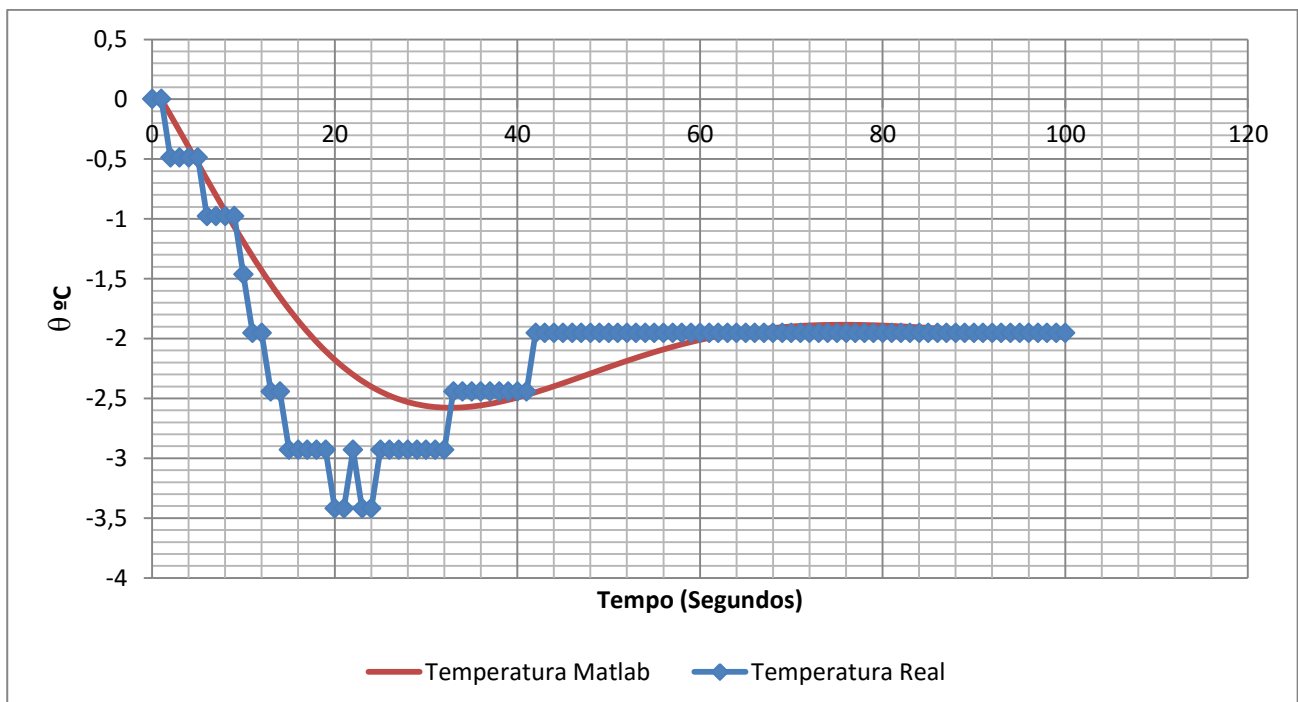
Apesar de estar desenhada na configuração de malha aberta, a malha de controle possui uma configuração de malha fechada, isto porque o valor da temperatura do interior do veículo também representa uma resposta do sistema à alteração executada pelo controlador e

esta grandeza da saída foi desenhada como uma variável de entrada simplesmente devido à configuração de blocos no sistema de comunicação Matlab<sup>®</sup>/Arduino.

Com o controlador *PID* funcionando com os parâmetros sintonizados ( $K_P = 27,1667$ ,  $\tau_i = 2,85$  e  $\tau_d = 0,1167$ ), foi possível comparar os resultados obtidos experimentalmente com a análise simulada da malha de controle no software Matlab<sup>®</sup>. Os resultados para as medições e comparações são mostrados na Figura 50, Figura 51, Figura 52 e Figura 53. O eixo y representa o desvio de temperatura ( $\theta = \text{Temperatura do SetPoint} - \text{Temperatura}(t)$ ) As medições foram realizadas nos dias 21 e 23 de abril de 2016.

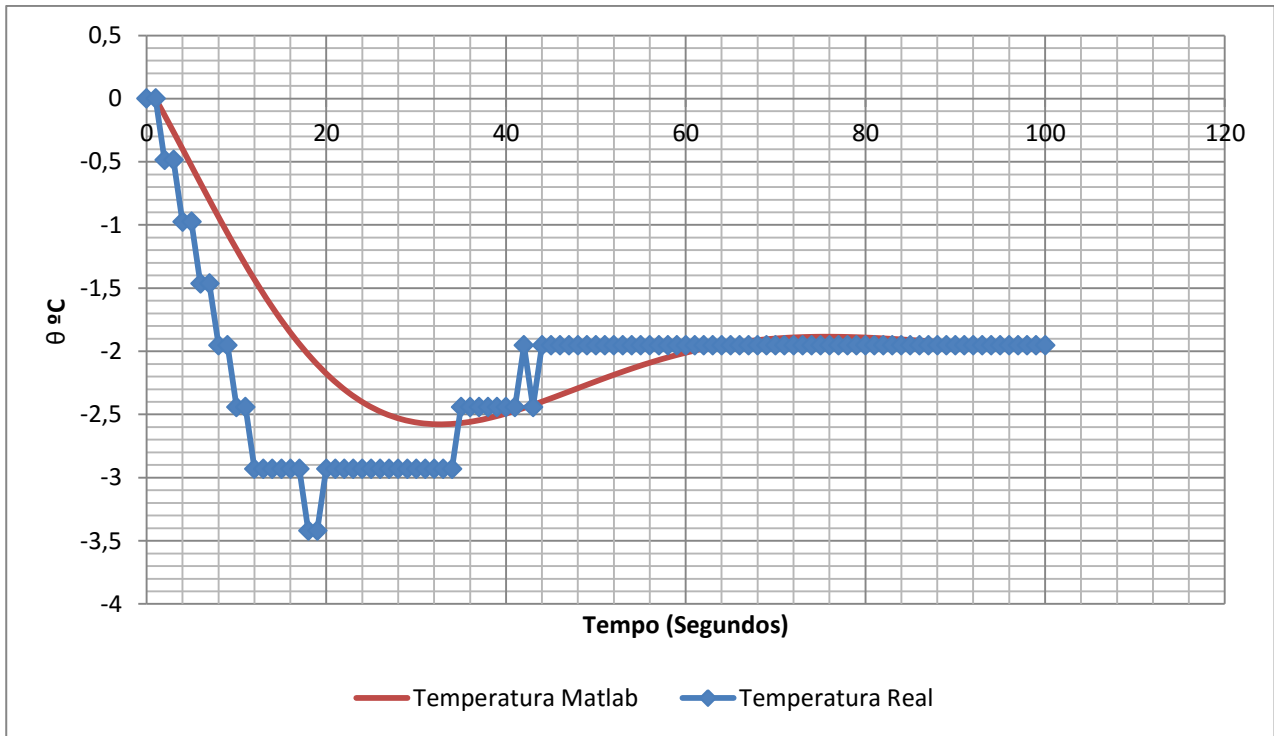
A variação da temperatura de apenas 2°C foi utilizada para uma melhor visualização e comparação de valores devida as limitações do conjunto do sistema de controle micro servo motor e controlador de potência. Como o servo motor tem o limite de posicionamento até 180°, e o começo do funcionamento dos ventiladores se dá apenas com 63°, a faixa de variação útil do controlador fica limitada à 117°. Como o índice do ganho proporcional e  $K_P = 27,1667$ , uma variação de apenas 1°C já proporciona um aumento de posição no servo motor em 27° e 2°C uma variação de 54°. Assim, para tentativas de controle com variações repentinas de mais de 2°C, era comum o servo motor atingir sua posição final antes de executar a ação de controle para o sistema.

Figura 50: Variação da Temperatura Real e Simulada - Medida 1



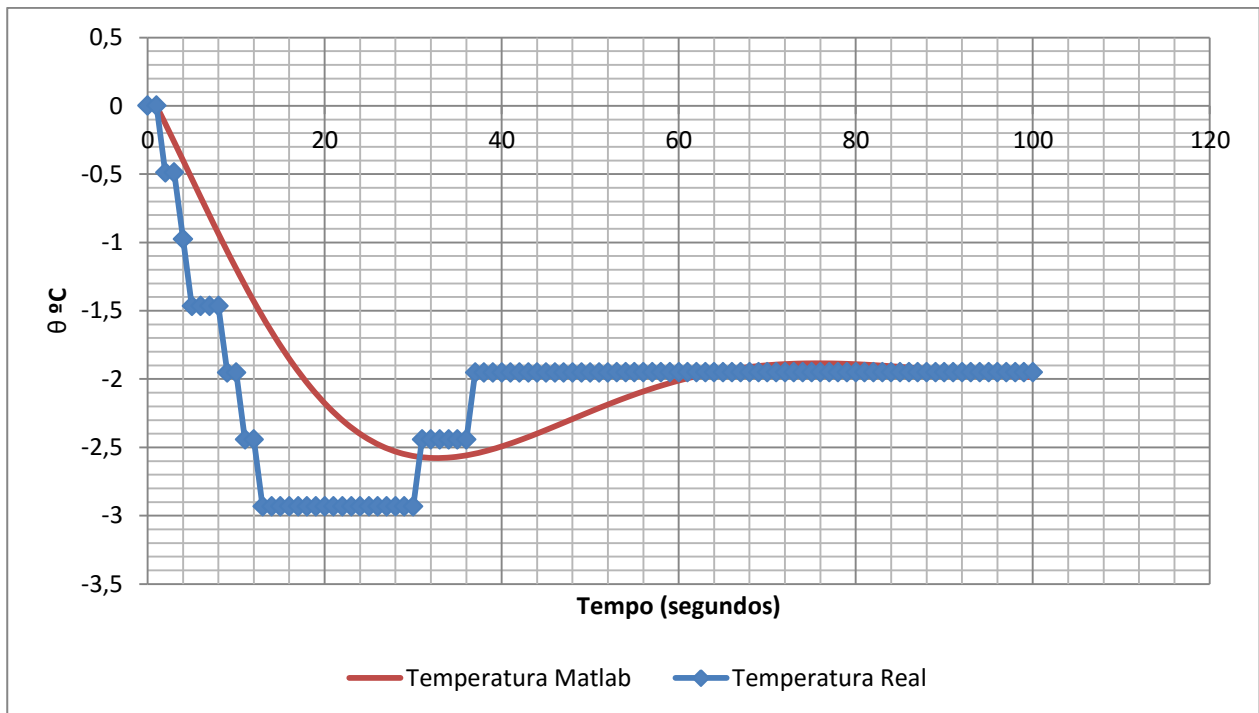
Fonte: Autor

Figura 51: Variação da Temperatura Real e Simulada - Medida 2



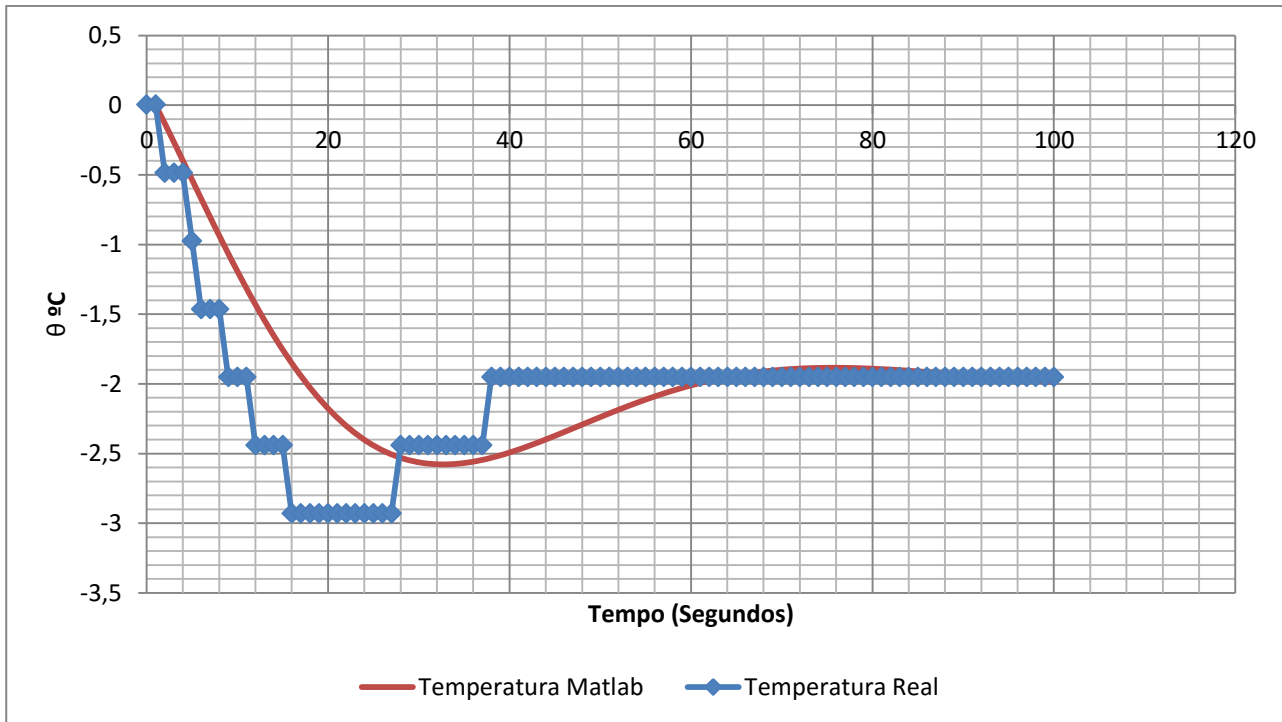
Fonte: Autor

Figura 52: Variação da Temperatura Real e Simulada - Medida 3



Fonte: Autor

Figura 53: Variação da Temperatura Real e Simulada - Medida 4



Fonte: Autor

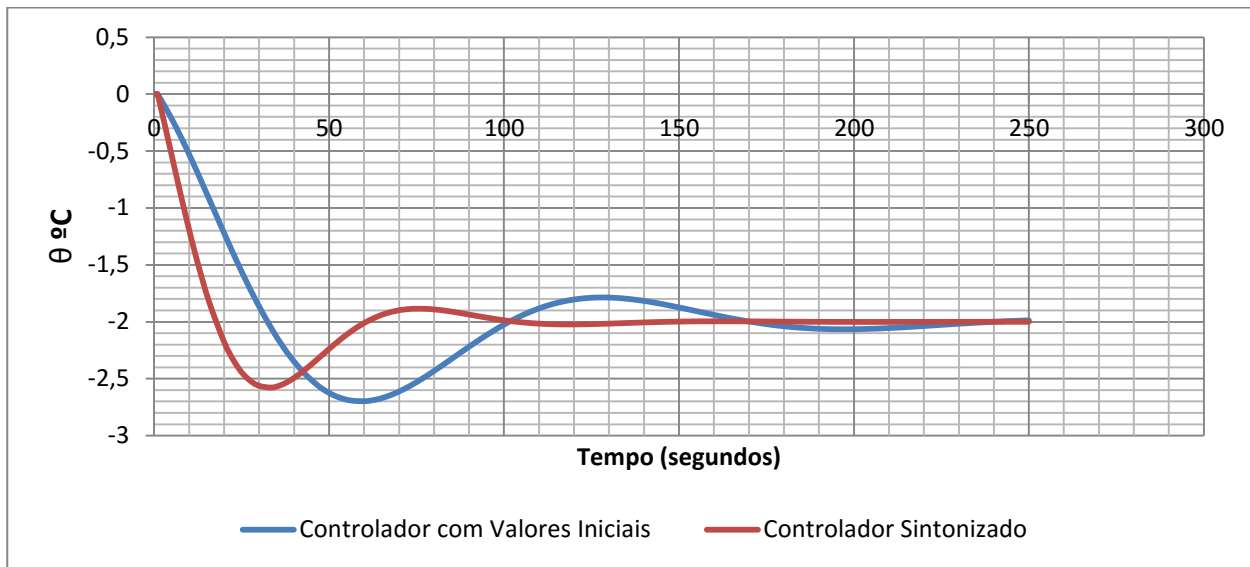
A análise experimental em comparação com a simulação no software Matlab<sup>®</sup> com os valores iniciais para os parâmetros  $K_P=10$ ,  $\tau_i=1$  e  $\tau_d=1$  no processo de sintonia também foram testados e são mostradas no Apêndice c. Foi adotado para o conjunto mecânico um ganho de variação maior, sendo de 3°C, e pode-se observar uma perda no tempo de estabilização e uma oscilação maior inicialmente.

