



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
CAMPUS IV - ARAXÁ

ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

**ALESSANDRO VICTOR DE ARAÚJO**

**CONTROLE DE TEMPERATURA E UMIDADE DE UMA ESTUFA**

Araxá

2011



**ALESSANDRO VICTOR DE ARAÚJO**

## **CONTROLE DE TEMPERATURA E UMIDADE DE UMA ESTUFA**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais / Campus IV – Araxá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Automação Industrial.

Orientador: Prof. DOMINGOS SAVIO DE RESENDE

Co-Orientador: Prof. ALFREDO DE PAULO ANDRADE

Araxá

2011

ii

*Aos meus pais, Marcos e Ilza,  
que estiveram ao meu lado por  
todo esse tempo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos da minha família que tanto me apoiaram e ajudaram no decorrer do desenvolvimento deste trabalho e ao longo do curso de Engenharia de Automação Industrial tornando possível a aquisição de conhecimentos e de experiências de vida.

Ao meu orientador, Prof. Domingos Sávio, por viabilizar o desenvolvimento deste projeto através de sua orientação e à Prof<sup>a</sup>. Jalmira por contribuir para que se chegasse a esta versão final do trabalho.

Aos meus amigos que, durante este processo de aprendizagem denominado engenharia, propiciaram oportunidades de adquirir conhecimentos tanto para a vida profissional quanto pessoal.

*“Não basta conquistar sabedoria, é preciso usá-la.”*

*Marco Túlio Cícero*

## RESUMO

A utilização de estufas na produção de alimentos e outros cultivos ligados à agricultura vem assumindo um importante papel na sociedade, aumentando a necessidade de alimentos para o consumo ou outros cultivos para a utilização em diversos setores da sociedade em um menor prazo possível de produção. As estufas surgem como um importante meio para se alcançar esses objetivos, com sua utilização para os cultivos as plantas demandam um menor tempo para desenvolvimento, o plantio pode ser feito durante todo o ano e em diferentes ambientes, o que acarreta também uma maior produção. Para isso é necessário que alguns pontos relativos à utilização de estufas na agricultura sejam observados. Esses pontos estão relacionados ao controle de variáveis envolvidas com o ambiente interno da estufa e que necessitam ser monitoradas ou controladas para que se possam atingir os objetivos na utilização das estufas para plantio de diversas culturas. O sistema desenvolvido neste trabalho auxilia no controle do ambiente interno da estufa, como existem varias variáveis envolvidas no controle como temperatura, umidade, concentração de CO<sub>2</sub> dentre outras, o trabalho se foca no controle de baixas e altas temperaturas e no controle da umidificação da estufa. O monitoramento das variáveis é feito com a utilização do sensor SHT11 que capta a temperatura e a umidade simultaneamente e envia seus valores de forma digital. O tratamento dessas informações enviadas pelo sensor é feito por meio de um microcontrolador, no caso o PIC 16F877A, que através da programação desenvolvida gera ações correspondentes aos valores das variáveis. Para que as ações correspondentes possam ser tomadas é necessária a utilização de parâmetros base, a fim de se comparar o valor real com o valor desejado para as variáveis. As ações são tomadas através de um controle ON/OFF da ventilação forçada na estufa, a utilização de uma lâmpada como fonte de calor para o controle da temperatura e através de um umidificar para o controle da umidade. Nestes termos o objetivo do trabalho, desenvolver um controlador que auxilie no controle interno da estufa, foi atingido.

**Palavras chave:** Estufas. Temperatura. Umidade. PIC 16F877A. Sensor SHT11.

## ABSTRACT

The use of green houses to produce food crops and other agriculture-related structures have an important role in society, increasing the need for consumption of food or other crops for use in several sectors of society in a shortest possible time of production. Green houses are emerging as an important mean to achieve these goals, with their use for crop, plants require less time for growth, the planting can be done throughout the year and in different environments, which also leads to increase production. This requires that some points concerning the use of green houses in agriculture are observed. These points are related to the variables involved control in the internal environment of the green house and need to be monitored or controlled so that they can achieve the goals in the use of green houses for growing different crops. The system developed in this study helps to control the green house's indoor, such there are many variables involved in controlling as temperature, humidity, CO<sub>2</sub> concentration, among others, the work focuses on the control of high and low temperature and and humidification control in the green house. The monitoring of the variables is done by using the SHT11 sensor that captures both the temperature and humidity values, and sends its in digital signal. The treatment of the information sent by the sensor is done through a microcontroller, in this case the PIC 16F877A, which through the developed program, generates actions corresponding to the values of the variables. For the corresponding actions can be taken is necessary to use basic parameters in order to compare the actual value with the desired value for the variables. Actions are taken through an ON / OFF control of forced ventilation in the green house, using a lamp as a heat source for temperature control and using a humidifier to control humidity. Accordingly the objective of this work, develop a controller that assists in green house's internal control, it was achieved.

**Keywords:** Green Houses. Temperature. Humidity. Microchip PIC 16F877A. SHT11 Sensor.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Transferência de calor unidimensional em estado estacionário .....	6
FIGURA 2 - Troca de calor por convecção .....	8
FIGURA 3 - Radiação emitida $q''_{\epsilon}$ , radiação incidente $q''_I$ com radiação resultante refletida ( $q''_{\rho}$ ) em uma superfície, transmitida ( $q''_{\tau}$ ) e absorvida ( $q''_{\alpha}$ ) ....	11
FIGURA 4 - Tipos de estufas .....	19
FIGURA 5 - Exemplo de um sistema hidropônico .....	21
FIGURA 6 - Ventilação por aberturas laterais e na parte superior de estufas.....	24
FIGURA 7 - Ventilação forçada .....	25
FIGURA 8 - Sistema de refrigeração por umidificação.....	27
FIGURA 9 - Pinagem do PIC 16F877A .....	31
FIGURA 10 - Forma do pacote de dados da comunicação serial .....	33
FIGURA 11 - Transmissão de dados com duas linhas.....	33
FIGURA 12 - Sensor de temperatura e umidade SHT11 .....	36
FIGURA 13 - Diagrama de blocos do sensor SHT11 .....	36
FIGURA 14 - Range de operação do SHT11 .....	37
FIGURA 15 - Sequência de início de transmissão .....	38
FIGURA 16 - Sequência de medição de umidade.....	39
FIGURA 17 - Representação do sensor LM35.....	41
FIGURA 18 - Encapsulamento TO-92.....	41
FIGURA 19 - Maquete da estufa .....	42
FIGURA 20 - Protótipo de estufa de acrílico .....	43
FIGURA 21 - Diagrama de blocos do projeto.....	45
FIGURA 22 - Rotina principal parte 1 .....	48
FIGURA 23 - Rotina principal parte 2.....	49
FIGURA 24 - Rotinas das interrupções .....	51
FIGURA 25 - Circuito de comunicação e controle e sensor SHT11 .....	52
FIGURA 26 - Circuito de atuação.....	53
FIGURA 27 - Placa do sistema de captura .....	54
FIGURA 28 - Placa do sistema de controle e comunicação.....	54
FIGURA 29 - Placa do sistema de atuação.....	55



FIGURA 30 - Tela do supervisor para monitoramento da temperatura .....	56
FIGURA 31 - Tela do supervisor para monitoramento da umidade.....	56
FIGURA 32 - Tela do supervisor para configuração dos parâmetros .....	57
FIGURA 33 - Controlador .....	65

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Condutividades Térmicas .....	6
TABELA 2 - Constantes para cálculo da temperatura.....	39
TABELA 3 - Constantes para cálculo da umidade .....	40
TABELA 4 - Constantes para cálculo da temperatura corrigidos .....	58
TABELA 5 - Constantes para cálculo da umidade corrigidos .....	58
TABELA 6 - Valores medidos pelos sensores com acionamento do aquecedor.....	60
TABELA 7 - Valores medidos pelos sensores com acionamento dos ventiladores- extratores .....	60
TABELA 8 - Valores medidos pelos sensores com acionamento dos controladores de temperatura .....	61
TABELA 9 - Valores medidos pelos sensores com os controladores desativados....	61
TABELA 10 - Valores de umidade medidos com aquecedor ativado .....	62
TABELA 11 - Valores de umidade medidos com os ventiladores-extratores acionados .....	62
TABELA 12 - Valores de umidade medidos com os controladores desativados .....	63
TABELA 13 - Valores de temperatura medidos com umidificador acionado .....	63
TABELA 14 - Valores de temperatura medidos com umidificador desativado .....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CCP	<i>Capture, Compare and PWM</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
PIC	<i>Programmable Interface Controller</i>
pH	Potencial hidrogeniônico
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RS	<i>Recommended Standard</i>
SI	Sistema Internacional
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
UA	Umidade Absoluta
UR	Umidade Relativa
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1 Motivação</b> .....	1
<b>1.2 Objetivos</b> .....	2
1.2.1 GERAL.....	2
1.2.2 ESPECÍFICOS.....	2
<b>1.3 Apresentação</b> .....	2
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
<b>2.1 Temperatura e Calor</b> .....	4
2.1.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO .....	5
2.1.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO.....	7
2.1.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO .....	9
<b>2.2 Umidade</b> .....	12
<b>2.3 Controle</b> .....	15
2.3.1 CONTROLE ON/OFF .....	17
2.3.2 CONTROLE PROPORCIONAL .....	17
2.3.3 CONTROLE INTEGRAL .....	18
2.3.4 CONTROLE DERIVATIVO .....	18
<b>2.4 Estufas</b> .....	18
2.4.1 CONTROLE DO INTERIOR DE ESTUFAS .....	22
2.4.1.1 <i>Ventilação</i> .....	23
2.4.1.2 <i>Refrigeração por umidificação</i> .....	26
2.4.1.3 <i>Limitação da radiação incidente</i> .....	28
2.4.1.4 <i>Aquecedores</i> .....	28
2.4.1.5 <i>Sistemas a água quente</i> .....	29
2.4.1.6 <i>Nebulização</i> .....	29
<b>2.5 Microcontrolador</b> .....	30
<b>2.6 Comunicação Serial</b> .....	32
<b>2.7 Sensores</b> .....	34
2.7.1 SHT11.....	35
2.7.2 LM35.....	40
<b>3 DESENVOLVIMENTO</b> .....	42

<b>3.1 Projeto</b> .....	42
<b>3.2 Descritivo funcional</b> .....	45
<b>3.3 Programação</b> .....	47
3.3.1 FLUXOGRAMA.....	48
<b>3.4 Simulação e testes</b> .....	51
<b>3.5 Supervisório</b> .....	55
<b>4 RESULTADOS</b> .....	58
<b>CONCLUSÃO</b> .....	66
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	67
<b>ANEXO DATASHEET SHT11 FABRICANTE SENSERION</b> .....	69

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

A procura por uma maior oferta de alimentos vem sendo um ponto crucial para os países, visto que o aumento da população vem sendo cada vez maior e a necessidade por alimentos por sua vez só vem aumentando.