A comparação da variação da temperatura de desvio, utilizando a simulação com os valores iniciais para os parâmetros  $K_P=10$ ,  $\tau_i=1$  e  $\tau_d=1$  e os valores sintonizados  $K_P=27,1667$ ,  $\tau_i=2,85$  e  $\tau_d=0,1167$  é mostrado na Figura 54.

Observa-se que com o controlador sintonizado, o tempo de estabilização é menor, cerca de 100 segundos e possui pouca oscilação. Já com o controlador operando com os parâmetros iniciais nota-se um tempo de estabilização maior, cerca de 250 segundos e uma oscilação maior. Assim, justifica-se a adoção dos parâmetros sintonizados para o controlador utilizando o critério *ISE* como índice de desempenho.



Figura 54: Comparação do Controlador Sintonizado com os Parâmetros Iniciais



Fonte: Autor

Utilizando os parâmetros sintonizados para o controlador *PID*, então foi verificado a variação da vazão de ar necessária para conseguir estabilizar a temperatura no interior do automóvel estacionado em  $42^{\circ}\text{C}$ .

A vazão de ar imposta pelos ventiladores em função do ângulo do servo motor foi obtida medindo a velocidade do ar através da área da secção transversal do ventilador por um anemômetro. Os resultados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Relação do Ângulo do Eixo do Servo Motor com a Vazão dos Ventiladores

Ângulo do eixo do servo Motor	Velocidade (m/s) Medida 1	Velocidade (m/s) Medida 2	Velocidade (m/s) Medida 3	Velocidade Média (m/s)	Vazão (L/s)
63	0,4	0,4	0,6	0,47	5,6
70	2,2	2,3	2,3	2,27	27,4
80	3,6	3,5	3,6	3,57	43,1
90	5,6	5,7	5,7	5,67	68,5
100	7,4	7,4	7,5	7,43	89,8
110	8,0	8,0	8,1	8,03	97,1
120	8,3	8,3	8,5	8,37	101,1
130	8,6	8,7	8,8	8,70	105,1
140	8,9	8,9	8,9	8,90	107,5
150	8,9	8,9	8,9	8,90	107,5
160	8,9	9,0	8,9	8,93	107,9
170	9,0	9,0	8,9	8,97	108,3
180	9,0	9,0	9,0	9,00	108,7

Fonte: Autor

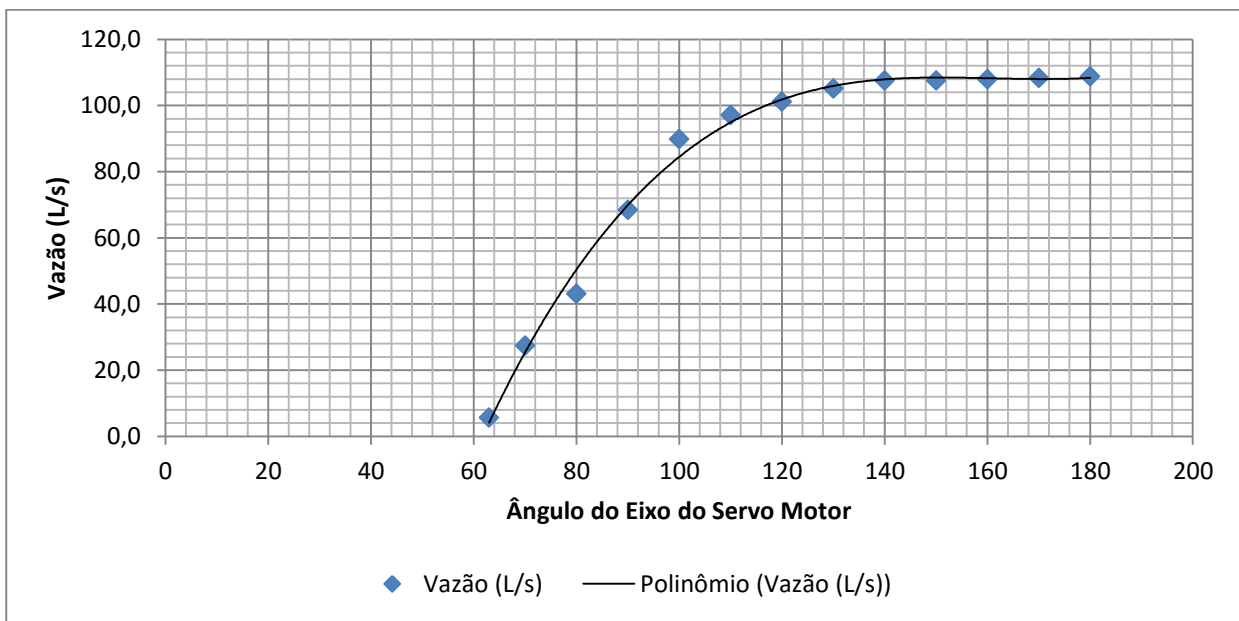
Com os valores da variação da vazão exercida pelo sistema de ventilação em função da posição do eixo do controlador, foi construída uma curva e obtida a equação que apresentou melhor correlação com os dados. A curva dos valores e a linha de tendência são mostradas na Figura 55.

A expressão da linha de tendência está definida na equação (12).

$$V = 1,1484 \cdot 10^{-4} P^3 - 0,0554 P^2 + 8,8747 P - 363,8051 \quad (12)$$

em que V é a vazão dos ventiladores em L/s por segundos e P é a posição do eixo do servo motor em graus.

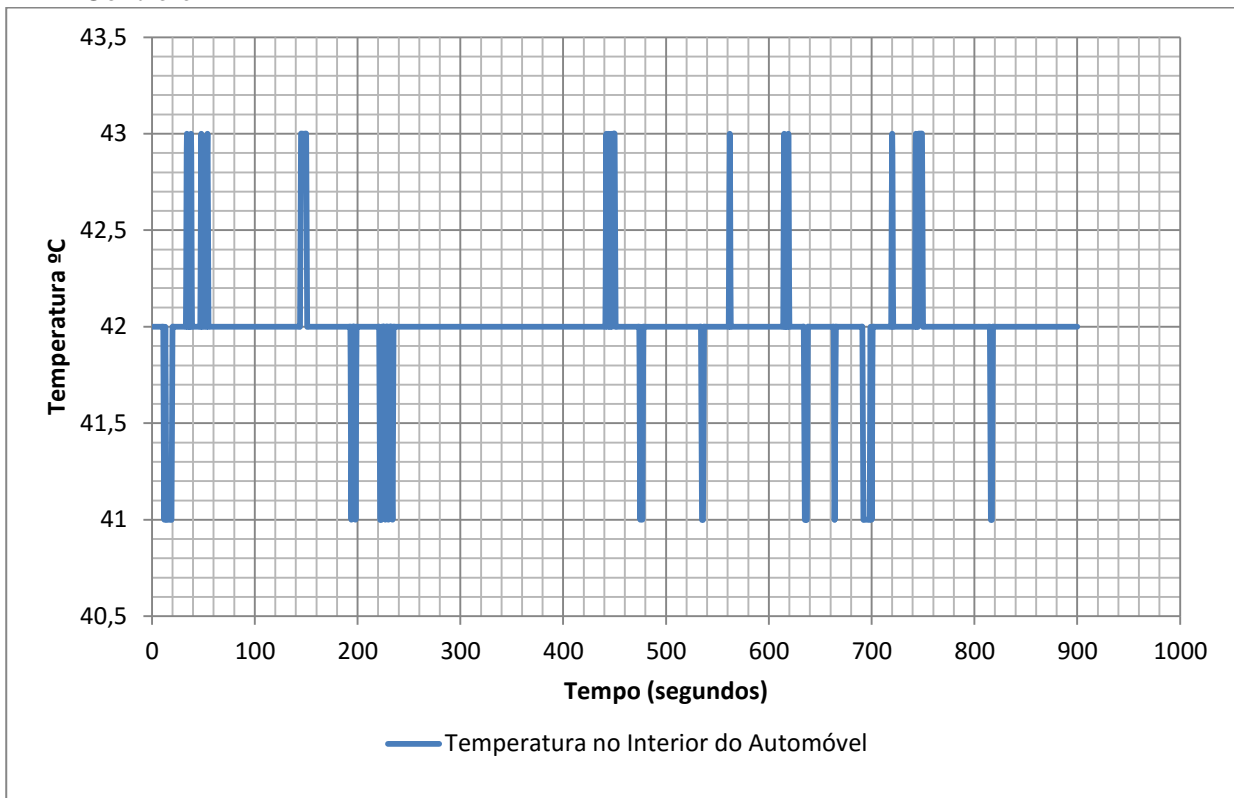
Figura 55: Variação da Vazão com a Posição do Eixo do Controlador



Fonte: Autor

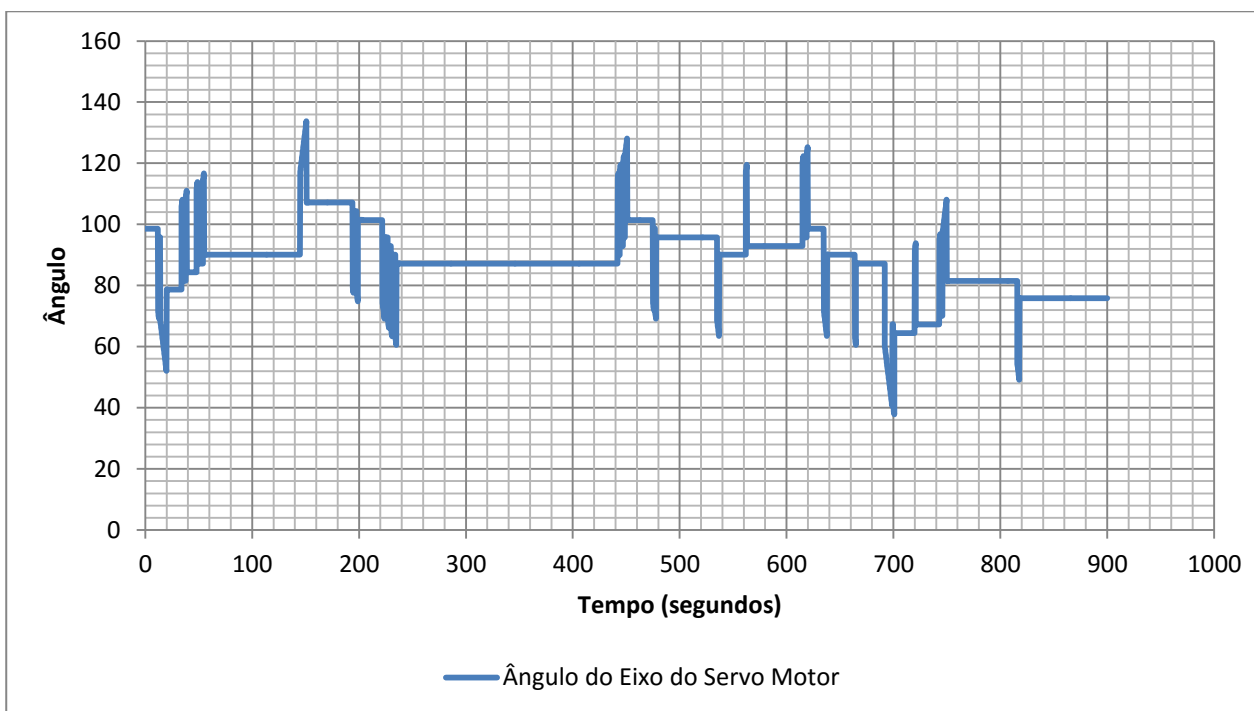
Os resultados obtidos da variação da temperatura, da variação do posicionamento do eixo do sistema de controle e da variação da vazão de ar exercida pelos ventiladores com o automóvel estacionado durante um período de aquecimento são mostrados na Figura 56, Figura 57, Figura 58, respectivamente. Os valores foram obtidos durante um intervalo de tempo de 15 minutos (900 segundos) durante o período de maior aquecimento do automóvel, aproximadamente as 14h00min.

Figura 56: Variação da Temperatura no Interior do Automóvel com Sistema de Controle



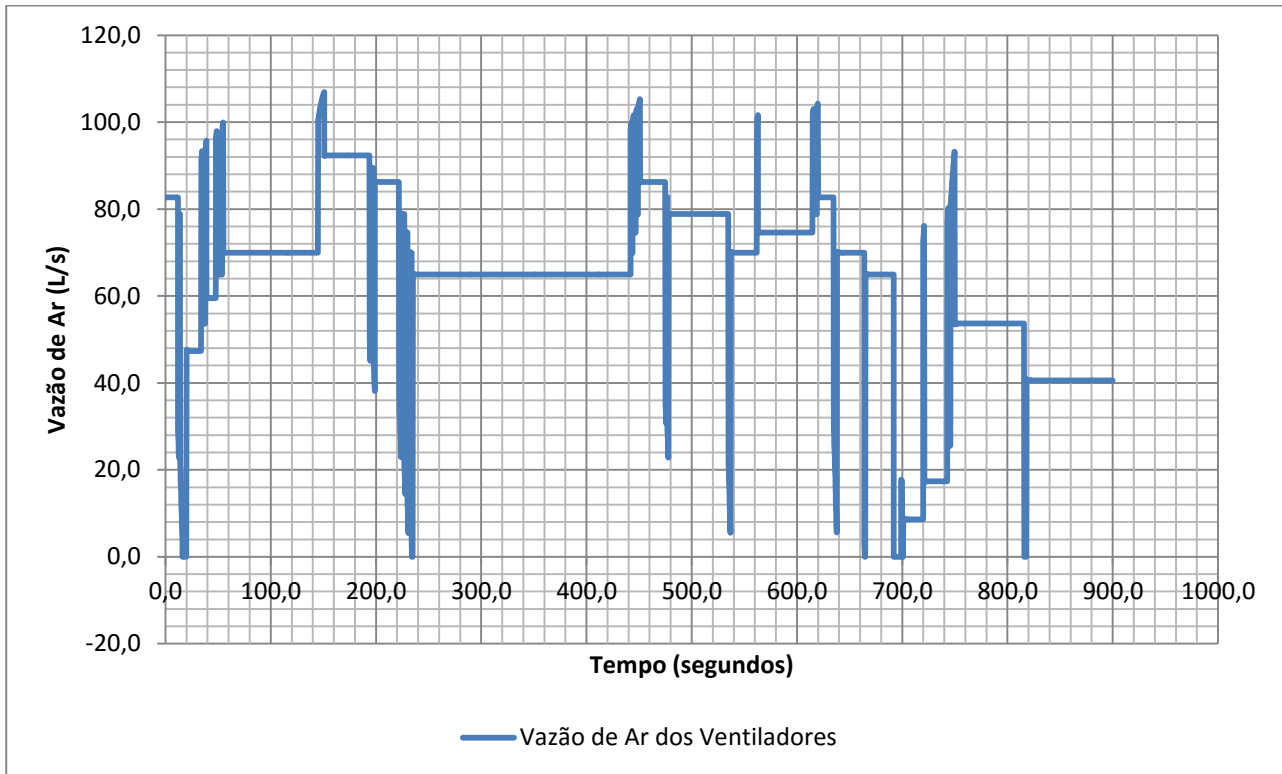
Fonte: Autor

Figura 57: Variação da Posição do Eixo do Sistema de Controle



Fonte: Autor

Figura 58: Variação da Vazão de Ar no Interior do Automóvel com Sistema de Controle



Fonte: Autor

Observa-se que o sistema de controle consegue manter a temperatura em 42°C (*Set Point*) com a temperatura variando entre 43°C e 41°C, que corresponde à mínima variação percebida pelo sistema de controle, de 1°C. A variação do posicionamento do eixo do sistema de controle ficou entre 40 e 134°, ressaltando que para um ângulo inferior à 63° os ventiladores são desligados e a vazão é nula. Também temos que, para os momentos em que a vazão máxima é exercida pelo sistema de ventilação, o valor alcançado foi de aproximadamente 106 L/s, ou seja, com esta vazão é possível estabelecer a mínima temperatura no interior do automóvel.

Saidur, Masjuki e Hasanuzzaman, 2009, conseguiram um decréscimo de 64,5°C para 52,1°C com sistema de ventilação com vazão de 52,15L/s. Com o sistema de ventilação proposto neste projeto, foi possível então reduzir a temperatura média próximo ao corpo do motorista de aproximadamente 66°C para 42°C com um sistema de ventilação com uma vazão de aproximadamente 106 L/s. Vale ressaltar que esta vazão seria nos momentos de vazão máxima no horário para temperaturas mais elevadas e também que os experimentos ocorreram em carros diferentes.

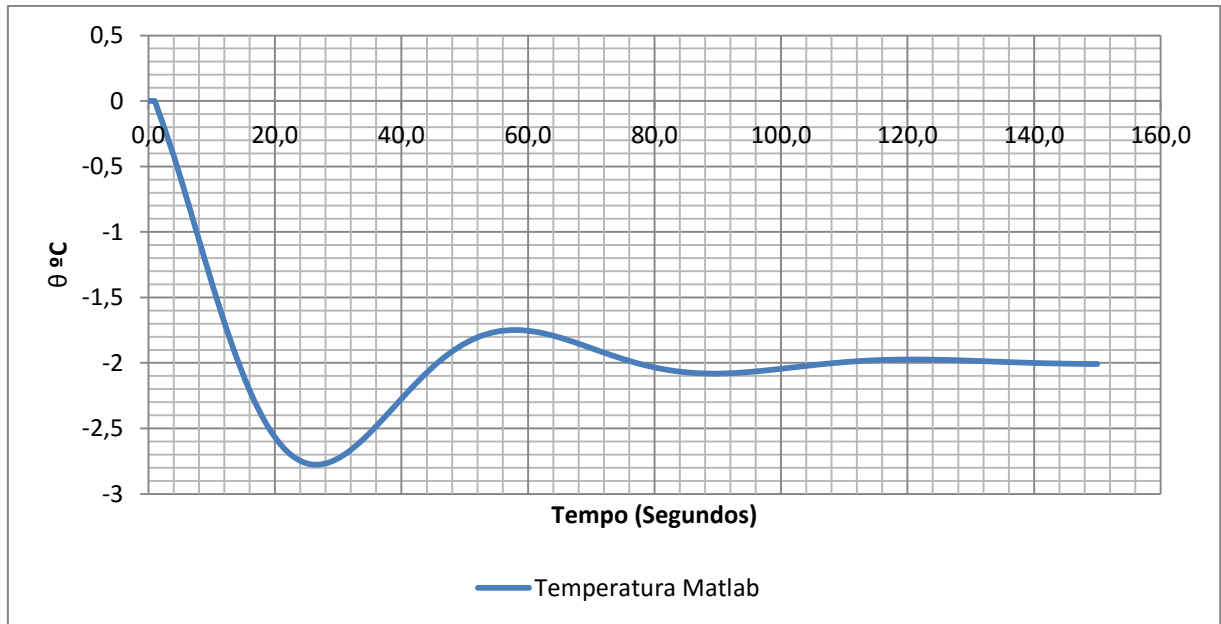
O controlador *PID* resultou em variações bruscas de velocidade do ar, por esse motivo um controlador *PI* (somente ações proporcional e integral) foi proposto com o modelo já validado. Esta configuração também foi abordada por meio da sintonia de parâmetros utilizando o critério *ISE*. Porém, os resultados foram analisados somente com a variação da temperatura pela simulação da malha de controle. As iterações para o processo de sintonia são apresentadas na Tabela 5. A temperatura de desvio é mostrada na Figura 59.

Tabela 5: Sintonia dos Parâmetros do Controlador *PI*

<b>Iteração</b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>\tau_i</math></b>	<b>Erro-ISE</b>
<b>1</b>	10	1	0,0553
<b>2</b>	10,5	1	0,0536
<b>3</b>	10	1,05	0,053
<b>4</b>	10,5	1,05	0,0513
<b>5</b>	10,75	1,075	0,0495
<b>6</b>	10,25	1,125	0,049
<b>7</b>	10,125	1,1875	0,047
<b>8</b>	10,875	1,2125	0,0441
<b>9</b>	11,3125	1,2937	0,0406
<b>10</b>	10,6875	1,4063	0,0412
<b>11</b>	11,875	1,5125	0,0367
<b>12</b>	12,75	1,675	0,0329
<b>13</b>	13,375	1,5625	0,0335
<b>14</b>	14,8125	1,9437	0,0272
<b>15</b>	16,5625	2,2687	0,0229
<b>16</b>	15,9375	2,3813	0,0227
<b>17</b>	17,2188	2,7906	0,0195
<b>18</b>	21,0313	3,3844	0,0152
<b>19</b>	25,1719	4,2391	0,0117
<b>20</b>	25,8281	4,7609	0.0106

Fonte: Autor

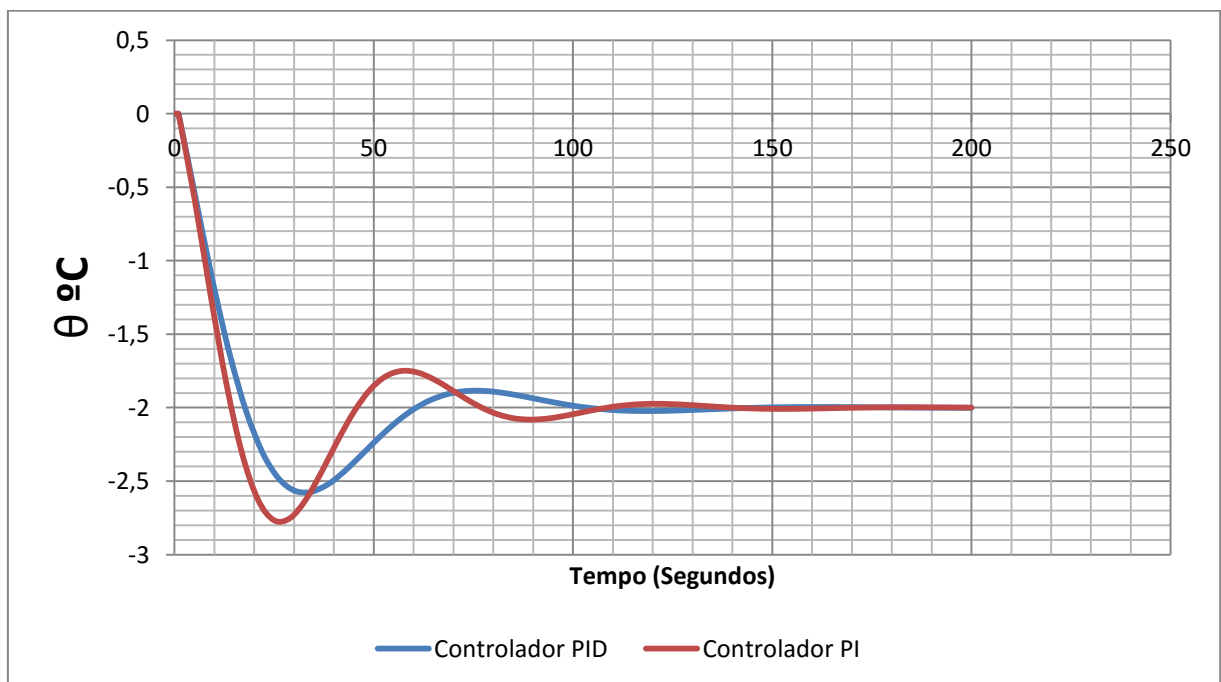
Figura 59: Temperatura de Desvio para o Controlador PI



Fonte: Autor

A comparação entre a variação da temperatura pela simulação da malha de controle utilizando o controlador *PID* e o *PI* é mostrado na Figura 60.

Figura 60: Comparação entre Controlador PID e PI



Fonte: Autor

Observa-se que o tempo de estabilização da temperatura para ambos os controladores é aproximadamente 100 segundos, e as variações são próximas para os dois processos sendo que a variação da temperatura para o controlador *PI* atinge um pico mínimo de aproximadamente  $-2,8^{\circ}\text{C}$  enquanto que para o controlador *PID* o pico mínimo é de aproximadamente  $-2,6^{\circ}\text{C}$ .

## 5 CONCLUSÃO

A construção de um sistema de aquisição de dados e de um sistema de ventilação possibilitou a obtenção de uma temperatura de  $42^{\circ}\text{C}$  no interior de um automóvel estacionado durante um período de aquecimento, bem abaixo da temperatura média obtida com o veículo sem o sistema de ventilação de aproximadamente  $66^{\circ}\text{C}$ . Saidur, Masjuki e Hasanuzzaman, 2009, conseguiram um decréscimo de aproximadamente  $64,5^{\circ}\text{C}$  para  $52,1^{\circ}\text{C}$  utilizando um sistema de ventilação com um fluxo constante de 52,15 L/s (Ventilador Forte), ou seja, os ventiladores funcionam com potencia total durante todo o período de aquecimento. Já a utilização de um controlador *PID* com parâmetros sintonizados possibilitou estabelecer o controle do fluxo de ar suficiente para alcançar a mínima temperatura possível dentro do automóvel sendo a vazão máxima de aproximadamente 106 L/s.

O processo de otimização utilizando o critério *ISE* permitiu o alcance de um melhor resultado reduzindo o tempo de estabilização e com menos oscilações da temperatura. Assim, fica caracterizado que o *ISE* é um bom meio para determinação dos parâmetros do controlador, mas ressalta-se que em sua análise final, deve-se comparar a curva de resposta simulada com a curva de atuação experimental dos atuadores, para não haver diferenças significativas entre os processos.

A redução na temperatura interna do veículo permite o alcance de mais conforto ao motorista no momento de entrar no veículo após um período de aquecimento estacionado sob a luz solar assim como aumenta a vida útil dos componentes internos do automóvel devido à diminuição da temperatura. Uma carga térmica menor também é requerida pelo sistema de ar condicionado, se este for ligado, uma vez que o ambiente se encontra a uma temperatura mais baixa.

A adoção de um sistema de ventilação faz com que haja uma renovação do ar no ambiente interno do veículo, evitando assim o acúmulo de compostos orgânicos voláteis prejudiciais à saúde humana.

Ressalta-se neste trabalho a importância do microcontrolador Arduino, um equipamento de baixo custo cujo uso vem se expandindo nos centros de pesquisas e no meio acadêmico. Sua integração com o software Matlab<sup>®</sup> possibilita a realização de ações complexas para sistemas de aquisição de dados e sistemas de controle, que foram utilizadas neste projeto alcançando resultados importantes para pesquisas tecnológicas.

Como sugestões para trabalhos futuros, seria interessante o estudo de um sistema solar para geração de energia para alimentação do sistema de ventilação e controle da temperatura, uma vez que a potência deste conjunto é baixa, células fotovoltaicas poderiam facilmente acionar os sistemas. Também seria oportuno um sistema de ventilação agregado ao design do carro que não influenciasse em suas características externas.

A economia de combustível por meio da diminuição da carga térmica do ar condicionado também merece a atenção para futuros trabalhos, pois a quantidade exata de combustível a ser economizado depende de fatores práticos, como o rendimento do motor ao ser ligado e o tempo necessário até atingir a temperatura desejada, que depende do rendimento do compressor no início do seu trabalho para refrigerar o ambiente. O custo do sistema, embora apresente um valor considerável, justifica a economia de combustível a ser gerada e a contribuição para o meio ambiente, ajudando a reduzir o efeito estufa através do consumo de combustível.



## REFERÊNCIA

- ADVANCEDG-12. Dimmer. **AdvancedG-12**, 2016. Disponível em: <<http://advancedg12.com.br/>>. Acesso em: 09 Agosto 2016.
- ALAHMER, A. et al. Vehicular Thermal Comfort Models: A Comprehensive Review. **Applied Thermal Engineering** **31**, 2011. 995-1002.
- ARDUINO. Arduino. **Arduino**, 2016. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 10 maio 2016.
- ÂSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. Instrument Society of America. South Carolina. 1995.
- ÂSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. Revisiting the Ziegler-Nichols Step Response Method for PID Control. **Journal of Process Control**, 2004. 635-650.
- BANZI, M. **Primeiros Passos com Arduino**. Tradução de Rafael Zanolli. 1. ed. São Paulo: Novatec , v. 1, 2011.
- BERNSTEIN, D. Self- Assessment and Shelf- Assessment. **IEEE Control Systems Magazine**, New York, v. 26, p. 26-29, Fevereiro 2006. ISSN 1.
- BRAGA, N. C. **Curso de Eletrônica - Semicondutores de Potência**. São Paulo: Newton C. Braga, v. 7, 2014. 245-260 p.
- CANDELAS, F. A. et al. Experiences on Using Arduino for Laboratory Experiments of Automatic Control and Robotics. **IFAC-International Federation of Automatic Control**, Alicante, Espanha, 2015. 105-110.
- CERCHIARO, D. F. **Controle de Temperatura de um Trocador de Calor**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.
- CHAPMAN, S. J. **Programação em MATLAB para Engenheiros**. Tradução de Flávio Soares Correa da Silva. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.
- COHEN, G. H.; COON, G. A. Theoretical Considerations of Retarded Control. **ASME Transactions**, 1953. 827-834.
- CONCEIÇÃO, W. A. D. S. **Interação do Projeto de Processos Integrados com o Projeto do Controlador**. Universidade Estadual de Maringá. Maringá. 2007.
- ELETROGATE. Eltrogate. **Site da Eletrogate**, 2016. Disponível em: <<http://www.eletrogate.com/pd-13a495-lm35dz-sensor-temperatura.html?ct=&p=1&s=1>>. Acesso em: 16 Maio 2016.