Além do aumento na produção de alimentos outro fator que vem tomando um papel importante é o plantio de espécies fora do seu ambiente natural e fora da sua época de plantio, que a principio não seriam favoráveis para as mesmas.

Uma alternativa para contornar essas adversidades e suprir essa demanda crescente é a utilização de estufas para a produção ou cultivo de hortaliças de flores, plantas ornamentais, produção de mudas e ranicultura além de outras possíveis utilizações para a estufa.

As vantagens da utilização de estufas para produção ou cultivo é que estas por serem ambientes protegidos propiciam um microclima mais próximo do ideal para as culturas, visto que oferecem uma maior proteção contra os fenômenos metrológicos, proteção do solo contra processos de lixiviação, redução dos custos com a utilização de fertilizantes e um maior controle de pragas. Além dessas vantagens a utilização de estufas propicia o aumento da produção quando comparado com sistemas a céu aberto.

A utilização das estufas para esses propósitos cria a necessidade de sistemas para o controle de algumas variáveis que estão envolvidas no meio do processo tais como temperatura e umidade.

A temperatura e a umidade são pontos importantes a serem controlados, pois estas variáveis impactam diretamente no desenvolvimento do cultivo podendo acarretar em surgimento de pragas, doenças do solo além de outros fatores preponderantes para o cultivo.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 GERAL**

O objetivo deste trabalho é desenvolver um controlador que auxilie no controle do ambiente interno de uma estufa, interferindo na temperatura e na umidade.

### **1.2.2 ESPECÍFICOS**

Verificar o funcionamento do protótipo em condições de baixa e alta temperatura e em baixa umidade para que se atinja o objetivo proposto pelo trabalho.

Realizar uma serie de teste a fim de se verificar a eficácia do tipo de controle utilizado para essas variáveis e verificar quais serão as interações que acontecerão quando o controle dessas variáveis for aplicado.

## **1.3 Apresentação**

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 1 apresenta-se uma breve introdução do assunto abordado, expondo a motivação do projeto, bem como o objetivo que se pretende alcançar com o mesmo.

Ao longo do Capítulo 2 será dado enfoque aos assuntos teóricos que irão compor o trabalho, tais como uma explicação das variáveis que serão tratadas, as diferentes formas de controle que serão empregadas para se atingir o objetivo, os equipamentos utilizados e os sensores.

No Capítulo 3 apresentar-se-á o sistema utilizado neste projeto, os métodos utilizados, o software implementado e a estrutura física, quais os testes

com o controlador e o teste realizado com o sensor utilizado em comparação com outro sensor.

Os resultados e os dados obtidos através dos testes serão expostos e comentados no Capítulo 4.

Finalizando, no Capítulo 5 serão apresentadas as considerações finais relativas ao trabalho realizado.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As constantes mudanças climáticas ocorridas no planeta vêm acarretando sérios problemas para o setor de produção de alimentos.

Regiões onde antes existiam determinadas condições para plantio de alguma espécie não mais apresentam estas condições devido às mudanças climáticas, acarretando conseqüentemente numa mudança das estações chuvosas, das secas e também das temperaturas.

Por esses fatores, a utilização de estufas vem assumindo um papel de grande relevância no meio agrícola, pois com ela é possível se ter um maior controle do ambiente de plantio, permitindo assim condições favoráveis para culturas onde antes a época ou as condições ambientais não seriam favoráveis. De tal modo que, para que se possa obter um controle satisfatório é necessário analisar as variáveis envolvidas.

### 2.1 Temperatura e Calor

Dentre as grandezas do Sistema Internacional (SI) encontra-se a temperatura. Ela é uma grandeza que auxilia na obtenção quantitativa de um número que represente a energia cinética média de cada grau de liberdade das partículas de um sistema quando o mesmo está em equilíbrio térmico, ou seja, a temperatura mensura o grau de agitação das moléculas de um corpo ou de um meio.

Porém, para a termodinâmica clássica, as medidas de interesse são expressas em termos de observações macroscópicas, por isso a definição de temperatura com base em medidas moleculares não tem utilidade na termodinâmica clássica.

Desta forma, duas visões foram abordadas para a temperatura, uma a nível macroscópico fornecido pela termodinâmica clássica e outra a nível microscópico fornecido pela física estática.

A temperatura muitas vezes é confundida como uma medida de calor, mas é apenas quando existe uma diferença de temperatura que ocorre a transferência de energia entre corpos através de calor.

A transferência de energia por meio de calor é umas das formas possíveis para a transferência de energia entre sistemas e ela expressa a quantidade de energia trocada entre a vizinhança dos mesmos. O calor é utilizado para descrever a energia trocada entre sistemas que não ocorre por meio de trabalho mecânico.

Essa transferência de energia por meio de calor entre corpos ou sistemas pode ocorrer através de diferentes formas: condução, convecção e irradiação térmica. Sendo que muitas vezes estes três fenômenos ocorrem simultaneamente em determinadas situações.

### 2.1.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO

A transferência de energia através de condução térmica ocorre entre átomos ou moléculas vizinhas em um meio através de um gradiente de temperatura, onde a energia é transferida das moléculas ou átomos mais energéticos para os menos energéticos. O gradiente de temperatura é utilizado para descrever o modo como está ocorrendo a transferência de calor em uma determinada região, mostrando a direção e taxa de mudança de temperatura.

Quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário (sólido ou um fluido, por exemplo), a condução se refere à transferência de calor que ocorre através do meio (INCROPERA e DEWITT apud OLIVEIRA, 2010, p. 11).

O processo de transferência de calor por meio de condução é regido pela primeira e segunda lei da termodinâmica. Essas transferências de energia ocorridas por meio do calor são quantificadas através de modelos apropriados conseguidos pela lei de Fourier.

Considerando um plano unidimensional, conforme visto na FIG. 1, onde existe uma distribuição de temperatura  $T(x)$ , o fluxo de calor é dado pela fórmula:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Este fluxo  $q_x''$  ( $W/m^2$ ) é a taxa com que o calor é transferido de uma extremidade do plano unidimensional para a outra extremidade sendo esta transferência proporcional ao gradiente ( $dT/dx$ ).

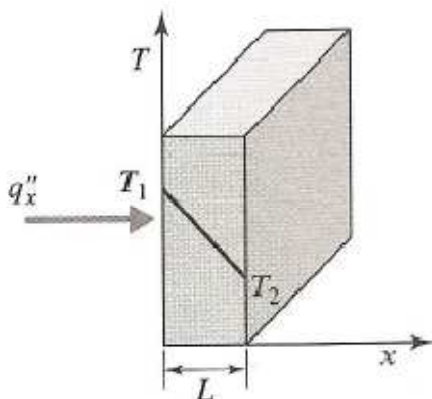


FIGURA 1 – Transferência de calor unidimensional em estado estacionário  
Fonte: POTTER e SCOTT, 2006, p.57.

Em (1) a constante  $k$  representa uma propriedade de transporte conhecido como condutividade térmica, sendo que ela varia conforme o material que está sendo analisado. O sinal negativo vem do fato de o calor estar sendo transferido para a região de menor temperatura.

**TABELA 1**

Condutividades Térmicas

Substâncias	$k(W/m.K)$
<b>Metais</b>	
Aço Inox	14
Ferro	67
<b>Metais de construção</b>	
Lã de vidro	0,043
Vidro de janela	1,0

Fonte: HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2006, p.191.

Quando a transferência de energia ocorre de forma linear o gradiente de temperatura é dado por:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2)$$

Assim o fluxo de calor será dado por:

$$q_x^m = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = -k \frac{\Delta T}{L} \quad (3)$$

Com a fórmula anterior é possível obter o fluxo de calor por unidade de área. O calor por unidade de tempo por meio de um plano é conseguido através do produto do fluxo de calor pela área do plano.

$$q_m = q_x^m A \quad (4)$$

Tomando como base que o fluxo de calor é uma quantidade vetorial, pode-se obter uma fórmula mais geral da lei de Fourier.

$$q'' = -k \nabla T = -k \left( i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

Em que  $\nabla$  é o operador na pla tridimensional e  $T(x,y,z)$  é o campo escalar de temperaturas.

A transferência de calor através de condução é importante em estufas, pois conforme esteja a temperatura do meio externo, o interior da estufa irá perder ou receber calor.

### 2.1.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

A convecção é um fenômeno de escoamento de fluídos em diversos meios devido à diferença de densidade, principalmente por causa do calor. Esse fenômeno faz parte de muitos processos na natureza sendo que a convecção atmosférica é um dos fatores de grande influência no clima global e nas mudanças do tempo.

A transferência de energia por convecção ocorre quando um fluido entra em contato com um objeto de maior temperatura, sendo esta transferência devido a dois fatores: um a nível macroscópico e outro a nível microscópico.

A transferência de energia pelo movimento aleatório das partículas, a condução, se enquadra no nível macroscópico e a advecção, na qual o calor é transportado por meio do escoamento do fluido, se enquadra no nível microscópico. Esse movimento aleatório junto ao grande movimento de moléculas no fluido com a presença do gradiente de temperatura beneficia a transferência de calor, pois é por meio da junção do movimento aleatório das moléculas e do movimento global do fluido que a transferência total de calor ocorre.

A FIG. 2 mostra uma superfície aquecida com um fluxo de um fluido.

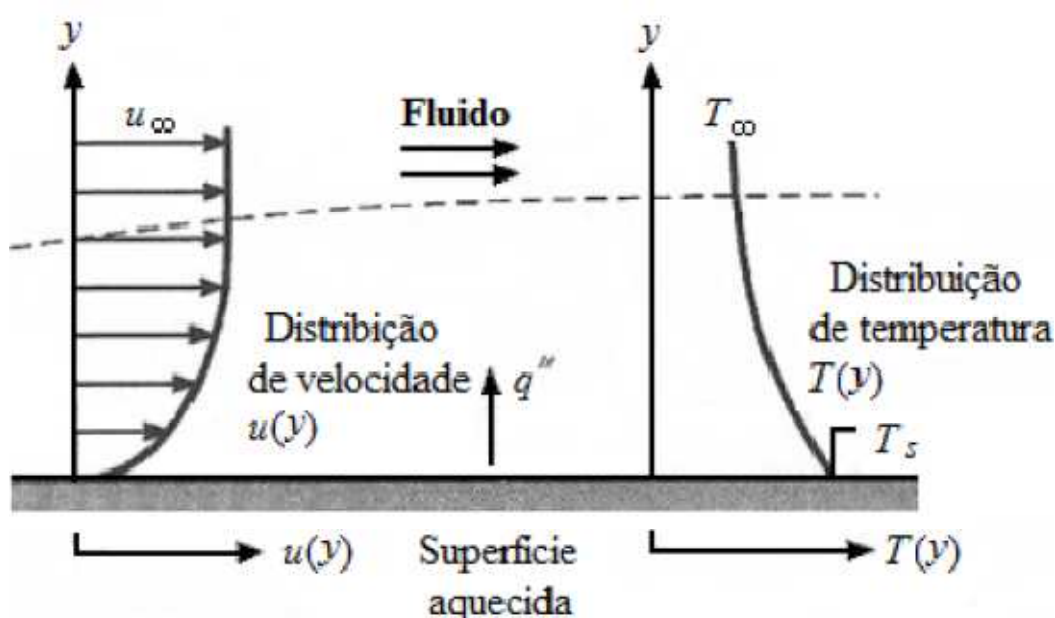


FIGURA 2 - Troca de calor por convecção  
Fonte: INCROPERA e DEWIT - adaptação de OLIVEIRA, 2010, p. 14

Um fluido e uma superfície quando em contato interagem entre si gerando uma região onde o fluido varia sua velocidade na superfície de zero até um valor finito  $u_\infty$ . A região onde esse fenômeno ocorre é conhecida como camada limite hidrodinâmica. Caso ocorra uma diferença de temperatura entre as partes, haverá no fluido uma região denominada camada de limite térmico onde a temperatura variara de  $T_s$  em  $y=0$  a  $T_\infty$  no fluxo exterior.