ELETRÔNICA, B. D. Circuito Integrado CD4051 Multiplexador. **Bau da Eletrônica**, 2016. Disponível em: <<http://www.baudaeletronica.com.br/circuito-integrado-cd4051-multiplexador-demultiplexador.html>>. Acesso em: 16 Maio 2016.

FARZANEH, Y.; TOOTOONCHI, A. A. Controlling Automobile Thermal Comfort Using Optimized. **Applied Thermal Engineering** **28**, 2008. 1906–1917.

FERMINO, F. **Estudo Comparativo de Métodos de Sintonia de Controladores PID**. Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2014.

FILHO, A. V. **Avaliação da Qualidade do Ar de Cabines de Veículos Automotores Recém-manufaturados**. São Paulo. 2008.

GIGACURSOS. Gigacursos. **Gigacursos**, 2014. Disponível em: <[www.gigacursos.com](http://www.gigacursos.com)>. Acesso em: 26 Outubro 2014.

GOMES, A. B. **Avaliação Experimental de Condições de Conforto Térmico em Automóveis de Passeio Utilizando Manequim**. São Paulo. 2005.

GOMES, E. L. B.; TAVARES, L. A. **Uma Solução com Arduino Para Controlar e Monitorar Processos Industriais**. Instituto Nacional de Telecomunicações. Santa Rita do Sapucaí- inas Gerais. 2013.

GOMES, S. A. P. **Comparação Entre Métodos de Identificação de Plantas Com Respostas ao Degrau Monotonicamente Crescentes e Sitonia de Controladores PID**. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro. 2008.

HUANG, K. D. et al. Intelligent solar-powered automobile-ventilation system. **Applied Energy** **80**, 2005. 141–154.

HUANG, K. D. et al. Air-Conditioning System of an Intelligent Vehicle-Cabin. **Applied Energy**, Taiwan, 2006. 545 – 557.

INSTRUMENTS, T. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. **Texas Instrument**, 2016. Disponível em: <[www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf)>. Acesso em: 10 Maio 2016.

MARCOS, D. et al. The Development and Validation of a Thermal Model for the Cabin of a Vehicle. **Applied Thermal Engineering**, Sevilha, Espanha, 2014. 646-656.

MATHWORKS. Matlab. **Mathworks**, 2016. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/>>. Acesso em: 16 Maio 2016.

MEZRHAB, A.; BOUZIDI, M. Computation of Thermal Comfort Inside a Passenger Car Compartment. **Applied Thermal Engineering**, **26**, 2006. 1697–1704.

MICROPIK. SG90Servo. **Micropik**, 2016. Disponível em: <<http://www.micropik.com/PDF/SG90Servo.pdf>>. Acesso em: 16 Maio 2016.

MOREIRA, A. S.; PORTELA, A. M.; SILVA, R. Uso da Plataforma Arduino no Desenvolvimento de Soluções Tecnológicas Para Pesquisas de Dados Atmosféricos na Amazônia. **Revista Perspectiva Amazônica**, Santarém, Pará, p. 119-126, 2012. ISSN Ano 3 Nº5.

OGUNNAIKE, B. A.; RAY, W. H. **Process Dynamics, Modeling, and Control**. New York: Oxford University Press, 1994.

PEREIRA, L. V. M.; LOURENÇO, R. S.; PEREIRA, C. C. **Estudo Experimental de um Sistema de Ventilação Veicular**. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Campina Grande, Paraíba, Brasil: [s.n.]. 2010.

RODRIGUES, J. M. **Evolução da Frota de Automóveis e Motos no Brasil 2001-2012 (Relatório 2013)**. Rio de Janeiro. 2013.

SAIDUR, R.; MASJUKI, H. H.; HASANUZZAMAN, M. Performance of an Improved Solar Car Ventilator. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)**, Vol. 4, 2009. 1, 24 -34.

THIMOTIO, F. S. **Simulated Annealing Aplicado ao Problema de Sintonia de Parâmetros de Controladores PID**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro preto. 2005.

VENTISILVA. Micro-Ventilador Axial Ventisilva Modelo E14NYCD. **Ventisilva**, 2016. Disponível em: <<http://www.ventisilva.com.br/micro-ventilador-axial-e14-nycd-40p>>. Acesso em: 28 Maio 2016.

WEBER, R. F. **Fundamentos de Arquitetura de Computadores**. 4ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

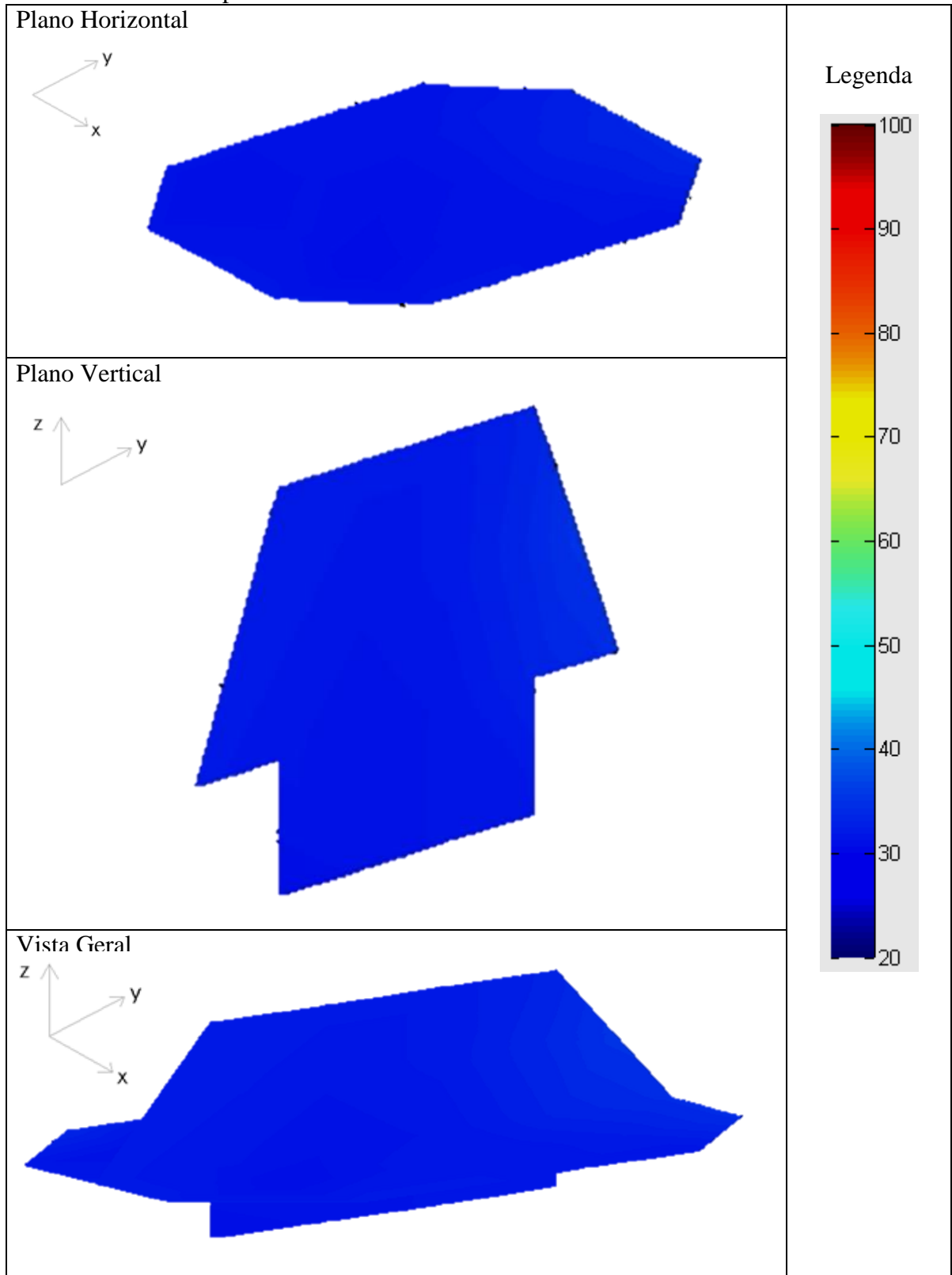
ZHANG, H. et al. Studies of Air-Flow and Temperature Fields Inside a Passenger Compartment for Improving Thermal Comfort and Savy Energy. Part I: Test / Numerical Model and Validation.. **Applied Thermal Engineering**, 2009. 2022-2027.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum Settings For Automatic Controllers. **Transactions of the A.S.M.E**, 1942. 759-768.

## 6 APÊNDICE

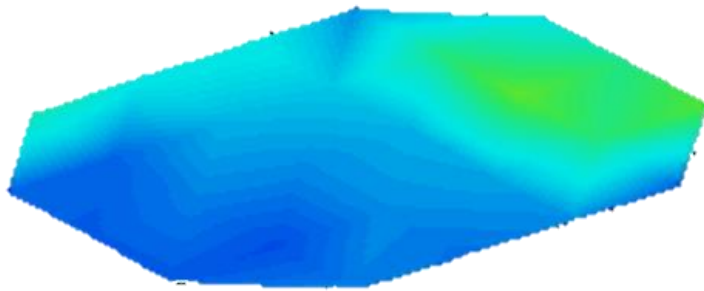
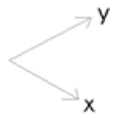
### 6.1 APÊNDICE A

Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 9h00min

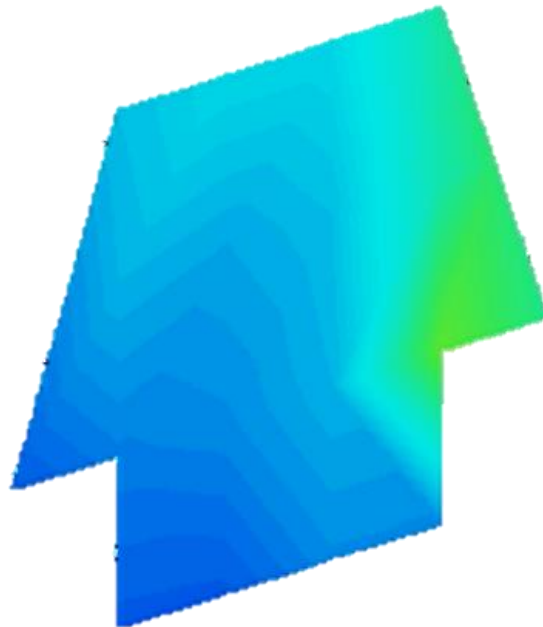


Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 10h00min

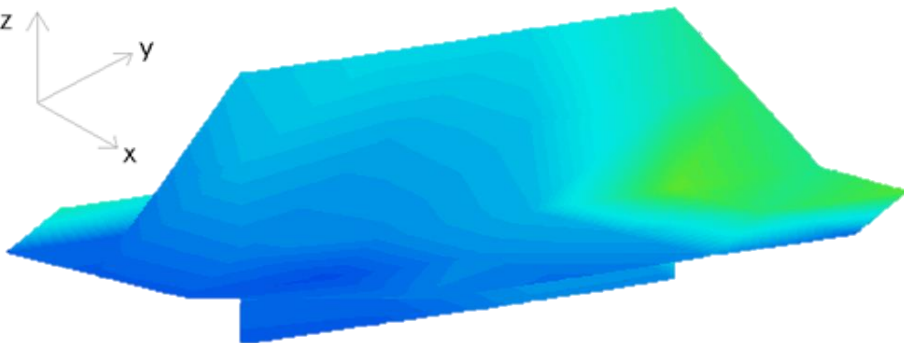
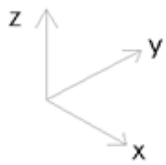
Plano Horizontal



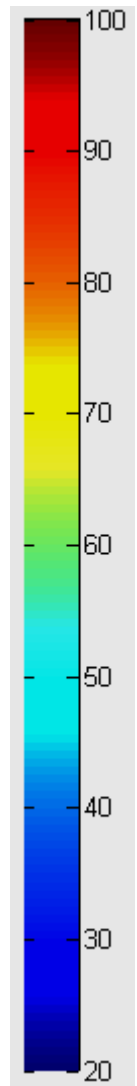
Plano Vertical



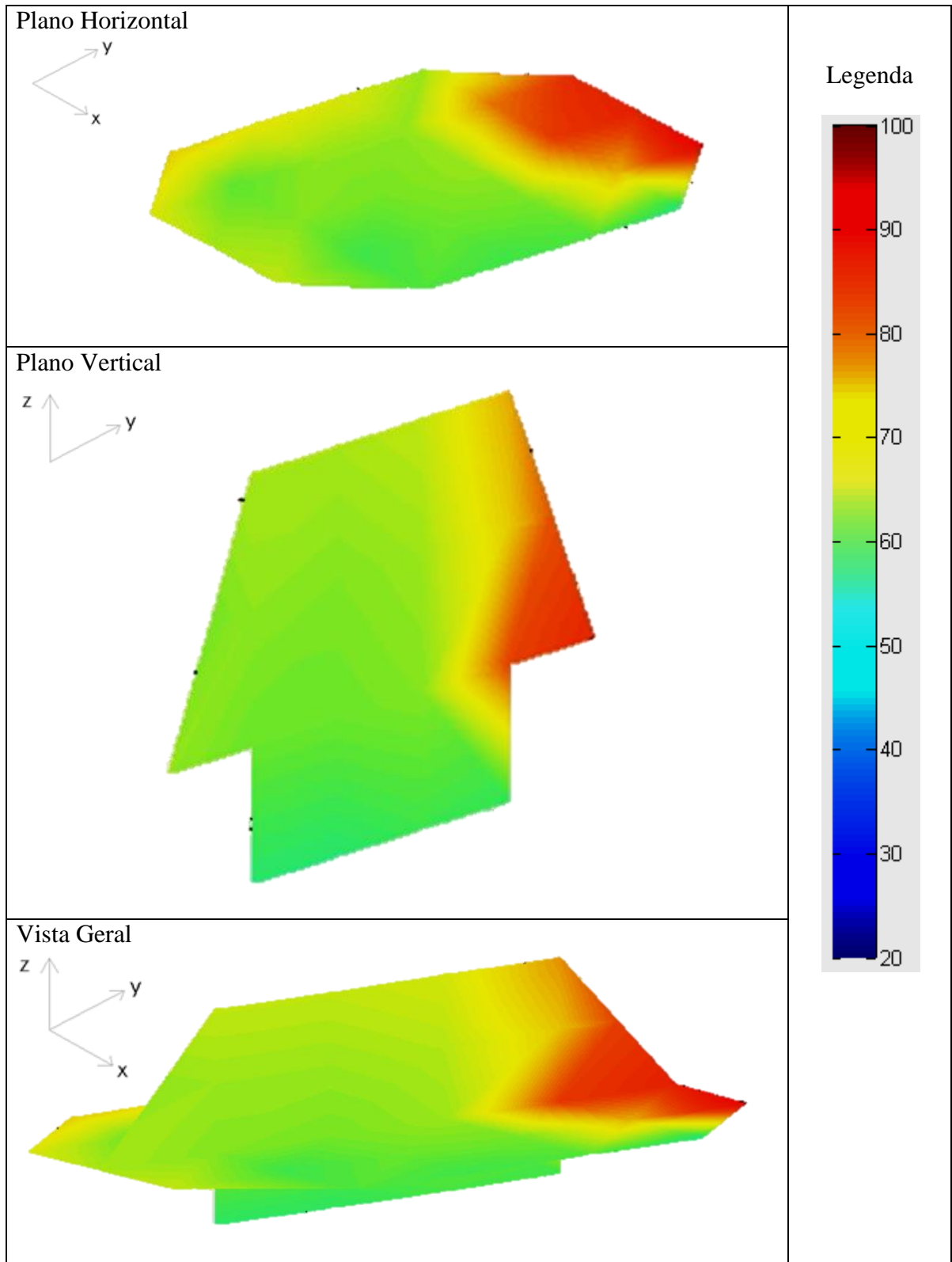
Vista Geral



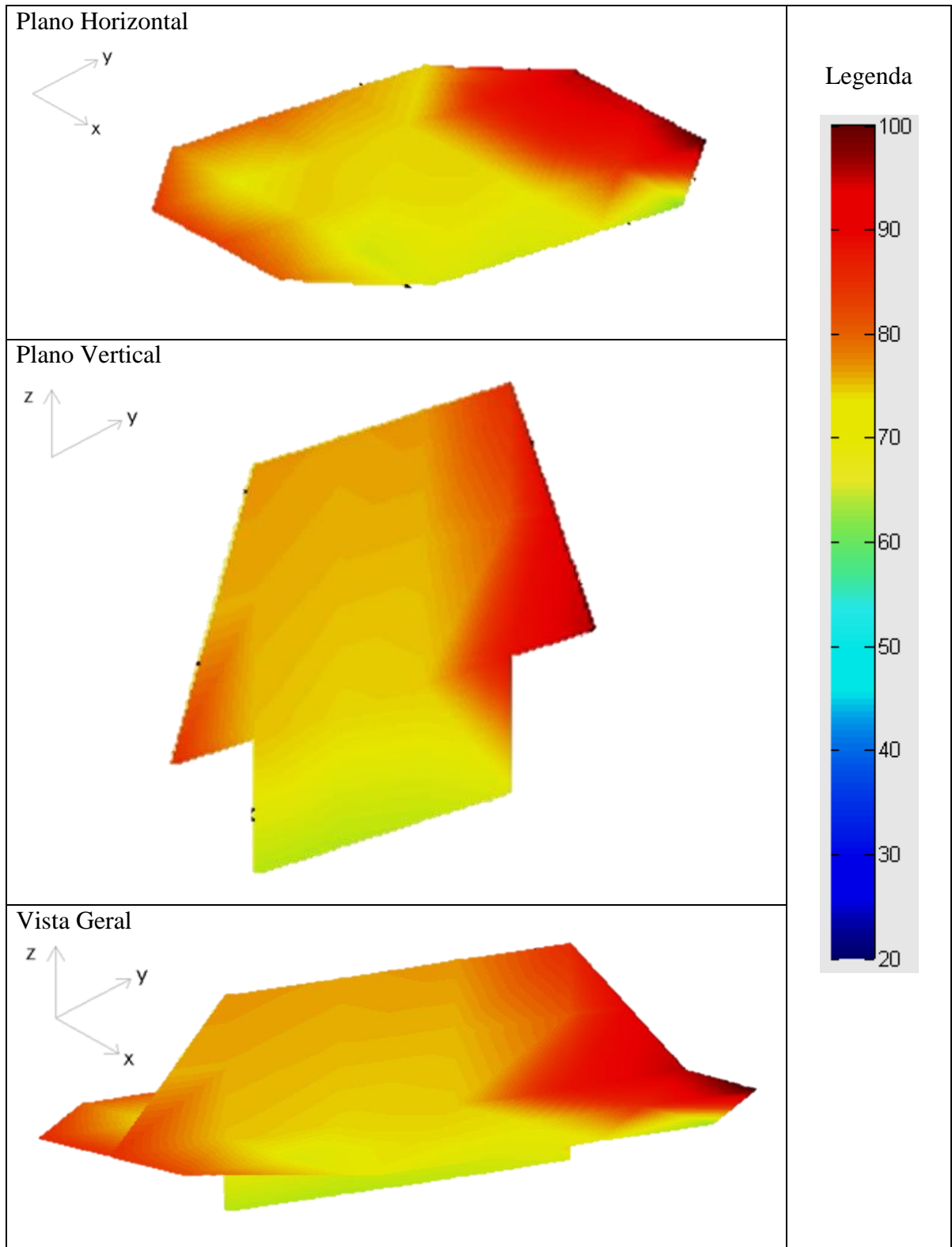
Legenda



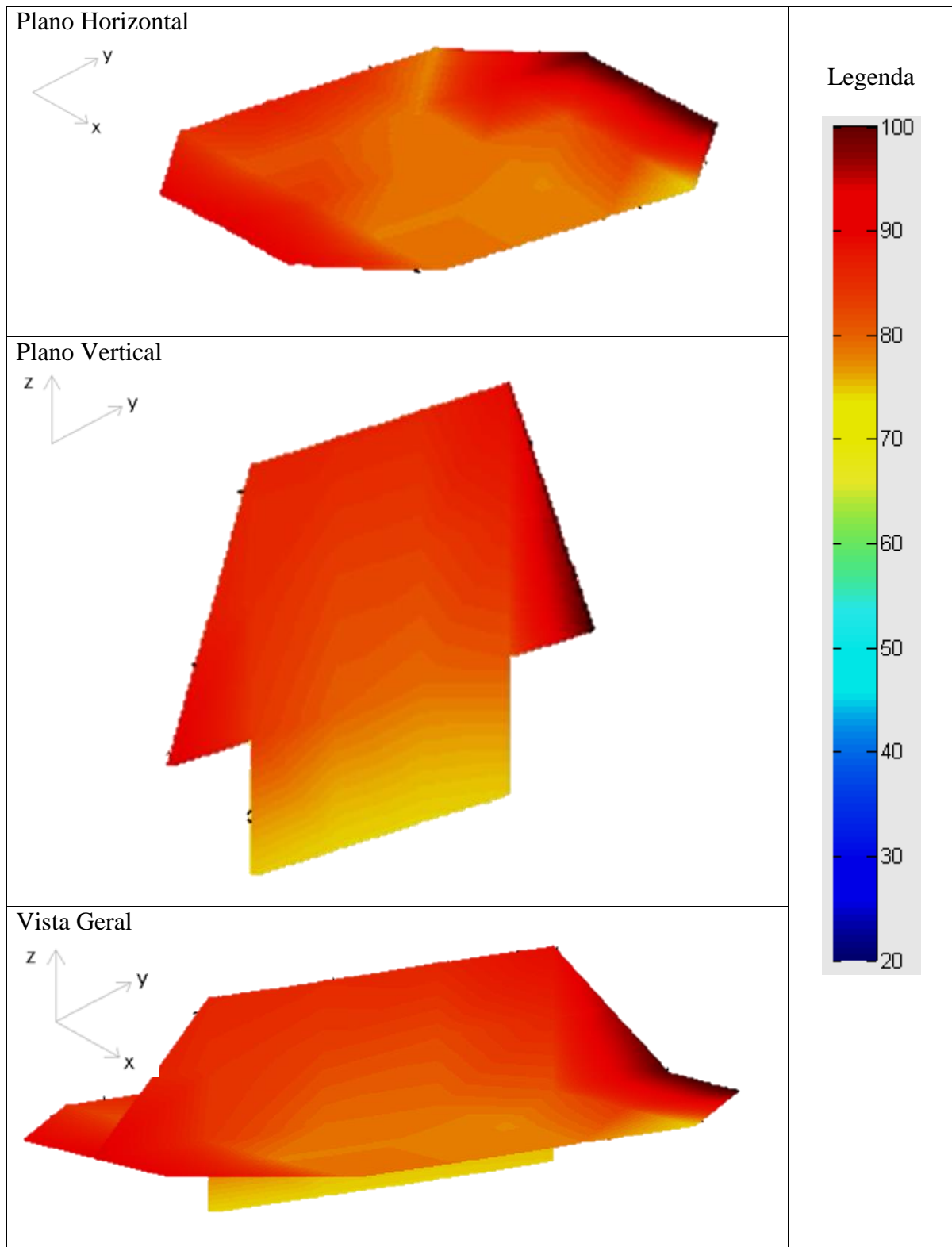
## Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 11h00min



## Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 12h00min

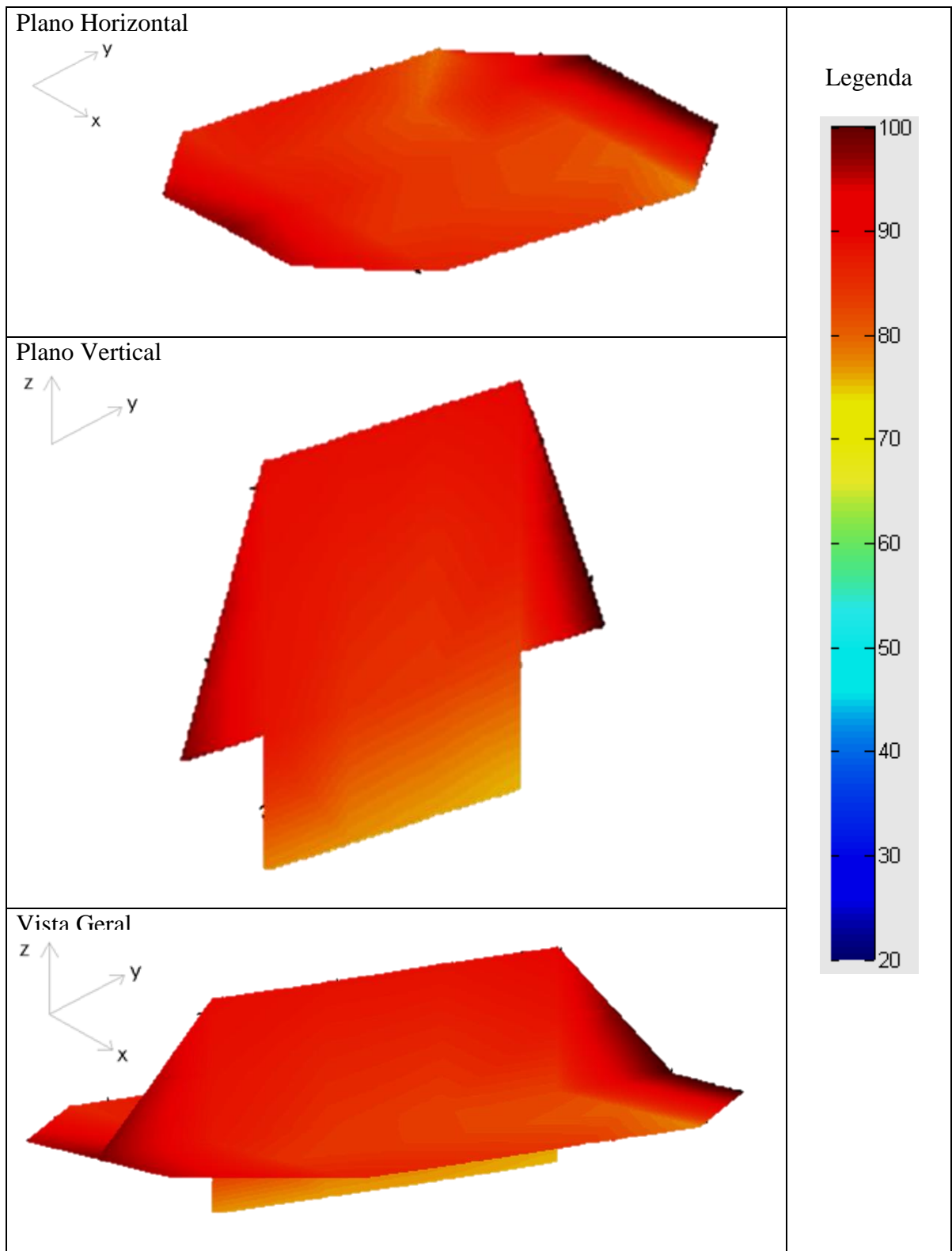


## Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 13h00min

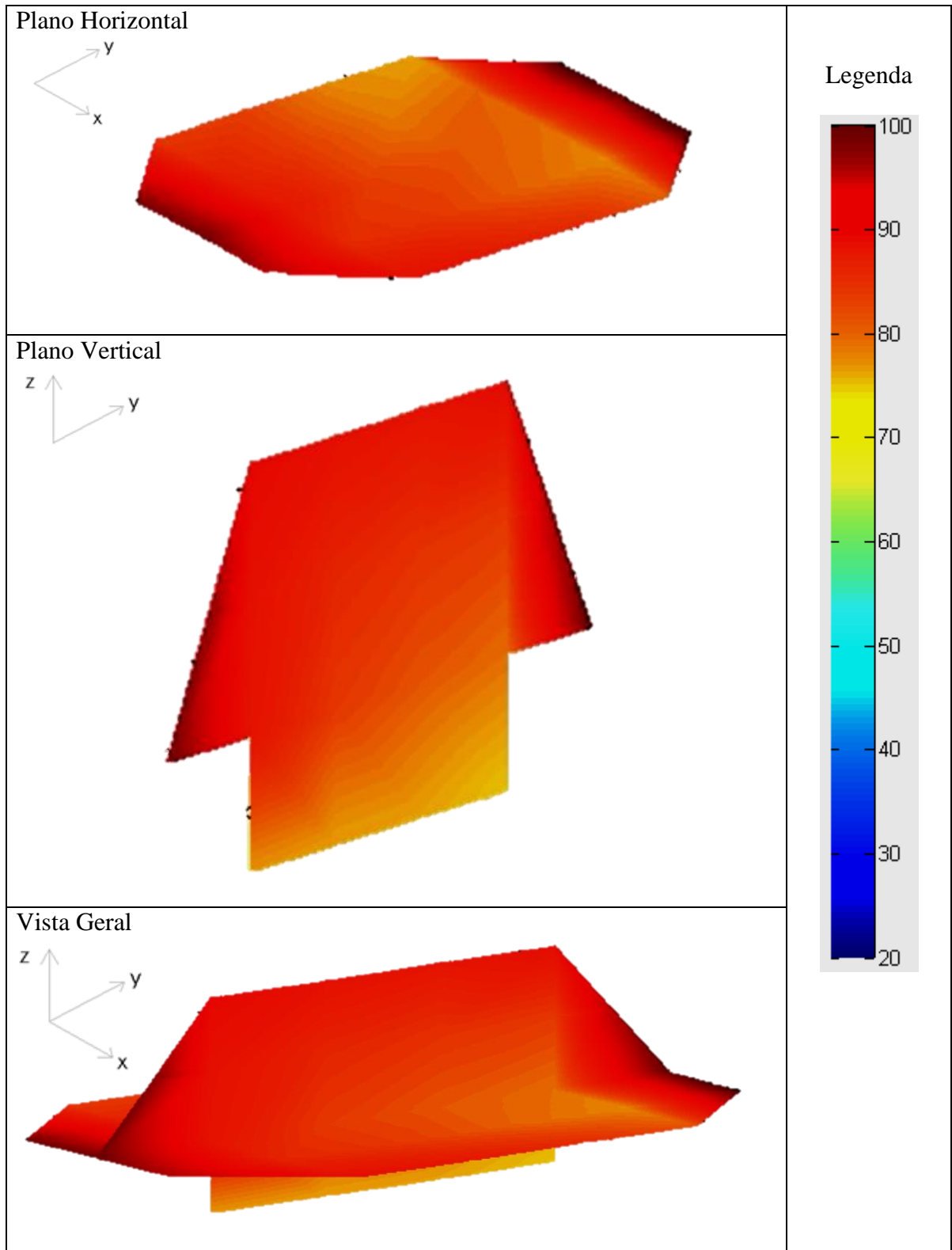




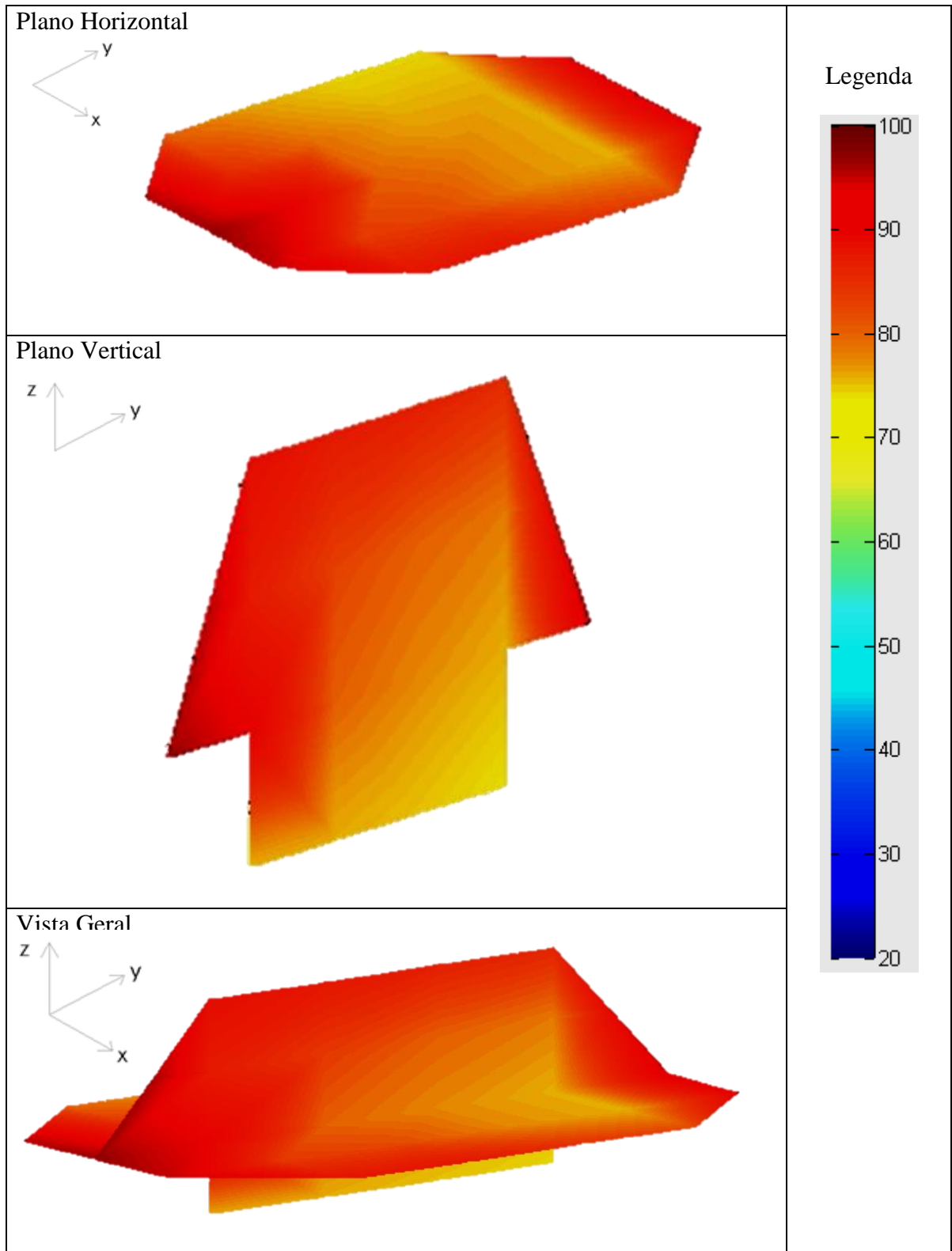
## Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 14h00min



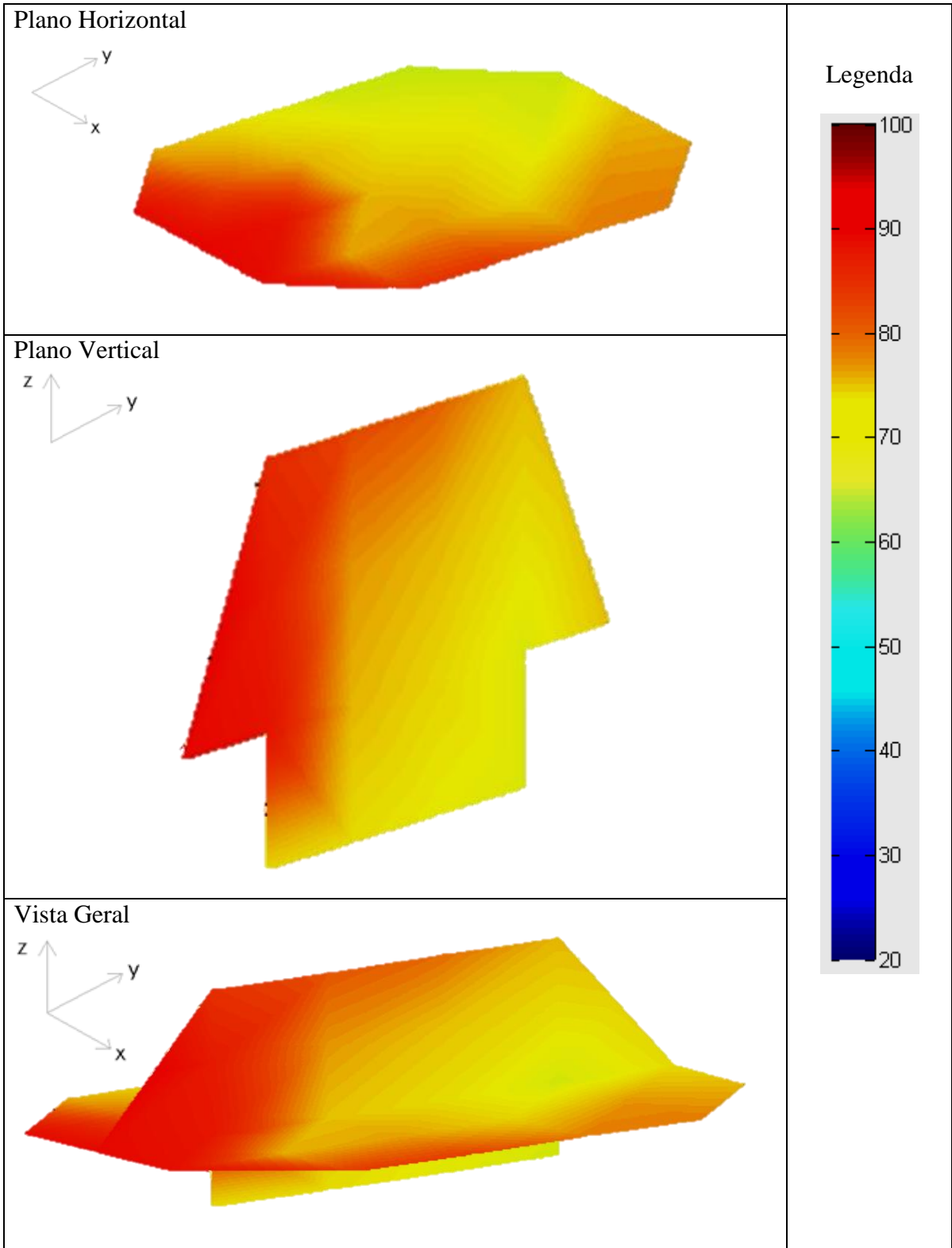
## Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 15h00min



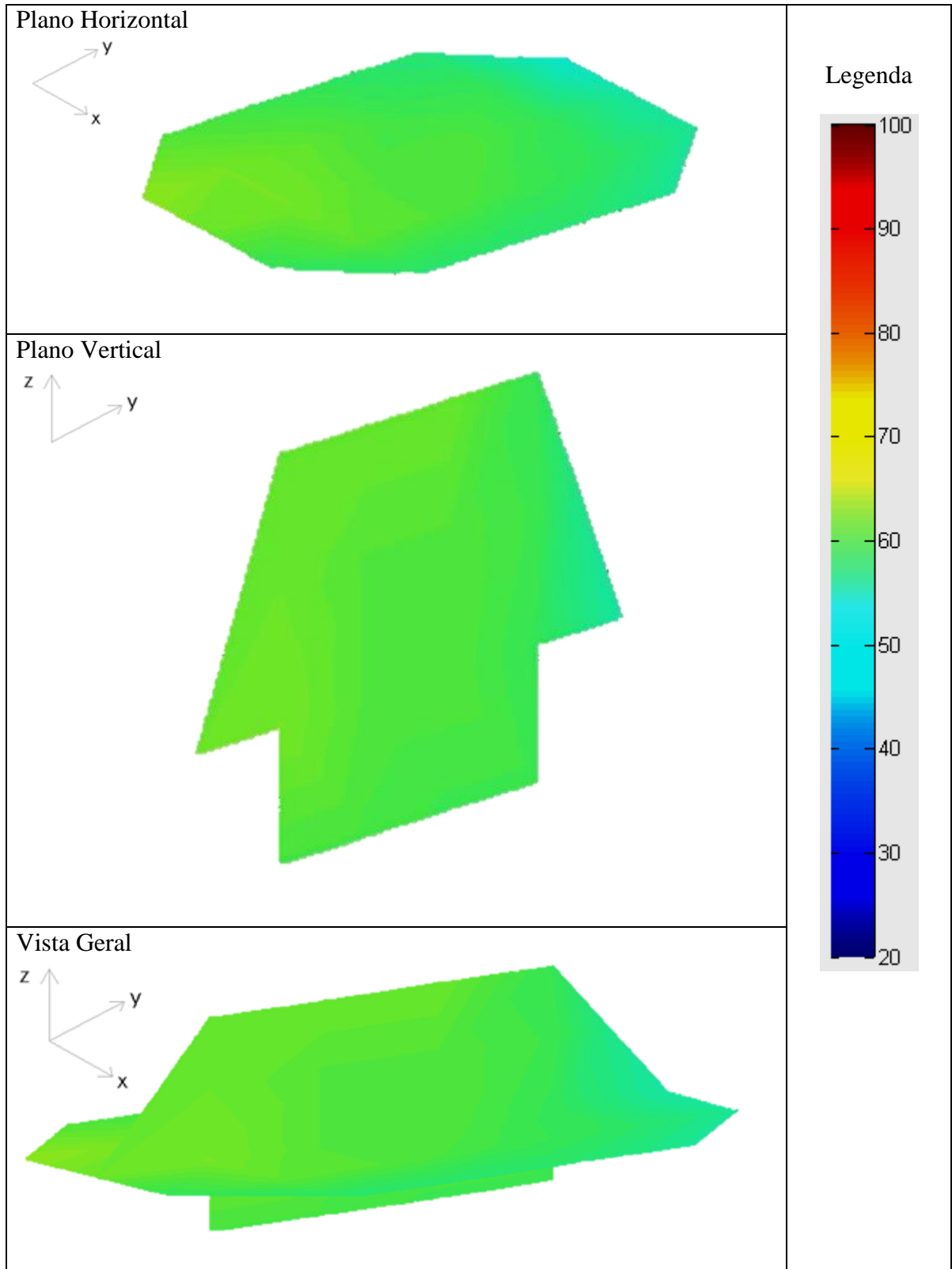
## Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 16h00min



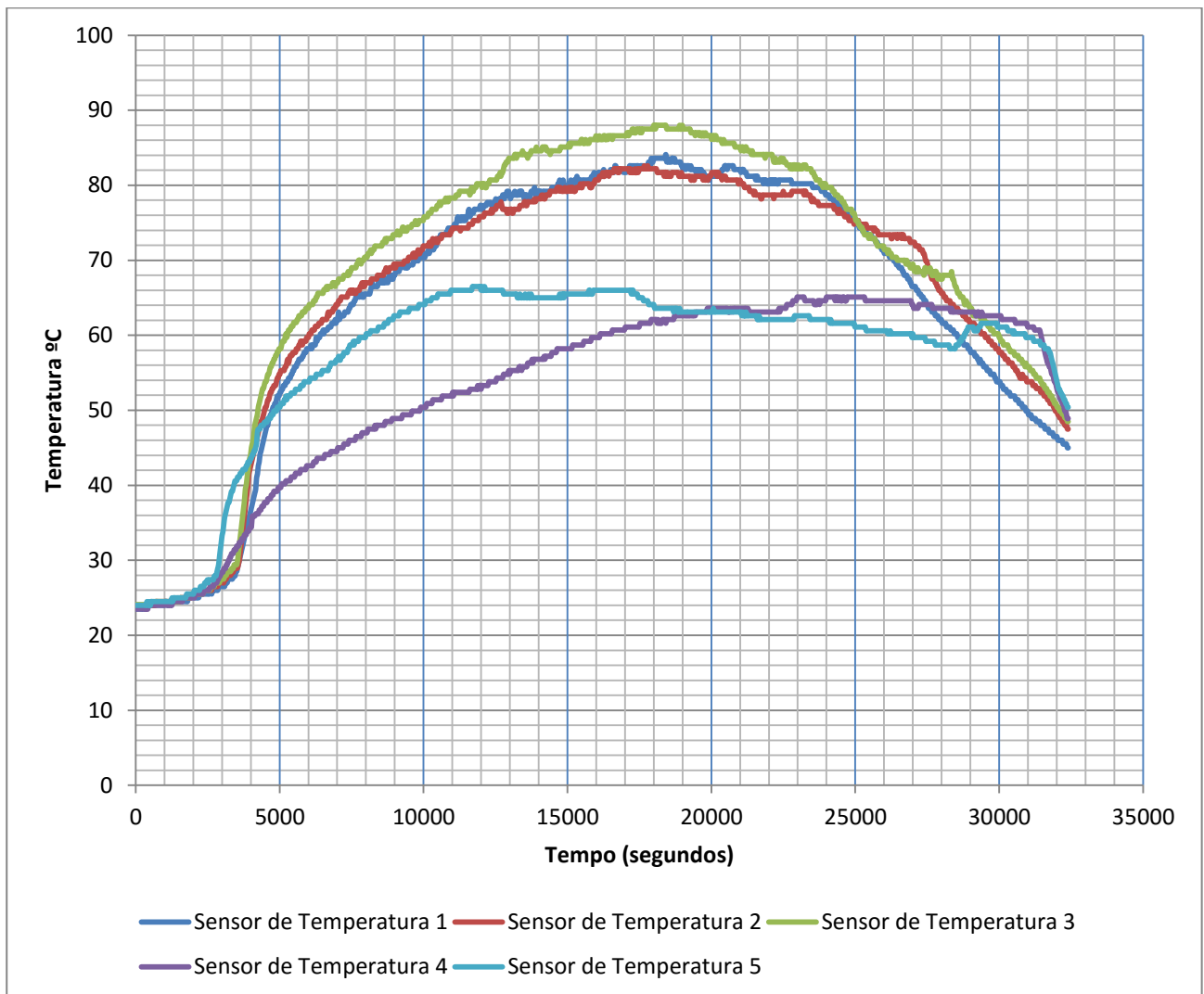
Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 17h00min