O fenômeno de transferência de calor por convecção ocorre tanto pela movimentação aleatório das moléculas como pelo movimento volumétrico do fluido na camada limite. O primeiro movimento acaba por estar mais presente e

próximo à superfície, onde se tem uma velocidade muito baixa do fluido, levando a considerar uma velocidade nula na região, acarretando assim a movimentação aleatória das moléculas na única forma de transferência de calor. O movimento volumétrico acaba influenciando no momento em que a camada limite cresce à medida que o fluxo avança na direção  $x$ . Desta forma o calor presente nessa camada é conduzido pelo fluxo e se transfere para o fluido fora da camada limite. Assim a equação do fluxo de calor por convecção é dado por:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (6)$$

Nota-se que o fluxo de calor por convecção  $q''$  é proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície e as do fluido. Esta equação é conhecida como a lei de resfriamento de Newton, sendo  $h$  uma constante denominada de coeficiente de transferência de calor por convecção. Essa constante é dependente de vários fatores como as condições da camada limite, da geometria da superfície e de uma série de propriedades termodinâmicas do fluido e de transporte.

A transferência de calor por meio de convecção é importante em estufas, pois será uma das formas pelas quais acontecerá a troca de calor.

### 2.1.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO

A radiação térmica é a terceira forma de transferência de calor, onde um corpo com uma temperatura finita transmite energia através de ondas eletromagnéticas para o meio ou para um segundo corpo. A física também interpreta a radiação térmica como a transferência de energia por meio de fótons.

Pelo fato de as ondas eletromagnéticas poderem se mover no vácuo a transferência de energia entre dois corpos pode ocorrer sem a necessidade de um meio material, diferentemente da condução e convecção. Essa transferência de calor ocorre ao redor de um comprimento de onda específico, denominado comprimento de onda principal de irradiação, o qual varia conforme a temperatura do corpo.

Apesar de a radiação térmica não necessitar de um meio para transmissão de energia, existem meios pelos quais não é possível propagar a energia. Esses meios são definidos como materiais opacos.

A FIG. 3 apresenta um sistema onde uma superfície aquecida emite energia através de radiação térmica, sendo que a taxa com que a energia é liberada por unidade de área é denominada como potência emissiva inicial  $q''_{\varepsilon}$ .

Qualquer que seja a temperatura de uma superfície existe um limite superior para a quantidade de radiação que pode ser emitida. Assim esse limite para a potência emissiva é estabelecido pela lei de Stefan-Boltzmann

$$q''_{\varepsilon b} = \sigma T^4 \quad (7)$$

Na equação acima a temperatura absoluta é dada por T e a constante de Stefan-Boltzmann por  $\sigma$ , sendo que este equacionamento representa a radiação para um corpo denominado radiador de corpo negro. Como a potência emissiva resulta da potência quarta da temperatura, a radiação em temperaturas elevadas torna-se de vital importância.

Visto que um corpo negro não existe na natureza e ele representa um valor limite, os corpos reais apresentam uma potência emissiva menor, considerando que ambos estejam na mesma temperatura. Portanto, o fluxo por unidade de área de um corpo real é expresso como:

$$q''_{\varepsilon} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (8)$$

Nesta equação  $\varepsilon$  corresponde a uma propriedade adimensional da superfície denominada emissividade e tem um valor na faixa entre 0 e 1, dependendo da composição da superfície do material.

Com a propriedade radiativa é possível conseguir uma medida da eficiência com que uma superfície emite energia, tomando como referência o corpo negro.

Em um processo de radiação térmica de uma superfície não é apenas a radiação emitida por ela que deve ser considerada, mas também a quantidade

de radiação absorvida pela mesma. Essa absorção é representada como uma fração da energia incidente na superfície, e é expressa pela seguinte equação:

$$q''_{\alpha} = \alpha_R q''_I \quad (9)$$

Nesta fórmula,  $q''_{\alpha}$  é a taxa de radiação absorvida por unidade de área pela superfície e  $q''_I$  é a irradiação incidente sobre a superfície. Já  $\alpha_R$  é uma propriedade adimensional denominada de absorvidade. Os valores de  $\alpha_R$  variam na faixa entre 0 e 1, dependem da natureza da irradiação e da própria superfície.

A radiação que incide sobre a superfície e que não é absorvida pode ser transmitida através do material ou refletida pela superfície. Assim, como ilustrado na FIG. 3, o fluxo total incidente sobre uma superfície pode ser expresso como a soma dos fluxos radiantes absorvido  $q''_{\alpha}$ , refletido  $q''_{\rho}$  e transmitido  $q''_{\tau}$ .

$$q''_I = q''_{\alpha} + q''_{\rho} + q''_{\tau}$$

$$q''_I = \alpha_R q''_I + \rho_R q''_I + \tau_R q''_I \quad (10)$$

As propriedades adimensionais  $\rho_R$  e  $\tau_R$  são denominadas respectivamente de refletividade e transmissividade, tendo essas propriedades valores variando na faixa entre 0 e 1.

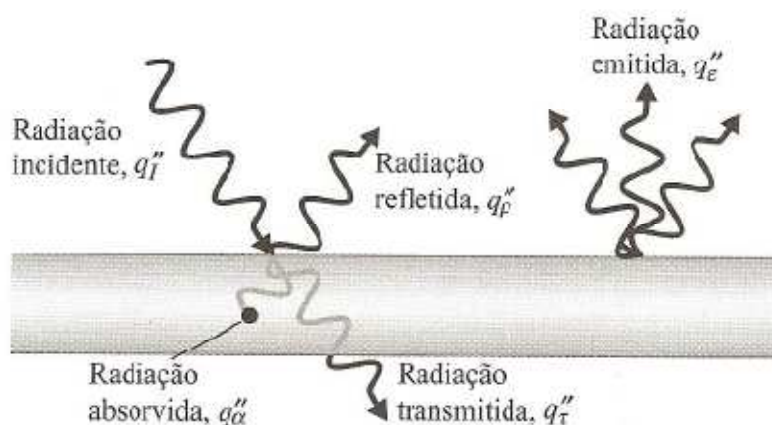


FIGURA 3 - Radiação emitida  $q''_{\epsilon}$ , radiação incidente  $q''_I$  com radiação resultante refletida ( $q''_{\rho}$ ) em uma superfície, transmitida ( $q''_{\tau}$ ) e absorvida ( $q''_{\alpha}$ )  
 Fonte: POTTER e SCOTT, 2006, p. 61.



Quando o material é denominado como opaco não há transmissão de radiação, desta forma a sua transmissividade será igual à zero. Assim, para uma superfície opaca a equação 10 torna-se:

$$q''_I = \alpha_R q''_I + \rho_R q''_I \quad (11)$$

Além disso, quando um material não absorve toda a radiação que incide sobre ele a sua transmissividade e refletividade são iguais a zero. Esse tipo de material é denominado corpo negro e sua superfície é uma superfície negra. Assim para este tipo de superfície utiliza-se apenas a equação 9.

Teoricamente uma superfície negra quando em temperatura ambiente apresenta ter uma cor preta visto que nenhuma radiação é refletida por ela e considerando que ela esteja a uma baixa temperatura, nenhuma radiação dentro do espectro visível será emitido. Todavia, uma superfície que a primeira vista pareça ser negra necessariamente não o é, pois ela pode não ter uma absorvidade de superfície negra fora do espectro visível.

Quando é necessário se achar a transmissão de calor por radiação da superfície de um objeto para um meio de temperatura uniforme, sendo a temperatura do meio muito maior que a do objeto utiliza-se o fluxo líquido  $q''_{rad}$  que é dado pela equação:

$$q''_{rad} = \epsilon \sigma (T^4 - T_{meio}^4) \quad (12)$$

A transferência de calor por meio de radiação acaba por se tornar também um item importante em estufas, pois será um dos fatores a ser considerado para a escolha do material que poderá ser utilizado nas mesmas, além de ser outra forma de troca de calor com o ambiente.

## 2.2 Umidade

Umidade é definida como a quantidade de vapor de água presente no ar, sendo que esta quantidade de vapor é limitada pela temperatura do ar. A

umidade está inteiramente ligada à formação das nuvens e das chuvas, com isso ela influencia diretamente a agricultura. Existem duas formas principais de medida da umidade, uma expressa em números absolutos conseguidos através da umidade absoluta e outra em forma relativa obtida pela umidade relativa.

Sendo que a umidade absoluta é definida como a quantidade de água absoluta presente em uma fração da atmosfera em base. A unidade de medida da umidade absoluta dada pelo SI é de quilograma por metro cúbico.

$$UA = \frac{m_{\text{água}}}{V} \quad (13)$$

A umidade absoluta varia de acordo com a pressão atmosférica e com a temperatura o que acarreta em grandes variações prejudicando diversos cálculos. Assim, para facilitar os cálculos a umidade absoluta é definida como a massa de vapor de água por unidade de ar seco, o que gera medidas mais rigorosas. Essa definição também é conhecida como razão de mistura de massa.

$$\omega = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{ar seco}}} \quad (14)$$

Já a umidade relativa é definida como sendo a razão entre a pressão parcial ou quantidade de vapor da água na atmosfera e a pressão de saturação da atmosfera a uma mesma temperatura. Ela é uma variável importante do ponto de vista agrônomo, pois determina a taxa de evaporação da água. A unidade da umidade relativa do ar é representada em porcentagem e sua expressão é:

$$UR = \frac{p_{H_2O}}{p^*_{H_2O}} \times 100\% \quad (15)$$

Onde  $p_{H_2O}$  é a pressão parcial do vapor de água em uma mistura de gases e  $p^*_{H_2O}$  é a pressão de vapor de saturação.

Um fator que está associado à umidade relativa é o ponto de orvalho. O ponto de orvalho determina em qual temperatura o vapor de água presente no ar passa do estado de vapor para o estado líquido. O ponto de orvalho ocorre

quando a pressão de vapor torna-se igual à pressão de vapor saturado àquela temperatura, assim a umidade relativa será 100%.

A quantidade de vapor de água que um determinado ambiente suporta varia de acordo com a temperatura, sendo que quanto mais quente maior será a quantidade de vapor de água que o ambiente suporta. Assim quando uma massa de ar aquece, sua umidade relativa aumenta, mas a umidade absoluta permanece inalterada.

Na hora de se determinar a medida da umidade relativa é possível se utilizar diferentes tipos de construções de equipamentos. O higrômetro é um deles, ele é composto por substâncias que são capazes de absorver a umidade atmosférica. Entre essas substâncias estão os sais de lítio e o cabelo humano.

O higrômetro composto por sais de lítio utiliza a variação de condutividade dos sais, cujo valor de resistência varia de acordo com a água absorvida. Com o auxílio de um amperímetro é possível se obter o valor da umidade.

Já os higrômetros construídos com fios de cabelo utilizam o princípio da variação do comprimento do fio à medida que o mesmo absorve umidade.

O psicrômetro utiliza cálculos que são baseados na velocidade de evaporação da água. Para isso ele emprega dois termômetros de mercúrio idênticos exposto ao ar, sendo que um traz o bulbo descoberto e outro coberto por gase umedecida. Assim quando a água da gase evapora diminui a temperatura do termômetro e com a diferença de temperatura o psicrômetro obtém a umidade relativa do ar.

A umidade, de forma geral, tem grande influência nas plantas, visto que o excesso da mesma atrapalha diretamente a respiração, a evapotranspiração, a circulação da seiva, o que acarreta no mau desenvolvimento da plantação. Além disso, o excesso de umidade aumenta o risco de condensação sobre as plantas e sobre a estufa o que pode acarretar o desenvolvimento de doenças.

Estipular o nível ideal de umidade relativa para o cultivo em estufas não é uma tarefa fácil, mas valores compreendidos entre 85 e 90% são considerados prejudiciais para a maior parte dos cultivos.

Da mesma forma que o excesso de umidade é prejudicial, a baixa umidade também gera problemas para o cultivo, pois ela faz com que as trocas

gasosas diminuam de forma relevante, atrapalhando diretamente a fotossíntese da planta. Este fenômeno ocorre normalmente ao meio-dia, período em que a temperatura é mais elevada.

Devido a todos esses fatores o controle da umidade torna-se uma tarefa difícil, por isso evita-se os valores extremos para que o desenvolvimento da planta possa ocorrer da melhor forma.

### **2.3 Controle**

No avanço da engenharia e da ciência o controle automático desempenhou um papel fundamental, atingindo diversos sistemas como os robóticos e os veículos espaciais, representando uma parte de capital importância nos processos industriais. A utilização do controle automático em um sistema é feita para que uma determinada variável ou várias variáveis atinjam um valor desejado e se mantenham no mesmo.

O primeiro trabalho de maior importância que foi desenvolvido nessa área de controle automático apareceu no século XVIII com James Watt. Ele desenvolveu um regulador centrífugo que desempenhava a função de controlar a velocidade de uma máquina a vapor, mas antes mesmo desse trabalho outros sistemas também foram desenvolvidos sendo os primeiros datados de 250 a.C.. Após esse trabalho de Watt outros, também com um importante papel, foram desenvolvidos no início da aplicação do controle automático por Minorsky, Hazen, Nyquist, dentre outros.

Assim o controle automático teve um grande desenvolvimento e, existem diversos equipamentos advindos dessas ideias e conceitos iniciais que são aplicados na indústria para o controle de variáveis e até mesmo equipamentos que são utilizados em residências.

Para que o controle de um sistema genérico funcione, o controlador precisa realizar algumas funções:

- Ter a medida do valor atual da variável através de sensores;
- Comparar o valor medido com o valor desejado;

- Utilizar a diferença entre o valor real e o desejado para gerar um sinal de correção;
- Aplicar o sinal de correção no sistema a fim de que o valor medido da variável seja igual ao valor desejado.

Os sistemas de controle podem ser classificados como sistemas de controle de malha aberta e de malha fechada.

No controle por malha aberta o sinal de saída não possui influência no controlador, ou seja, em um controle por malha aberta o sinal de saída não é medido e nem realimentado para que se tenha uma comparação com o valor desejado. Desta forma o seu funcionamento depende de condições já pré-fixadas de operação necessitando assim que haja uma calibração do mesmo. E esse tipo de controle não consegue desempenhar suas funções quando há presença de distúrbios no processo, acarretando em um mau funcionamento.

No controle por malha fechada o sinal de erro que é a diferença entre o valor desejado e o valor real para a variável é realimentado no controlador, a medida do valor real da variável é conseguido por meio de sensores presentes no processo. Assim por meio de ações de controle o controlador procura minimizar a diferença existente entre o sinal de entrada, que é o valor desejado, e o sinal de saída, que é o valor de saída.

As ações que o controlador efetuará podem ser divididas em dois modos de acionamento e em quatro ações básicas podendo estar associadas ou não na realização do controle. Esses dois modos são:

- Ação direta: onde o sinal de saída aumenta com o aumento do sinal de controle.
- Ação reversa: onde o sinal de saída diminui com o aumento do sinal de controle.

Já as ações básicas que o controlador pode realizar são:

- Controle ON/OFF ou liga/desliga;
- Controle Proporcional;
- Controle Integral;
- Controle Derivativo.

As associações possíveis para esses modos de controle são:

- Controle Proporcional-Integral;

- Controle Proporcional-Derivativo;
- Controle Proporcional-Integral-Derivativo.

### 2.3.1 CONTROLE ON/OFF

O controle ON/OFF é uma das formas mais simples e baratas para implementação, sendo extremamente utilizado no meio industrial. Essa forma de controle permite duas possibilidades de atuação no sistema: ligado e desligado ou aberto e fechado.

Desta forma o controle quando executado faz com que o sinal aplicado passe de seu nível máximo para o mínimo ou vice-versa de acordo com o objetivo a ser alcançado, fazendo com que a variável controlada oscile em torno do valor desejado, apresentando assim sempre um erro. Por este motivo esse tipo de controle não é empregado em sistemas que apresentem uma alta criticidade como em uma caldeira, pois não é possível conseguir com o mesmo um controle exato. Assim, ele é mais empregado em sistemas onde a variável de controle pode variar em torno do sinal de referência como: termostato de geladeira, nível de uma caixa d'água.

### 2.3.2 CONTROLE PROPORCIONAL

O controle proporcional pode ser visto como um controle mais suave que o controle ON/OFF, já que o sinal aplicado no sistema para correção da variável de saída varia de acordo com a diferença entre o sinal desejado e o valor real presente no sistema.

Por esta característica o controle proporcional propicia que a variável controlada não apresente grandes oscilações no seu regime de funcionamento, mas da mesma forma como no controle ON/OFF essa ação convive com um erro de regime.

### 2.3.3 CONTROLE INTEGRAL

O controle integral surge pela necessidade de se eliminar o erro de regime presente nas outras ações de controle, que é a diferença apresentada entre o valor desejado e o valor real da variável após o transitório inicial.

O controle integral procura atuar no sistema para o controle da variável enquanto existir um erro  $e$ , diferentemente do controle proporcional que atua de forma rápida quando há uma variação da saída, o controle integral age de forma lenta até que o erro seja eliminado.

### 2.3.4 CONTROLE DERIVATIVO

Diferentemente das outras formas de controle onde é necessário que ocorra um desvio do sinal de saída para que os mesmos atuem, no controle derivativo a ação é tomada de acordo com a velocidade de desvio da variável, ou seja, este tipo de controle tenta enxergar a tendência de desvio da variável e atua para que esse desvio não ocorra, aplicando um sinal proporcional à derivada do sinal de erro.

## 2.4 Estufas

A agricultura, de forma geral, busca o aumento da produção agrícola, impulsionada pela grande necessidade de alimentos exigida pela humanidade. Portanto, um dos meios encontrados para se alcançar este objetivo foi o desenvolvimento das estufas. Estufas são estruturas que acumulam calor em seu interior, conseguindo assim temperaturas maiores que as exteriores.

Desta forma, com o advento das estufas é possível se obter outros benefícios além do objetivo principal. Esses benefícios vão desde a produção de cultivos com um elevado valor comercial, o cultivo de culturas em ambientes e estações fora de época, melhor controle das variáveis, controle de doenças e pragas mais eficaz, menor quantidade de água necessária para a rega, condições

apropriadas de comodidade e segurança para o desenvolvimento do trabalho, além disso, permitem o acompanhamento do desenvolvimento dos cultivos a fim de se construir um modelo para melhorar a produção e a qualidade do cultivo.

Apesar dessa grande quantidade de benefícios que as estufas trazem, as mesmas apresentam algumas desvantagens como um maior impacto ambiental, exigência de uma mão de obra mais qualificada, alto consumo energético, maior utilização de pesticidas e aumento de gastos com o cultivo.

As principais aplicações para as estufas são:

- Cultivo de Hortaliças (baixas/altas)
- Cultivo de Flores e Plantas Ornamentais
- Produção de Mudas
- Ranicultura
- Orquidário
- Cultivo de cogumelo
- Piscicultura
- Citrus

As estufas podem ser diferenciadas segundo a sua forma de construção. Elas se dividem em estufas tipo pavilhão, dente de serra, parreiral ou tenda de campanha e túnel ou semicilíndrico e semi-elíptica.

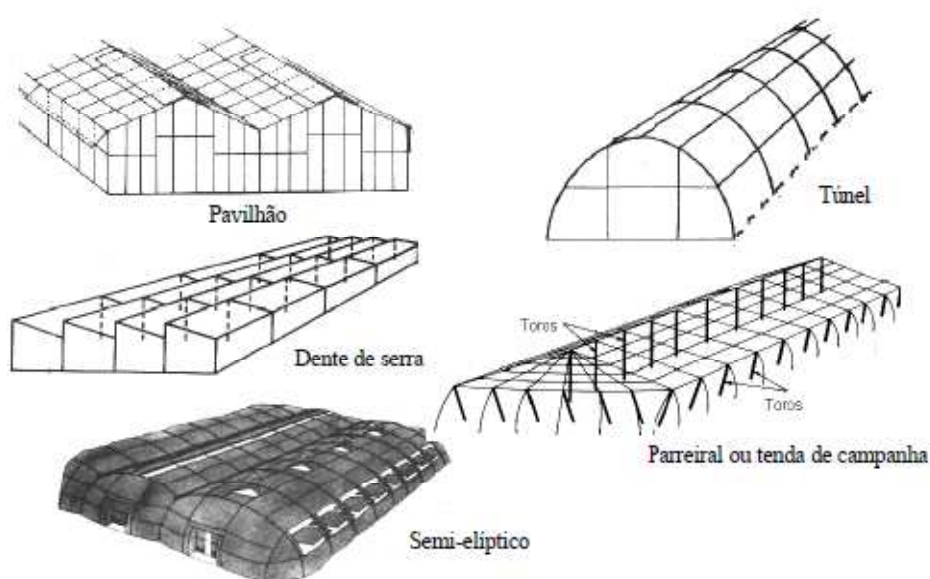


FIGURA 4 - Tipos de estufas  
Fonte: METRÔLHO, 1999, p. 10.