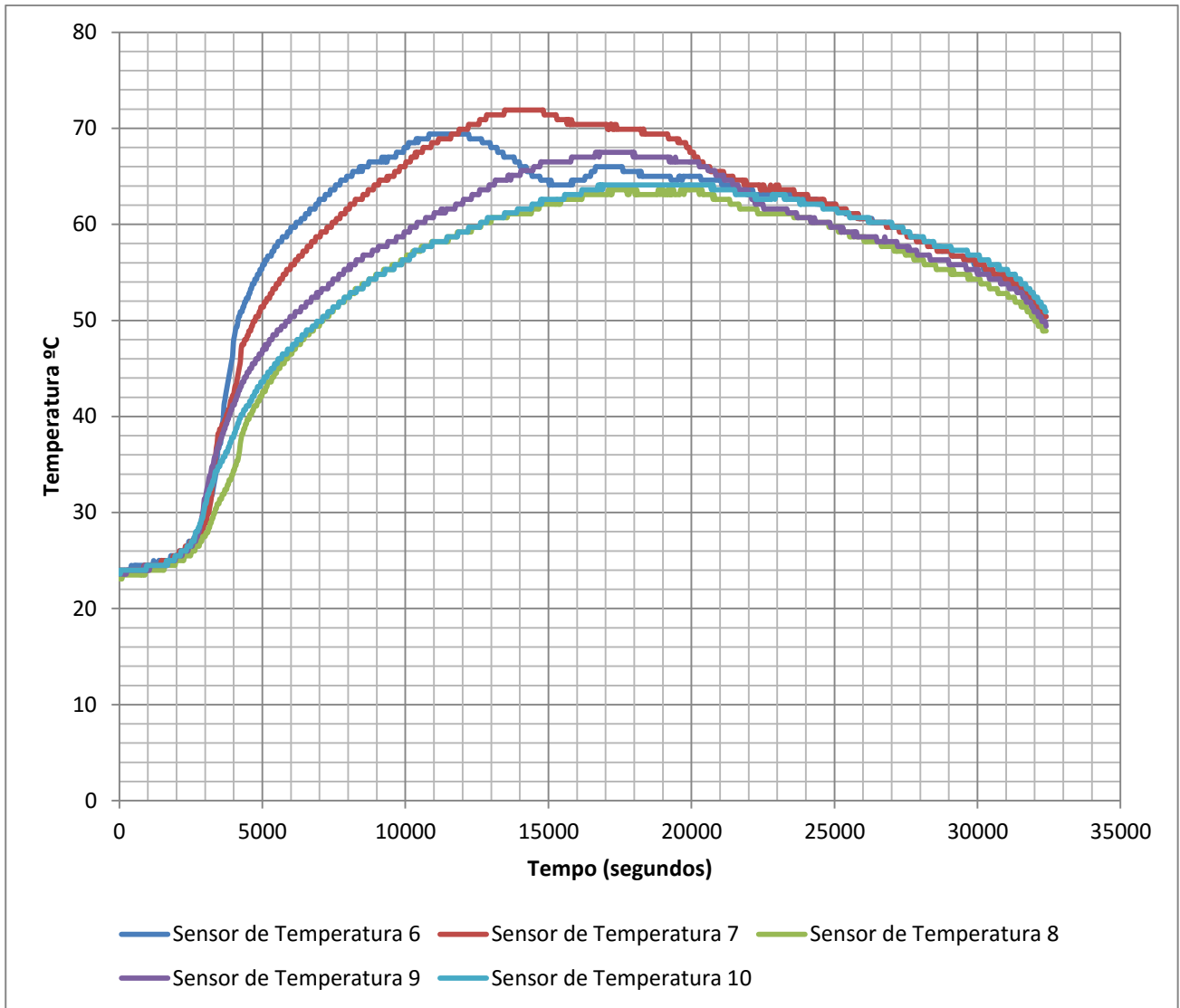


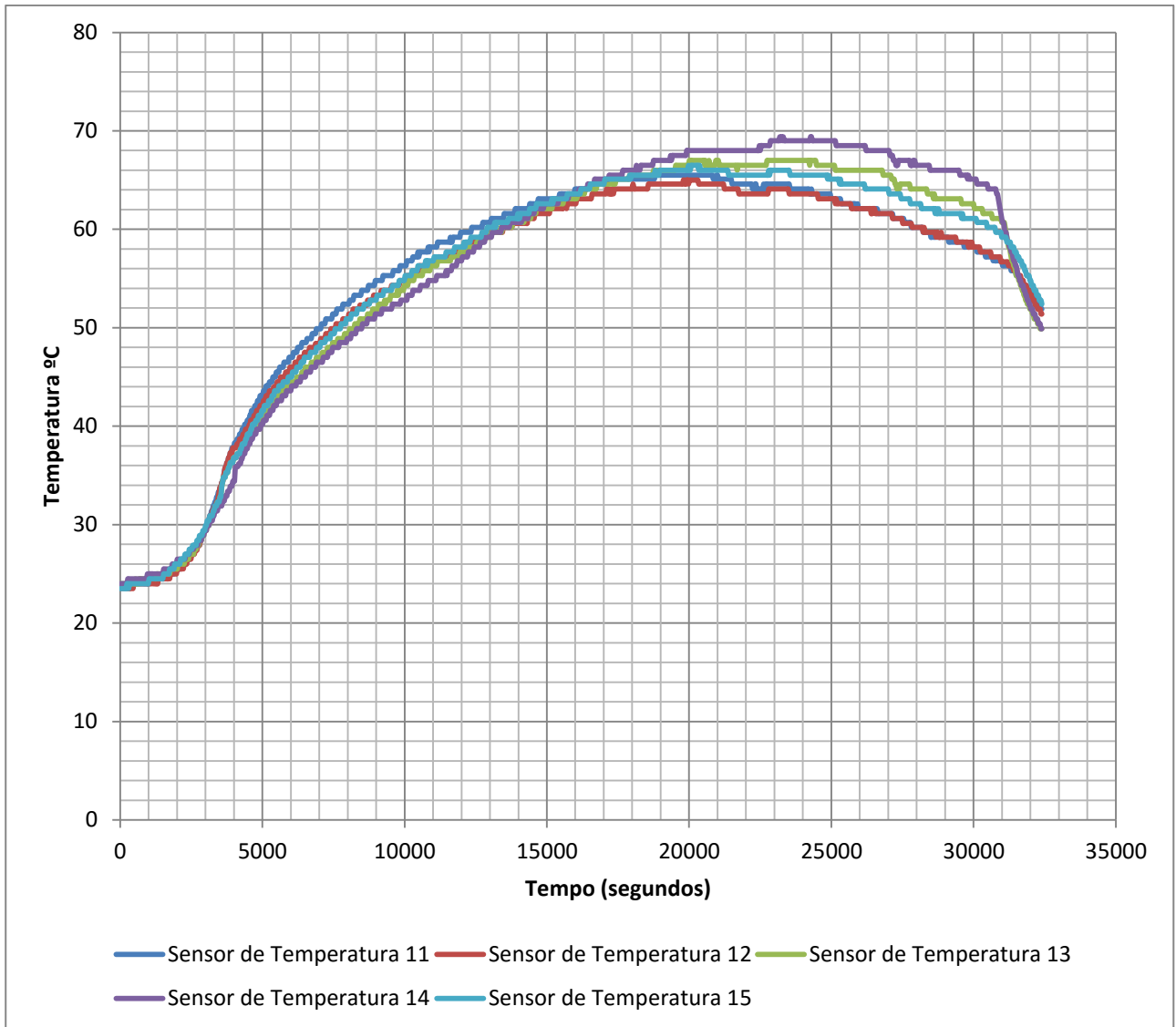
Perfil de Temperatura no Interior do Automóvel às 18h00min