Estufas do tipo pavilhão: possuem a cobertura dividida em dois planos inclinados, tendo assim duas quedas de água. Elas são bastante utilizadas por apresentarem uma grande facilidade de construção, fácil manutenção e pelos diversos tipos de plásticos utilizáveis para a cobertura. Além disso, apresentam a vantagem de se poder construir várias estufas unidas e pelo fácil escoamento das águas pluviais.

Estufas do tipo dente de serra: são formadas por várias divisões, cada uma apresentando em sua cobertura um plano inclinado. Cada plano que cobre as partes da estufa é formado por uma angulação de 30°. Este tipo de estufa apresenta como vantagem a fácil ventilação, mas apresentam problemas para o escoamento das águas de chuva.

Estufas do tipo parreiral: são construídas através de estruturas de madeira para as paredes e arame para a cobertura. Este tipo de estufa apresenta algumas desvantagens como a dificuldade para a construção e para uma manutenção adequada por exigirem uma alta especialização, apresentarem um alto grau de envelhecimento e dificultarem a utilização de maquinário devido a sua forma de construção.

Estufas do tipo túnel: são construídas com armações que formam um arco. Este tipo de estufa apresenta vantagens como uma melhor distribuição da luz e uma maior facilidade para o controle de temperatura.

Estufas semi-elípticas: apresentam uma boa distribuição de luz assim como as estufas do tipo túnel, além disso, apresentam um bom volume interno de ar, poucos obstáculos internos e uma boa vedação do ambiente externo. São estufas recomendadas para regiões chuvosas.

Outro tipo de estufa utilizado é denominado de hidropônica. Ela é um tipo de estufa que se difere das demais comumente utilizadas na agricultura, pois o cultivo é feito em um meio inerte, onde os nutrientes para o cultivo são passados por uma solução nutritiva de composição variável e não pelo solo como nos outros tipos. Sendo que, conforme sejam os cuidados com este tipo de estufa, ela gera uma produção mais rápida quando comparada com os outros métodos. Além de se obter uma produção mais rápida com este método ele apresenta outras vantagens. Como:

- As soluções de nutrientes podem ser reutilizadas durante o processo para rega futuras o que impacta na diminuição do desperdício de água e de fertilizantes.
- Os nutrientes que a planta necessita podem ser direcionados, o que faz com que a planta só receba o que realmente necessita.
- Em função do meio de cultivo ser uma solução nutritiva, a maior fonte de doenças é eliminada. Esta fonte é o solo.
- Como não há a necessidade das plantas disputarem por nutrientes é possível se cultivar uma maior quantidade de plantas em uma mesma área.
- Por não depender do solo, é possível utilizá-lo em diversos locais.
- Redução da mão de obra para o cultivo das plantas.
- Obtenção de uma melhor qualidade e quantidade de cultivo.
- Por demandar um menor tempo para cultivo o ciclo de produção é mais curto.

Este sistema é composto por um reservatório que contém a solução nutritiva para o cultivo, uma calha para o crescimento, uma forma de se levar os nutrientes e a água até as plantas e um meio que possa substituir o solo.

Os meios que normalmente são utilizados para a substituição do solo são turfa, argila expandida, areias lavadas, britas e materiais sintéticos.



FIGURA 5 - Exemplo de um sistema hidropônico

Fonte: <http://www.gmbozone.com/Aplicaciones-del-Ozono/Cultivos-Hidroponicos>.

Apesar deste tipo de estufa apresentar diversas vantagens, o mesmo também apresenta algumas desvantagens ou dificuldades. Suas desvantagens são a necessidade constante de monitoramento do pH e da concentração de nutrientes que são levados para as plantas, sendo necessária assim a utilização de diversos sensores e atuadores.

Os componentes que são utilizados para se obter as condições necessárias para o cultivo podem ser bombas submersíveis, bombas de ar, medidores de pH, misturadores e outros componentes.

As grandezas que influenciam o ambiente interno das estufas devem ser controladas para que se possa alcançar um melhor desempenho, estas variáveis podem ser controladas através de técnicas que serão apresentadas no próximo subtópico.

#### 2.4.1 CONTROLE DO INTERIOR DE ESTUFAS

No controle interno de estufas é necessário levar em consideração diversas situações conforme cada região. Dentre essas situações tem-se o controle de temperaturas elevadas, de baixas temperaturas, de umidade do ar, de irrigação, de luminosidade e do dióxido de carbono.

Neste trabalho os controles aos quais será dado enfoque serão os de altas e baixas temperaturas e a parte do controle de umidade ligado a umidificação do ambiente.

Para o controle de altas temperaturas no interior de estufas pode-se recorrer a diversas técnicas com o objetivo de se manter a temperatura dentro de níveis aceitáveis para a cultura em questão, com a finalidade de se conseguir que a estufa seja produtiva durante todo o ano.

As técnicas que podem se utilizadas para o controle de temperaturas elevas no interior de estufas são a ventilação, a refrigeração por umidificação, limitação da incidência de radiação solar, a refrigeração da cobertura e a movimentação do ar interior, sendo todas dependentes da região onde serão empregadas.

Para o controle de baixas temperaturas no interior de estufas existem algumas técnicas que podem ser utilizadas, mas este tipo de controle muitas vezes não é necessário, pois a estufa já gera uma proteção adequada para o cultivo. No entanto há regiões onde este tipo de controle é necessário.

Quando este tipo de controle é aplicado às estufas as mesmas apresentam algumas vantagens como a aceleração do processo de cultivo, a possibilidade de produção em diferentes épocas do ano, de se conseguir um melhor controle de doenças visto que este tipo de controle contribui para evitar a umidade excessiva e, dependendo do meio utilizado, consegue-se gerar calor e uma fonte de dióxido de carbono. Este controle pode ser aplicado tanto no ambiente interno da estufa, ao solo de cultivo ou a ambos.

Assim as técnicas mais usuais para obtenção deste controle são a utilização de água quente circulando em tubulações e aquecedores associados a uma ventilação forçada no interior da estufa para o aquecimento do ar. Para aquecimento do solo é utilizado tubulações com água quente circulando enterrados, na superfície do mesmo ou através de resistências no solo. Destaca-se que as técnicas que aplicam uma ventilação forçada no interior da estufa possuem a vantagem de se ter uma resposta mais rápida em comparação com as outras técnicas.

Para o controle da umidade interna da estufa a técnica usualmente mais empregada é a de nebulização.

Em seguida será dado enfoque a algumas dessas técnicas utilizadas para o controle das variáveis internas da estufa.

#### 2.4.1.1 *Ventilação*

A ventilação em estufas se baseia na troca de ar entre o ambiente interno e externo que pode ser realizada através de forma natural ou forçada. A ventilação é de grande importância para o controle de altas temperaturas, além de influenciar na umidade relativa do ar mantendo-a em níveis aceitáveis, permite que se tenha um fluxo de ar no interior da estufa e auxilia na manutenção das concentrações de gases.

A ventilação natural se baseia na diferença de densidade e pressão do ar, que provocam trocas de ar entre os ambientes. Essas trocas são feitas por meio de aberturas móveis presentes na estufa podendo assim obter-se uma ventilação natural.

As superfícies móveis são obtidas através de duas técnicas: por meio de aberturas laterais ou por aberturas localizadas na parte superior da estufa.



FIGURA 6 - Ventilação por aberturas laterais e na parte superior de estufas  
Fontes: <http://www.fertri.com/portuguese/productos/multitunelcaracteristicas>.  
METRÓLHO, 1999, p. 13.

A técnica por aberturas laterais é feita através da utilização de superfícies móveis nas paredes da estufa, sendo que existem diversas possibilidades de configurações para a implementação dessas aberturas. Essas configurações podem ser:

- Janelas enroláveis;
- Janelas pregueáveis;
- Janelas giratórias;
- Janelas deslizantes.

As aberturas laterais apresentam grande vantagem quando são vistas pelo lado econômico, pois não necessitam de um grande investimento e propiciam a renovação do ar ambiente apesar de não ocorrer em uma alta taxa. Estas aberturas laterais são em muitos casos suficientes para a diminuição da temperatura interna da estufa. É um tipo de ventilação muito influenciado pela direção do vento e sua velocidade, por isso é mais empregada em locais onde os ventos possuem velocidades moderadas.

A outra técnica de ventilação natural utiliza aberturas localizadas na parte superior das estufas e a fazem por meio de painéis móveis e contínuos no teto. As aberturas feitas na estufa por meio desta técnica podem ser compostas por superfícies independentes e podem ter seu acionamento de forma manual ou através de um conjunto de motor e cremalheira. São aberturas utilizadas nas estufas perfazendo um total entre 10 e 15% da superfície total coberta, variando simultaneamente caso seja utilizado a técnica de aberturas laterais.

As aberturas localizadas na parte superior da estufa apresentam uma maior eficácia, sendo que para uma mesma área apresentam ventilação até três vezes superior a de aberturas laterais. Com a utilização desse tipo de abertura cria-se uma espécie de chaminé que ajuda na circulação de ar.

Quando as aberturas localizadas na parte superior da estufa são associadas às aberturas laterais consegue-se uma melhor ventilação, principalmente quando são construídas varias estufas juntas.

Já a outra forma de ventilação utilizada em estufas feita por ventilação forçada consiste na renovação do ar através de ventiladores-extratores que substituem o ar quente do interior da estufa pelo ar da atmosfera.

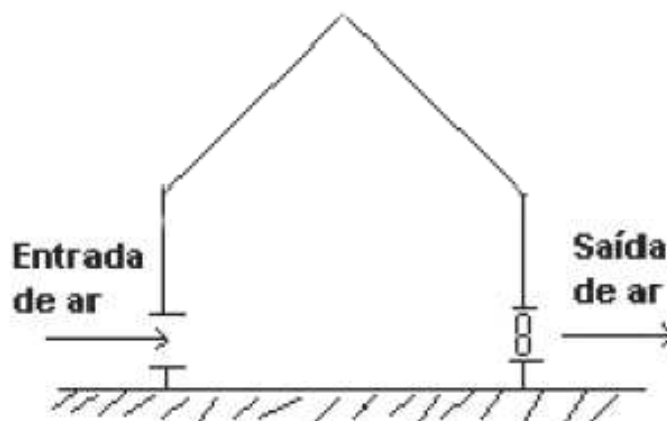


FIGURA 7 – Ventilação forçada  
Fonte: METRÔLHO, 1999, p. 15.

A forma mais utilizada deste tipo de ventilação é a ventilação por depressão, onde o ar é retirado por meio dos ventiladores-extratores que ficam localizados em uma extremidade da estufa. A entrada de ar é feita por meio de aberturas localizadas na extremidade contrária aos ventiladores-extratores e essas aberturas podem ser orifícios que se fecham quando estes são desligados ou por meio do emprego da técnica de aberturas laterais.

Para a escolha do tipo de ventilador que será utilizado na ventilação forçada é necessário levar em consideração alguns aspectos como:

- A quantidade de ar que será removido por unidade de tempo;
- Pressão estática;
- O espaço disponível para a instalação dos mesmos;
- O nível de ruído que será introduzido dentro da estufa;
- A eficiência do ventilador.

A utilização deste tipo de ventilação melhora o controle das temperaturas elevadas fazendo com que as mesmas não sejam excessivamente altas e permite que seja feita uma distribuição do ar dentro da estufa de forma satisfatória.

Com a utilização da ventilação forçada ainda é possível controlar a taxa com que o ar é renovado na estufa. A desvantagem da utilização desta se encontra no fato da necessidade de uma grande quantidade de energia para acionamento dos ventiladores-extratores.

#### *2.4.1.2 Refrigeração por umidificação*

Este tipo de controle de altas temperaturas consiste em fazer com que o ar que entra na estufa passe por materiais umedecidos, acarretando com que parte do calor seja absorvida pela água presente nestes materiais resultando em sua evaporação.

O sistema de refrigeração por umidificação é composto por um ou mais painéis contendo um material umedecido que tem uma circulação de água contínua e ficam localizados em uma extremidade da estufa, normalmente na parte frontal, e os ventiladores-extratores que também compõem este sistema provocam a entrada de ar e ficam localizados na extremidade contrária.

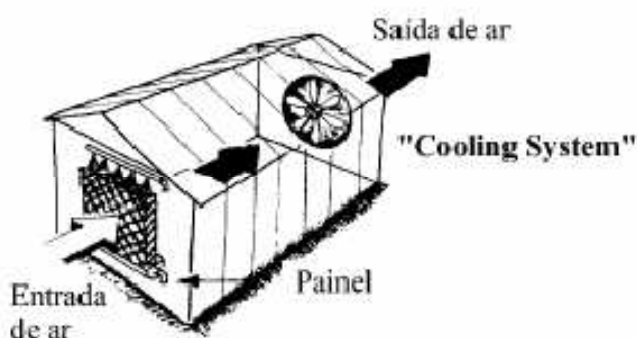


FIGURA 8 - Sistema de refrigeração por umidificação  
Fonte: METRÓLHO, 1999, p. 16.

Os painéis são compostos por superfícies alveolares que são sustentadas por armações de alumínio ou aço galvanizado. O fluxo de água nessas superfícies alveolares é garantido por meio de um tubo perfurado na parte superior dos painéis, assim quando o ar passa pelos painéis parte dessa água evapora e a outra parte é recolhida por uma calha na parte inferior do painel e levada até um reservatório.

Este sistema apresenta um funcionamento favorável ao permitir a diminuição da temperatura interna da estufa e também acaba influenciando na umidade interior, o que impacta de forma positiva no desenvolvimento das plantas. Seu funcionamento pode ter sua eficácia aumentada quando a taxa de renovação do ar for maior e quando o for implementado em regiões ou períodos secos, pois a taxa de evaporação da água nos painéis aumenta.

Da mesma forma como em outros sistemas para o controle do ambiente interno da estufa, o sistema de refrigeração por umidificação também apresenta desvantagens. Essas desvantagens são:

- Para a implementação do sistema é necessário que seja feito um investimento considerável e a realização de um estudo de viabilidade;
- É necessário que a estufa onde este sistema seja implantado seja bem vedada para que se tenha um maior rendimento;
- Devido às características do sistema a umidade e a temperatura no interior da estufa apresenta um gradiente, o ar perto dos painéis acaba sendo mais úmido do que o ar do lado dos ventiladores-extratores. Por isso quando este sistema é utilizado as estufas não podem passar de 30 metros comprimento;



- E quando a água utilizada nos painéis possui um alto grau de sais a durabilidade dos painéis é afetada.

#### 2.4.1.3 *Limitação da radiação incidente*

Esta técnica de controle para altas temperaturas tem como objetivo a limitação da incidência de radiação proveniente do sol através da utilização de materiais que possibilitem um sombreamento, fazendo com que a variação de temperatura no interior das estufas tenha seu valor diminuído comparado à estufas que não utilizam esta técnica. Para que se possa conseguir essa limitação de incidência de radiação é utilizada uma rede de sombreamento, podendo esta ser fixa ou móvel.

A rede de sombreamento móvel que utiliza motores e detectores de fim de curso é a mais utilizada quando se deseja fazer o controle do sombreamento. Ela pode ter sua instalação feita no interior ou exterior da estufa, sendo que a instalação no exterior pode causar inconvenientes devido a intempéries. A utilização desta técnica não se limita a nenhum tipo de cultura ou regiões onde a incidência de radiação solar é mais elevada, ela é amplamente utilizada em culturas que necessitam de baixa luminosidade.

A técnica de limitação de incidência de radiação apresenta como vantagem a possibilidade de se limitar a temperatura interna da estufa em 5 a 6°C acima da temperatura externa. Como desvantagem ela apresenta a diminuição da eficiência da ventilação no interior da estufa.

#### 2.4.1.4 *Aquecedores*

A utilização de aquecedores é um dos sistemas utilizados para o controle de baixas temperaturas no interior de estufas. Este sistema consiste na utilização de vários aquecedores distribuídos de forma homogênea no interior da estufa. Eles são associados a ventiladores que fazem a distribuição do ar quente produzidos pelos aquecedores. Os aquecedores que normalmente são utilizados

neste sistema são os alimentados por gás natural e diesel. É um sistema que necessita de um investimento moderado para que possa ser implantado, além de ser de fácil instalação e expansão.

#### 2.4.1.5 *Sistemas a água quente*

No sistema que utiliza água quente para o controle de baixas temperaturas, a água pode passar por tubulações que ficam espalhadas por todo o perímetro da estufa ou pode ficar localizada em permutadores que possuem ventiladores para que o ar passe por eles.

Este tipo de sistema necessita da utilização de caldeiras para o aquecimento da água e outros dispositivos de controle. Apesar de ele apresentar uma taxa de aquecimento mais lenta, ele apresenta temperaturas mais uniformes.

#### 2.4.1.6 *Nebulização*

A nebulização é a técnica utilizada para se obter o controle da umidificação interna da estufa. Ela consiste na pulverização do ambiente interno com finas gotículas de água. É necessário que essas gotículas se mantenham o máximo de tempo suspensas no ar.

A utilização deste sistema apresenta como vantagens a limitação de perdas significantes de água pelas plantas em sua transpiração, ajuda a acelerar e aumentar o enraizamento das plantas e também ajudam na diminuição da temperatura interna da estufa.

Em contrapartida este tipo não possibilita a diminuição da umidade interna da estufa sendo necessária a implementação de um sistema para retirar a umidade excessiva e, caso não seja feito um bom ajuste do sistema de nebulização as gotículas podem provocar ferimentos nas plantas causando perdas de produção.

## 2.5 Microcontrolador

Os microcontroladores começaram a surgir com o desenvolvimento dos circuitos integrados e, por meio desses, era possível a obtenção em um mesmo chip de vários componentes, surgindo os microcontroladores dedicados que possuíam alto desempenho e um baixo custo. Tamanho foi a repercussão que os microcontroladores passaram a fazer parte integrante do ambiente industrial e de muitas outras áreas como a agricultura, sendo utilizados para várias aplicações.

Os microcontroladores são caracterizados por possuírem no mesmo chip um microprocessador, uma memória interna dedicada para programação e outra para os dados e mais alguns periféricos como conversores A/D, temporizadores, comunicação serial através da RS-232 ou USB. Sua utilização proporciona as seguintes vantagens:

- Por possuírem memória interna e capacidade aritmética apresentam um melhor desempenho do que a lógica discreta;
- Apresentam uma maior flexibilidade, pois é necessária apenas a mudança da programação e, se necessário, dos sensores e atuadores para a utilização do mesmo para controlar outro processo;
- Apresentam um melhor custo/qualidade do que os componentes que poderiam desempenhar a mesma função;
- Possibilitam uma maior modularização dos componentes do sistema de controle;
- Oferecem uma maior imunidade a ruídos.

Dentre a família dos microcontroladores têm-se a família dos *Programmable Interface Controller* (PIC). Os PIC's são uma família de microcontroladores fabricados pela *MICROCHIP TECHNOLOGY®*. São baseados na estrutura *RISC* e apresentam uma configuração interna tipo Harvard que utiliza um barramento de comunicação para o programa e outro para os dados o que possibilita maiores velocidades para o tratamento das tarefas.

Para o controle do ambiente interno da estufa o PIC escolhido foi o 16F877A, pela facilidade de se trabalhar com o mesmo, por atender as necessidades do projeto e por já ter sido utilizado para o desenvolvimento de outros projetos.

O PIC 16F877A é um microcontrolador poderoso e que possui as seguintes características:

- 40 pinos, o que torna possível a montagem de um *hardware* complexo capaz de se comunicar com diversos componentes e realizar diversas funções ao mesmo tempo;
- via de programação com 14bits e 35 instruções;
- 33 portas configuráveis como I/O's;
- 15 interrupções disponíveis;
- memória de programação *E<sup>2</sup>PROM FLASH* que possibilita uma gravação rápida do programa, com um grande número de regravações no mesmo chip, sem a necessidade de se apagar o programa com luz ultravioleta;
- memória de programa com 8kwords, com possibilidade de escrita e leitura pelo próprio código interno;
- memória *E<sup>2</sup>PROM* interna de 256 bytes;
- memória RAM com 368 bytes;
- 3 timers para utilização, sendo 2 de 8 bits e um de 16 bits;
- Comunicação SPI, I<sup>2</sup>C e USART;
- 8 conversores A/D de 10 bits e 2 comparadores analógicos;
- *Power-on Reset* interno;
- *Brown-out* interno.