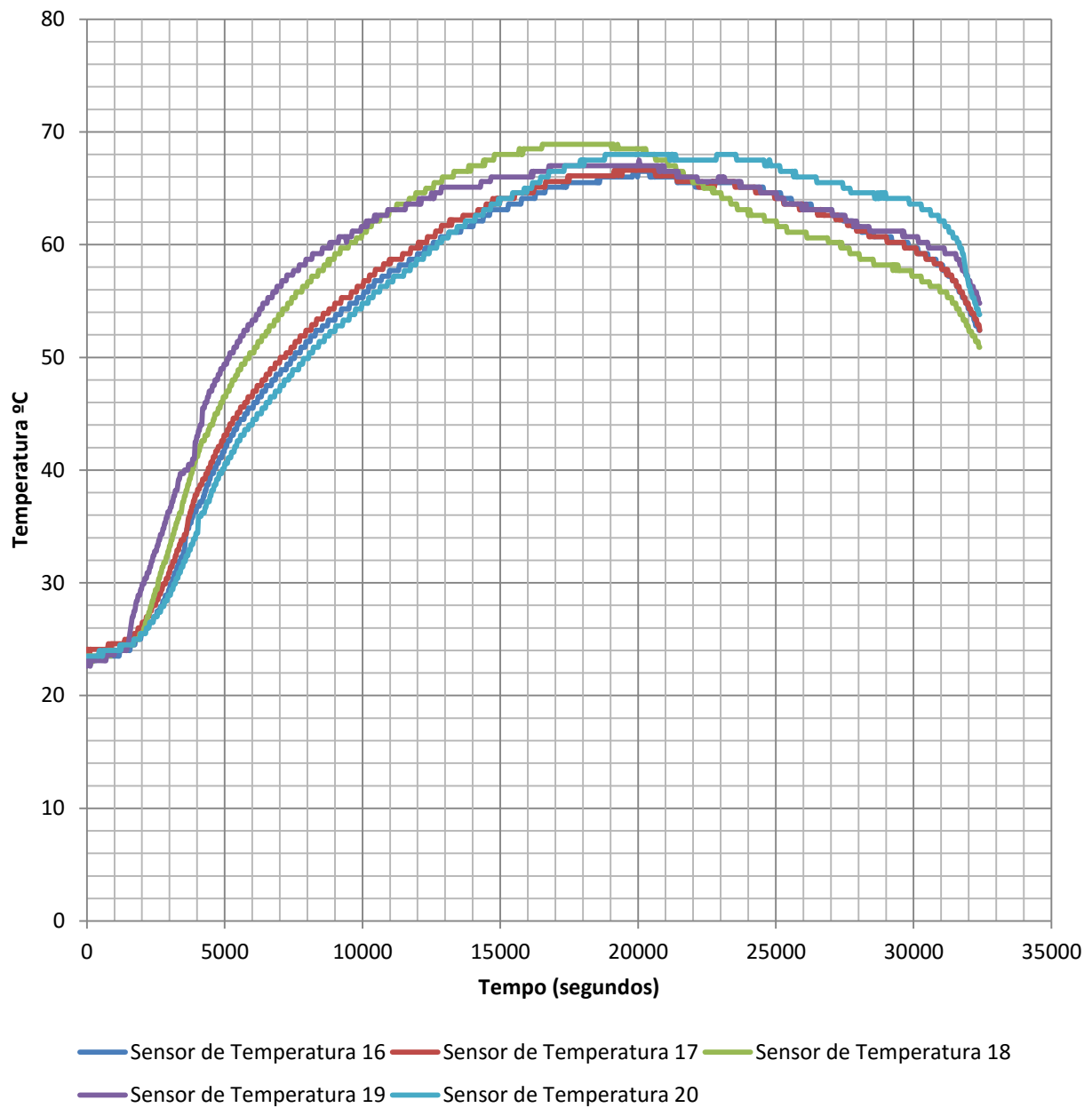
## 6.2 APÊNDICE B

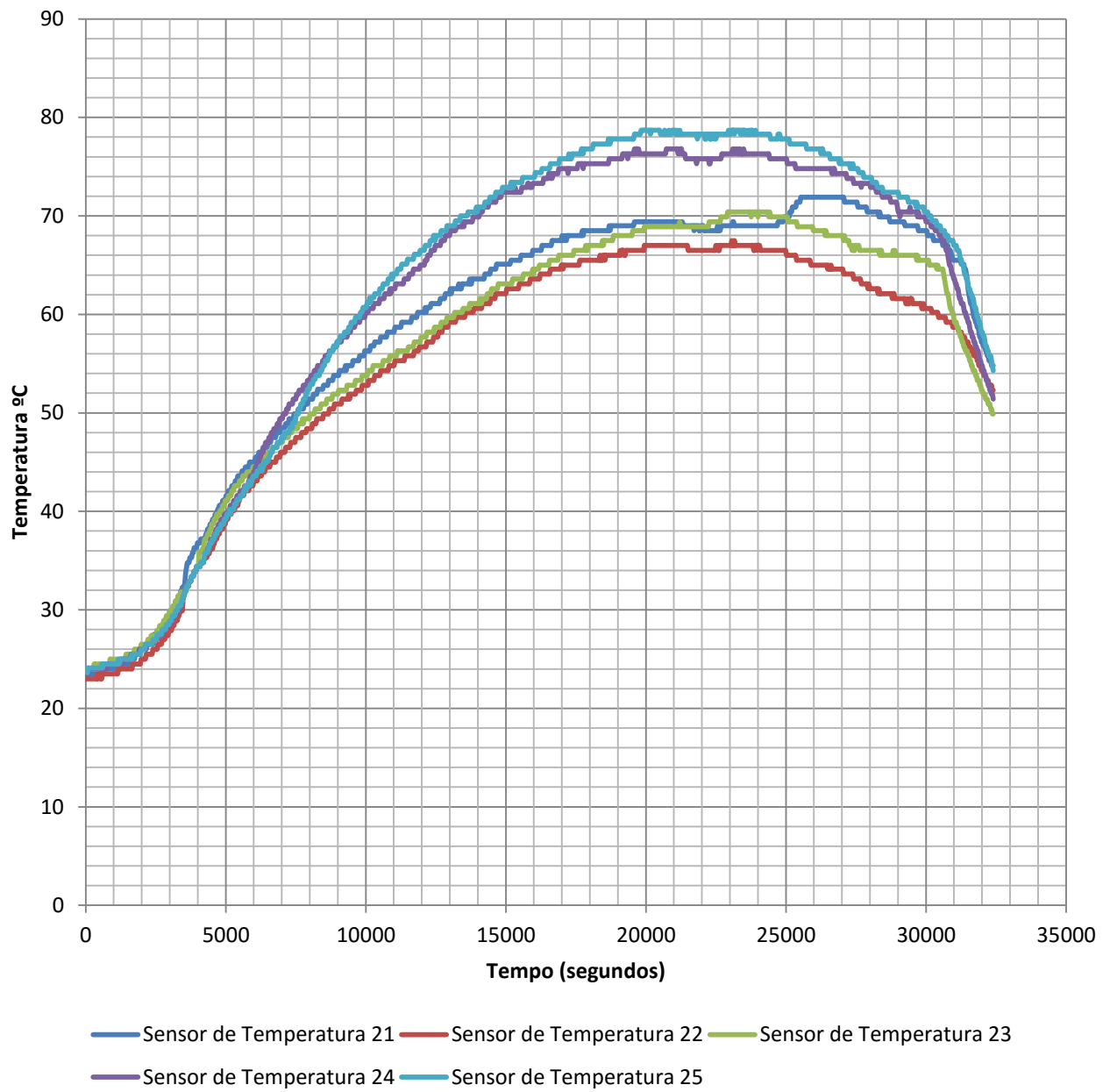


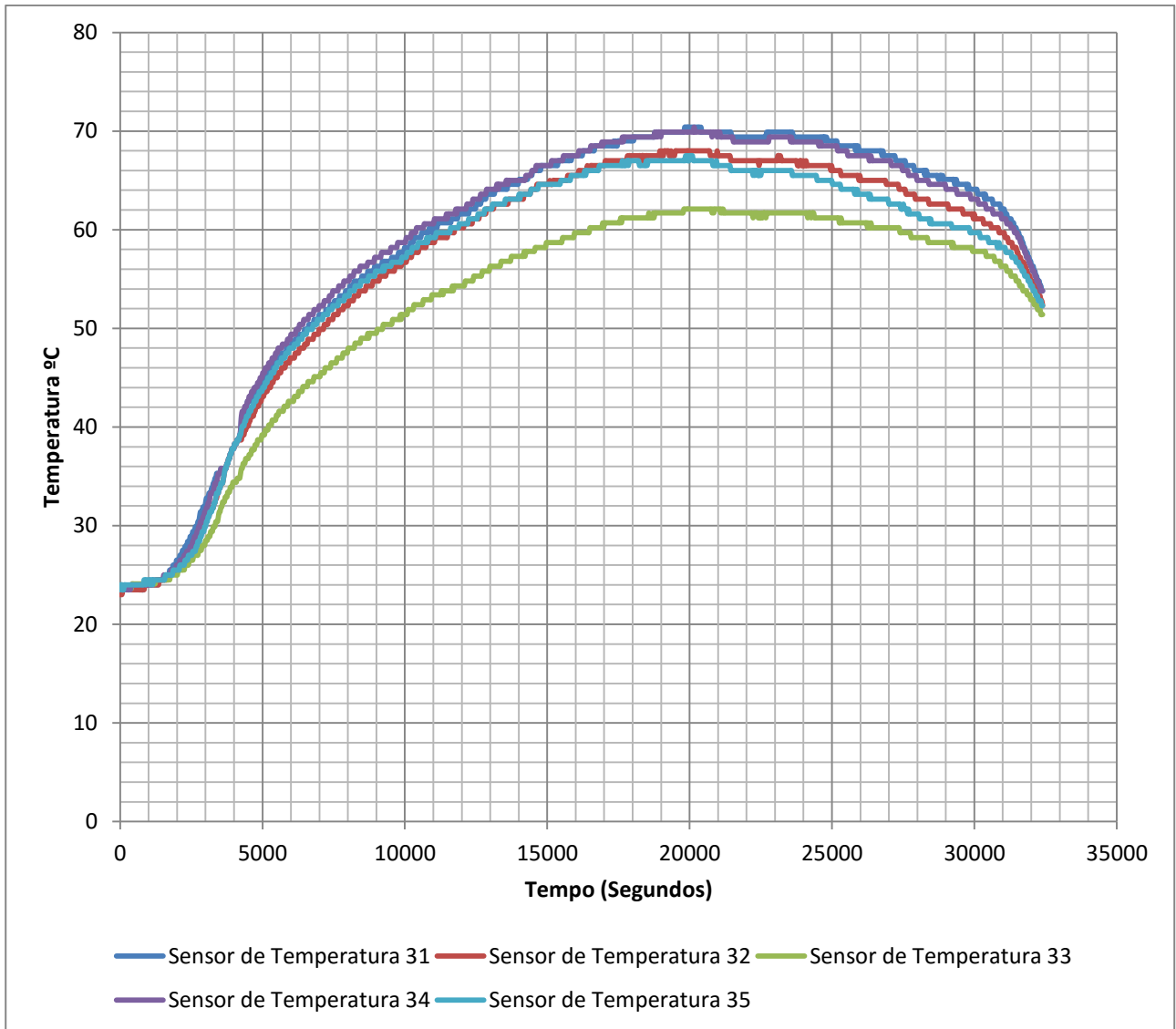


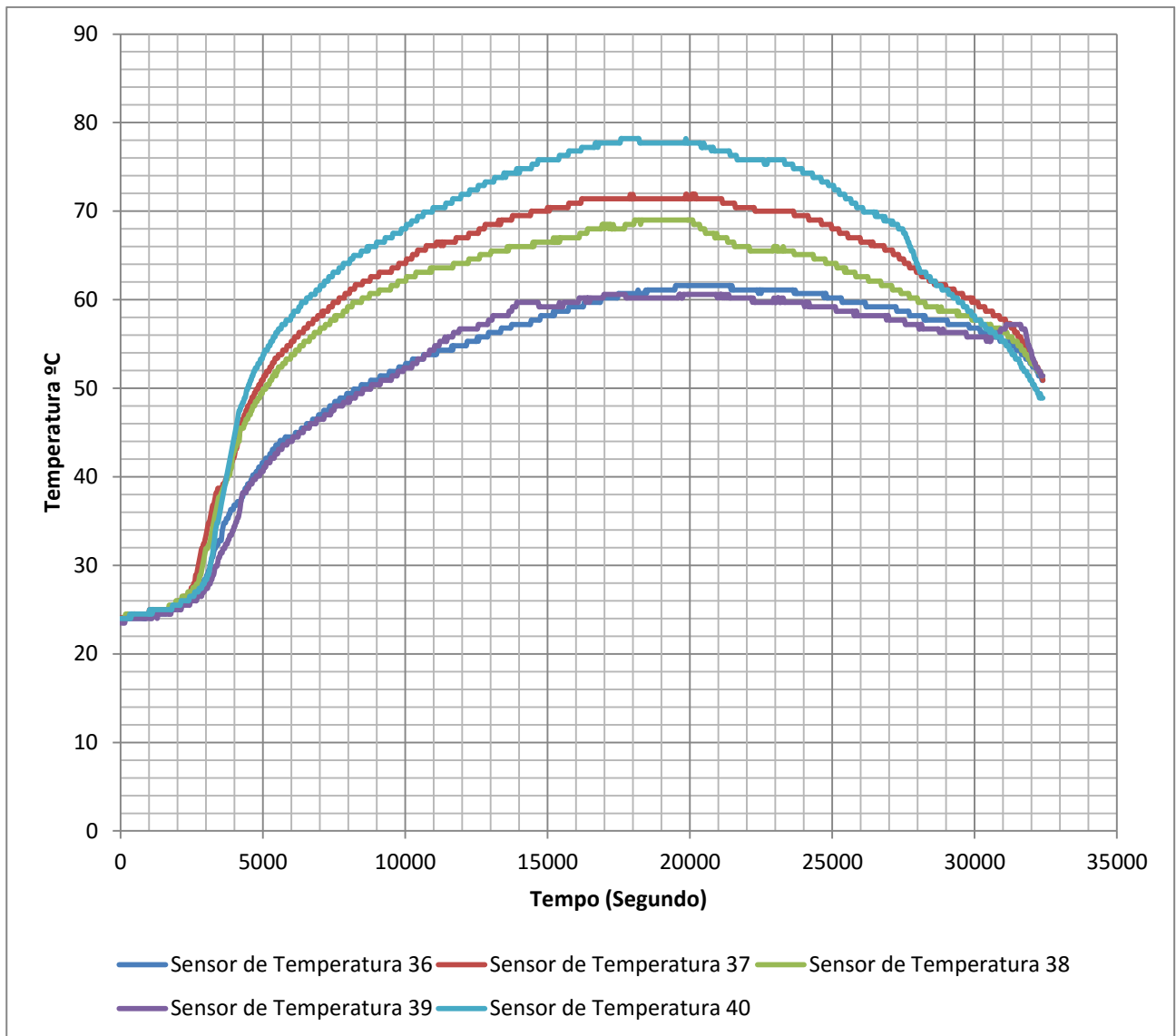


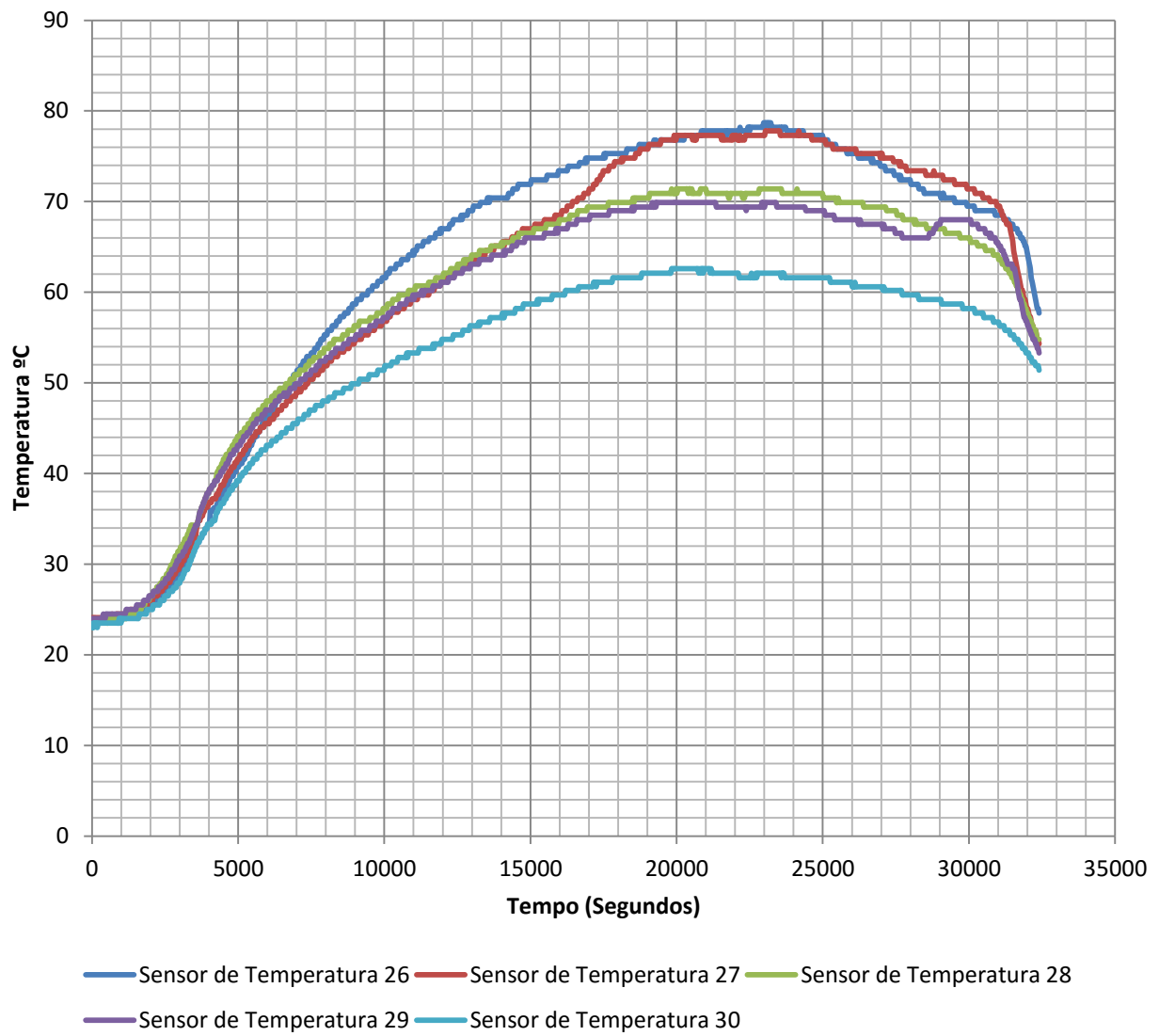








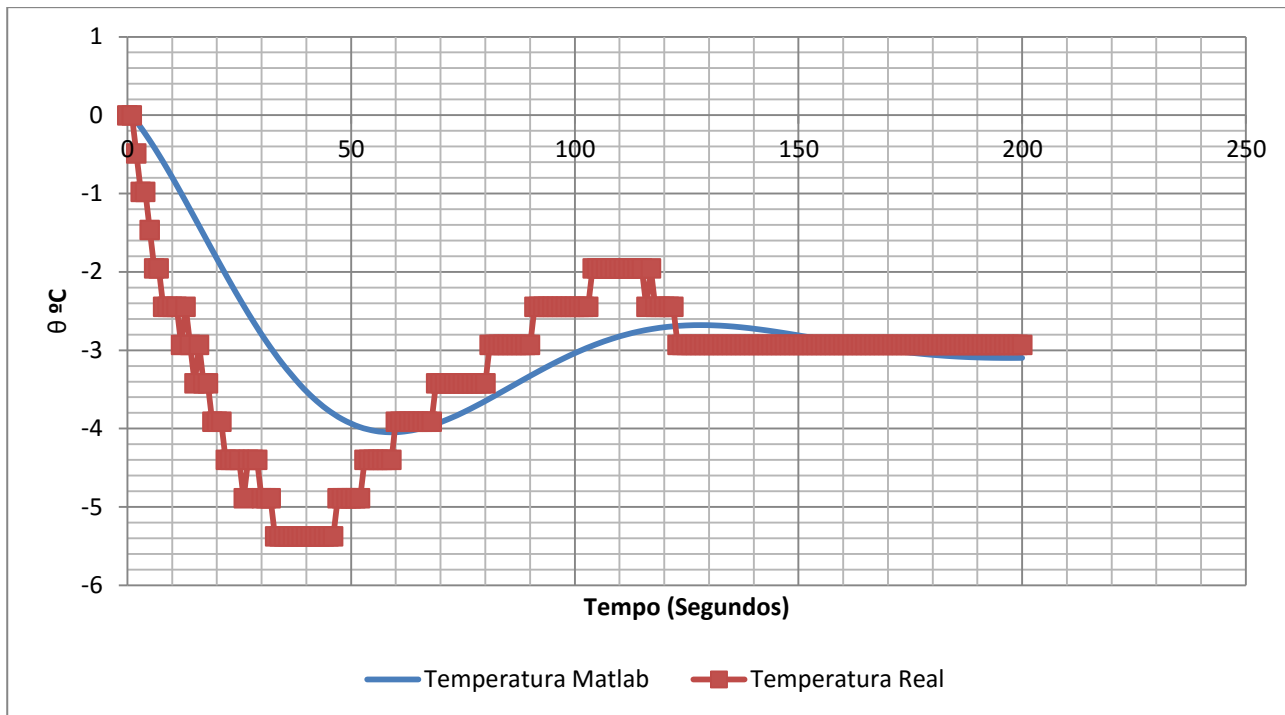




### 6.3 APÊNDICE C

Comparação entre a variação de temperatura experimental com a temperatura simulada no software Matlab para os valores de  $P=10$ ,  $\tau_i=1$  e  $\tau_d=1$ ;

Medida 1



Medida 2