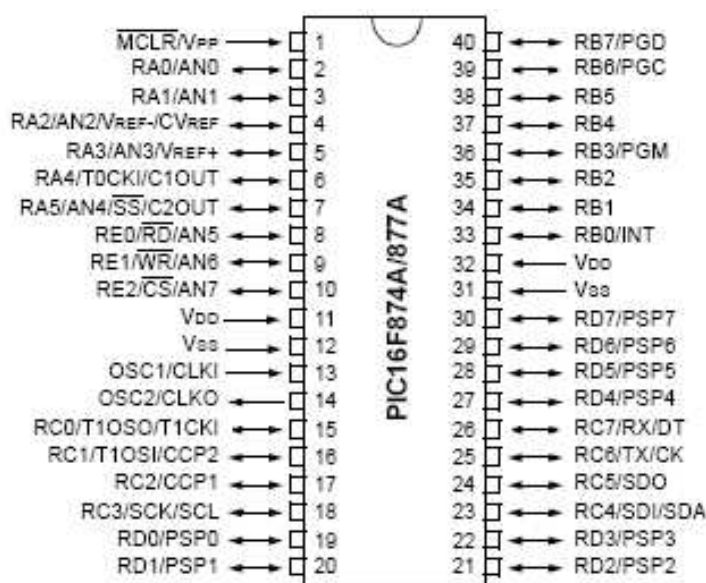


FIGURA 9 - Pinagem do PIC 16F877A  
Fonte: SOUZA e LAVINIA, 2008, p.22.

## 2.6 Comunicação Serial

O tráfego de dados entre diversos componentes de um sistema pode acontecer através de diferentes meios de comunicação. Esses dados podem ser transmitidos de forma analógica ou de forma digital. Quando a forma analógica é utilizada a transmissão dos dados pode ser feita por meio de tensão ou corrente e quando a forma utilizada é a digital os dados são transmitidos por meio de bits sendo que de acordo com a comunicação varia a quantidade de bits necessária.

Essa transmissão pode ser feita através de diferentes tipos de canais, podendo-se utilizar o canal simplex, onde o canal físico só pode ter uma direção de envio de dados, o canal half-duplex, onde o canal físico pode ser utilizado para transmissão e recepção de dados desde que não seja feita ao mesmo tempo e o canal full-duplex, onde o canal permite a troca simultânea de dados nas duas direções simultaneamente.

Como a comunicação digital entre os componentes de um sistema acontecem através de longas cadeias de bits e a transmissão simultânea de todos esses dados se torna inviável, neste ponto é onde surge a comunicação serial.

Assim a transmissão dos dados por meio da comunicação serial é feita através da conversão da mensagem em um bit por vez, sendo que cada bit representa uma parte da mensagem original. Quando os bits chegam a seu destino final eles são reagrupados para a composição da mensagem original.

A taxa de transmissão de dados é denominada de *baud rate*, ela é a taxa de transferência com que os bits são enviados e sua medida é feita em transições elétricas por segundo. A norma EIA232 coloca que ocorra uma transição de sinal por bit, sendo que a velocidade de transmissão mais comum é a de 9600 bits por segundo.

Apesar de a transmissão de dados pela comunicação serial ser feita por meio de bits, ela utiliza pacotes de dados para identificar cada dado. Este pacote é composto por uma sequência de 11bits, cuja configuração é: um bit de início de comunicação, oito bits de dados, um bit de paridade e outro de fim de transmissão do pacote.

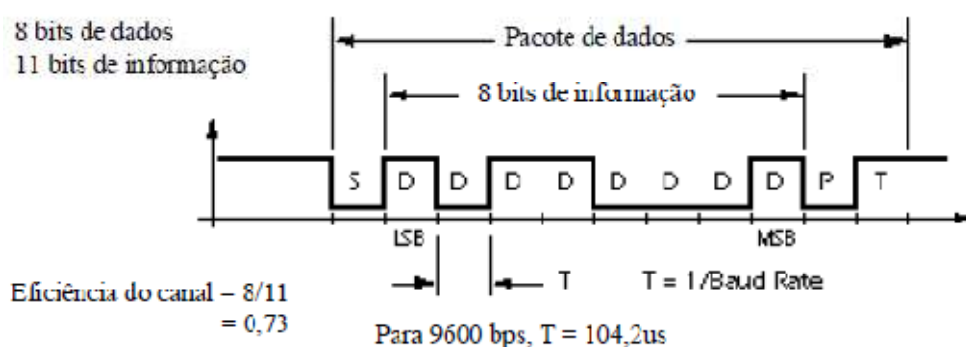


FIGURA 10 - Forma do pacote de dados da comunicação serial  
Fonte: Notas de aula.

A configuração dos bits da comunicação serial é feita desta maneira, pois a comunicação não acontece de forma contínua, ela acontece de forma que existe uma diferença de tempo variável entre uma transmissão de dados e outra, sendo necessário assim a utilização de meios para que o receptor saiba quando o pacote de dados começa.

Além disso, não basta apenas ter os bits para a identificação do início e fim de um pacote de dados, é importante que se tenha um mecanismo para identificar o momento correto que os bits transmitidos devem ser lidos. Quando o receptor conhece o momento de leitura dos bits diz-se que o receptor e o transmissor estão sincronizados.

Para que se obtenha uma comunicação bem sucedida entre o receptor e o transmissor é possível a utilização de duas formas de transmissão, a transmissão síncrona e assíncrona. Na transmissão síncrona é possível se implementar duas técnicas para que ambos estejam sincronizados, uma delas é através da utilização de uma linha extra para o clock e outra é através da composição do sinal de clock com os dados a serem enviados.

Quando uma segunda linha é utilizada para o clock o receptor apenas lê e armazena o dado que está na linha de dados quando é gerado um pulso na linha de clock, sendo que outra leitura só é realizada quando outro pulso for dado.

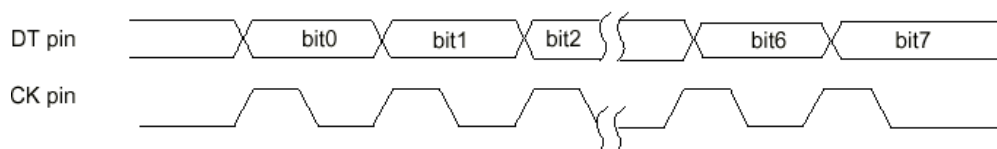


FIGURA 11 - Transmissão de dados com duas linhas  
Fonte: Notas de aula.

Na transmissão assíncrona a informação trafega apenas por uma linha, assim é necessário que a configuração tanto do receptor quanto o transmissor sejam feitas antecipadamente. Neste tipo de transmissão cada componente tem seu oscilador que gera um sinal de clock que devem ser iguais ou próximos.

Os dados que são enviados através da interface serial normalmente seguem o padrão ASCII.

Dentre as comunicações seriais a mais utilizada é a RS232(EIA232). A sua transmissão é feita de forma assíncrona e utiliza níveis de tensão diferentes dos padrões *Transistor-Transistor Logic* (TTL) que são utilizados pelos microcontroladores.

Para a interface RS-232 o nível lógico "1" é representado por valores de tensão compreendidos entre -3v e -12v e o nível lógico "0" é representado por valores compreendido entre 3v e 12v. Os valores compreendidos entre -3v e 3v são indefinidos e devem ser evitados para um bom funcionamento da interface.

## 2.7 Sensores

Um sensor é um elemento que detecta um estímulo físico e o transforma em uma informação mensurável, as grandezas físicas podem ser temperatura de um ambiente, pressão de uma caldeira, umidade de uma estufa, vazão de uma tubulação ou outra grandeza física, também é chamado de transdutor.

Os sensores desempenham um importante papel por serem utilizados desde sistemas simples a sistemas complexos com um alto nível de automação. Eles também são utilizados em processos que apresentam riscos ou que tenham um difícil acesso.

Associado aos sensores encontram-se diversas terminologias que são de grande importância quando se deseja especificar um sensor para uma determinada tarefa. Essas terminologias são:

- Faixa de medida (*Range*) – Ela determina o conjunto de valores que a variável medida pode atingir, compreendendo os valores mínimos e máximo que o sensor é capaz de medir.
- Alcance (*Span*) – O span é a diferença entre o máximo valor que a medida pode alcançar e o valor mínimo alcançado.
- Erro (*Offset*) – O erro é a diferença entre o valor real da variável medida e o valor transmitido pelo sensor.
- Precisão (*Accuracy*) – A precisão é a tolerância de medição ou transmissão da variável medida que o sensor pode apresentar.
- Sensibilidade (*Sensibility*) – A sensibilidade é o mínimo valor necessário que a variável deve mudar para que se obtenha uma mudança na medição do sensor.
- Repetibilidade(*Repeatibility*) – Repetibilidade é a capacidade de o sensor repetir as medidas quando submetido as mesmas condições.
- Histerese(*Hysteresis*) – Histerese é a diferença máxima que se tem dos valores medidos pelo sensor, para um mesmo valor qualquer na faixa de medida.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o sensor SHT11 que mede temperatura e umidade como elemento principal e o sensor LM35 que mede temperatura para comparação da temperatura visto que o mesmo já havia sido utilizado em outros trabalhos desenvolvidos no curso.

### 2.7.1 SHT11

O SHT11 é um sensor que é capaz de medir temperatura e umidade simultaneamente. Ele é produzido pela empresa *SENSIRION*®.

A transmissão das medidas de temperatura e umidade é realizada de forma digital, o que beneficia a transmissão das medidas já que o sinal fica mais imune a interferências do meio externo.



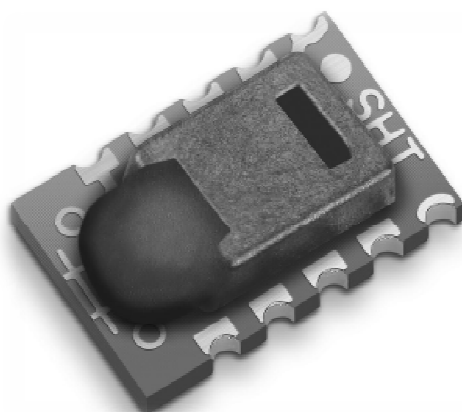


FIGURA 12 - Sensor de temperatura e umidade SHT11

Fonte: [http://www.sensirion.com/en/pdf/product\\_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf](http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf)

A sua tensão de alimentação pode variar na faixa entre 2,4 V e 5,5 V e tem a vantagem de já vir calibrado de fábrica.

A umidade no sensor é medida através de um elemento sensor capacitivo e a temperatura é medida por meio de um sensor band-gap. Este sensor aplica a tecnologia de *CMOSens*<sup>®</sup> o que lhe garante uma alta confiabilidade e estabilidade a longo prazo.

As saídas dos sensores de umidade e temperatura passam por um A/d interno de 14 bits e um circuito de interface serial como pode ser observado pelo diagrama de blocos do sensor.

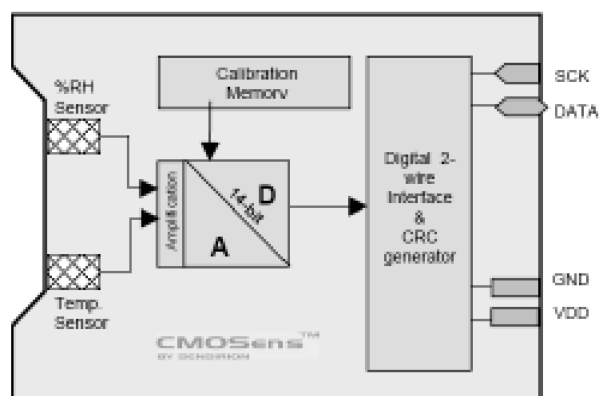


FIGURA 13 - Diagrama de blocos do sensor SHT11

Fonte: OLIVEIRA, 2010, p. 38

O sensor SHT11 apresenta um range de medidas em operação normal. Para a temperatura essa faixa se encontra entre  $-20^{\circ}\text{C}$  e  $100^{\circ}\text{C}$  sendo seu range máximo compreendido entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $125^{\circ}\text{C}$ . Para a umidade a faixa está entre

0% e aproximadamente 90%, sendo seu range máximo compreendido entre 0% e 100% de umidade relativa como a demonstrado na FIG. 14.

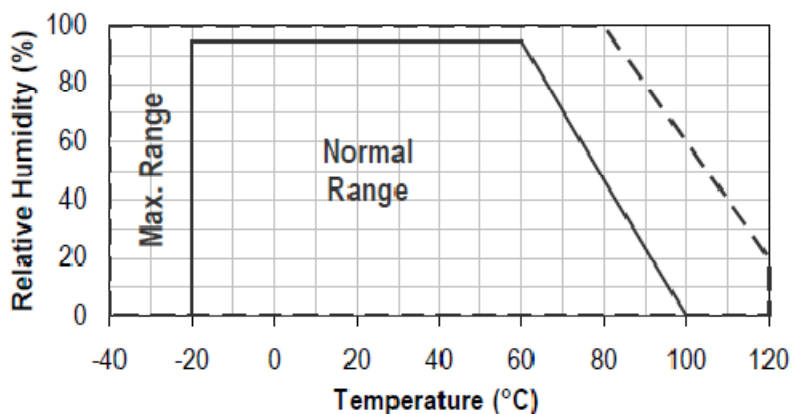


FIGURA 14 - Range de operação do SHT11

Fonte: [http://www.sensirion.com/en/pdf/product\\_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf](http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf)

Para a medição da umidade relativa o sensor SHT11 tem os seguintes valores de desempenho:

- Resolução: 0.05 %UR
- Precisão:  $\pm 3$  %UR
- Repetibilidade:  $\pm 0.1$  %UR
- Histerese:  $\pm 1$  %UR

Já para a medição de temperatura os valores de desempenho são:

- Resolução: 0.01°C
- Precisão:  $\pm 0.4$ °C
- Repetibilidade:  $\pm 0.1$ °C

Para a comunicação entre o sensor e o microcontrolador é necessária a utilização do protocolo proprietário da *SENSIRION*® denominado como *DIGITAL SBUS*.

O protocolo *DIGITAL SBUS* necessita que uma serie de etapas sejam realizadas para que se obtenha uma comunicação bem sucedida com o sensor SHT11. Para essa comunicação um sinal de clock é utilizado possibilitando a sincronização do sensor com o microcontrolador.

Além de possuir as etapas já especificadas, o sensor apresenta uma lista de comandos pré-fixada para a otimização da comunicação. Os comandos existentes no sensor são:

- “00011” para medição da temperatura;
- “00101” para a medição da umidade;
- “00111” para ler o registrador de status;
- “00110” para escrever o registrador de status;
- “11110” para se utilizar o soft reset.

Desta forma as etapas para a comunicação entre o sensor e o microcontrolador são: início de transmissão; envio do endereço de três bits “000” (único permitido) e o comando desejado formado por cinco bits. Após o envio dos bits de comando o microcontrolador aguarda o recebimento do sinal de *acknowledge* (o SHT muda o estado de *DATA* para *low* após a oitava borda de descida de SCK e libera a linha após a nona borda de descida de SCK), espera a conversão (o SHT muda o estado de *DATA* para *low* e fica na espera da leitura por parte do microcontrolador), recebe a leitura (dois bytes de medida e um de CRC(*cyclic redundancy check*) *checksum* opcional) em que o microcontrolador reconhece cada byte mudando *DATA* para *low* e ocorre o término de comunicação (após o *acknowledge* do byte CRC. Caso não esteja usando o byte de *checksum* o microcontrolador termina a comunicação após o byte menos significativo da medida). A Fig. 15 mostra um exemplo de início de transmissão.

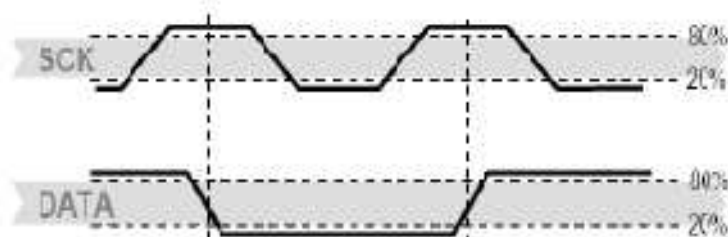


FIGURA 15 - Sequência de início de transmissão

Fonte: [http://www.sensirion.com/en/pdf/product\\_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf](http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf)

Um exemplo com as etapas para a medição de umidade é dado pela FIG. 16.

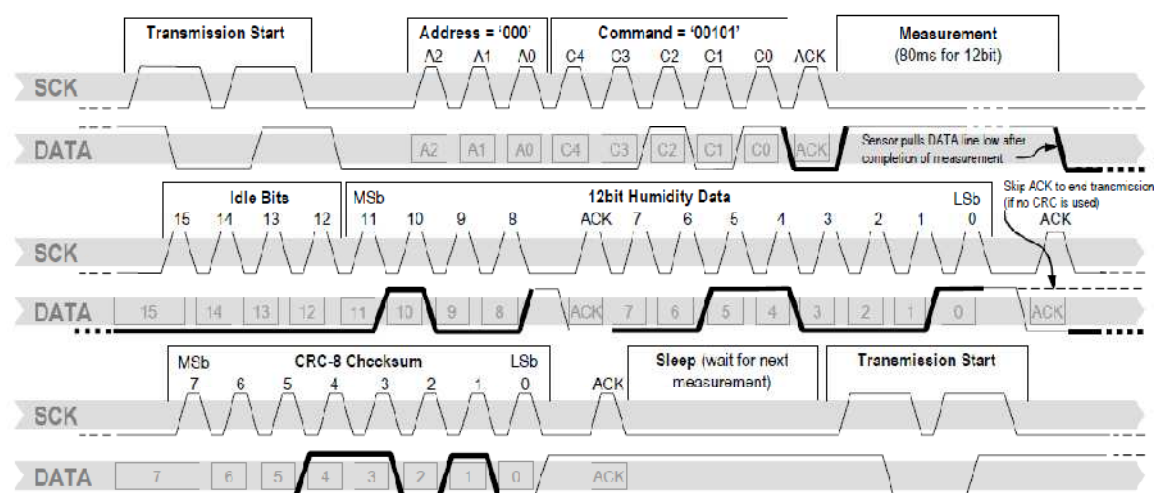


FIGURA 16 - Sequência de medição de umidade

Fonte: [http://www.sensirion.com/en/pdf/product\\_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf](http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf)

Com o fim da comunicação entre o sensor e o microcontrolador é feita a conversão do sinal digital enviado pelo sensor da temperatura e da umidade através de expressões dadas pelo *datasheet* do fabricante.

A expressão para a conversão da temperatura é:

$$T = d_1 + d_2 SO_T \quad (16)$$

Sendo a variável  $SO_T$  o valor da leitura digital e as constantes  $d_1$  e  $d_2$  determinadas de acordo com a quantidade de bits analisados e a tensão de alimentação do sensor. O valor das constantes é dado pela tabela abaixo.

TABELA 2

Constantes para cálculo da temperatura

VDD	$d_1(°C)$	$d_1(°F)$	$SO_T$	$d_2(°C)$	$d_2(°F)$
5v	-40.1	-40.2	14bit	0.01	0.18
4v	-39.8	-39.6	12bit	0.04	0.072
3.5v	-39.7	-39.5			
3v	-39.6	-39.3			
2.5v	-39.4	-38.9			

Fonte: [http://www.sensirion.com/en/pdf/product\\_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf](http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf)

Para se encontrar o valor da umidade relativa é necessária a utilização de duas fórmulas, uma onde se acha a umidade linear e outra onde se acha a umidade real que leva em conta a temperatura medida. Assim as fórmulas são:

$$UH_{Linear} = c_1 + c_2 SO_{UH} + c_3 SO_{UH}^2 \quad (17)$$

$$UH_{True} = (T_{\text{°C}} - 25) \cdot (t_1 + t_2 SO_{UH}) + UH_{Linear} \quad (18)$$

Sendo que  $SO_{UH}$  é o valor da leitura digital e  $T_{\text{°C}}$  o valor calculado para a temperatura por meio da expressão 16. As constantes  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $t_1$  e  $t_2$  variam de acordo com a quantidade de bits utilizados na leitura das medidas. O valor das constantes é dado pelas tabelas abaixo.

**TABELA 3**

Constantes para cálculo da umidade

$SO_{UH}$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$SO_T$	$t_1$	$t_2$
12bit	-20.468	0.0367	-1,60E-02	12bit	0.01	0.00008
8bit	-20.468	0.5872	-4,08E+00	8bit	0.01	0.00128

Fonte: [http://www.sensirion.com/en/pdf/product\\_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf](http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf)

### 2.7.2 LM35

A série LM35 são sensores de precisão fabricados pela *NATIONAL SEMICONDUCTOR*®. Ele é um sensor utilizado para medições de temperatura, cuja saída é proporcional à temperatura em Celsius. É a expressão abaixo que rege a saída do sensor.

$$V_{out} = 10mV \cdot T_{\text{°C}} \quad (19)$$

O LM35 é um sensor que não necessita de calibração externa ou *trimming* para fornecer, com exatidão, valores de temperatura com variações de  $\frac{1}{4}^{\circ}\text{C}$  ou até mesmo  $\frac{3}{4}^{\circ}\text{C}$  dentro da faixa de temperatura de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ .



### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Projeto

O projeto que serve como base para este trabalho tem como objetivo auxiliar no controle de temperatura e umidade do ambiente interno de uma estufa, a fim de que se obtenham condições favoráveis para o desenvolvimento de cultivos.

Foi determinada a estufa dente de serra, com a utilização de apenas uma célula, como o tipo de estufa que seria utilizada, por ser de fácil construção.

Em seguida foi feita uma maquete em papel cartão, para determinar as medidas que seriam utilizadas na construção da estufa, já que o material utilizado tinha as dimensões de 1,2mx1,2m. Assim através dessa maquete de papel foram definidas as dimensões para a estufa em acrílico: 30cm na menor altura, 40cm na maior altura, 53cm de comprimento e 40cm de largura.

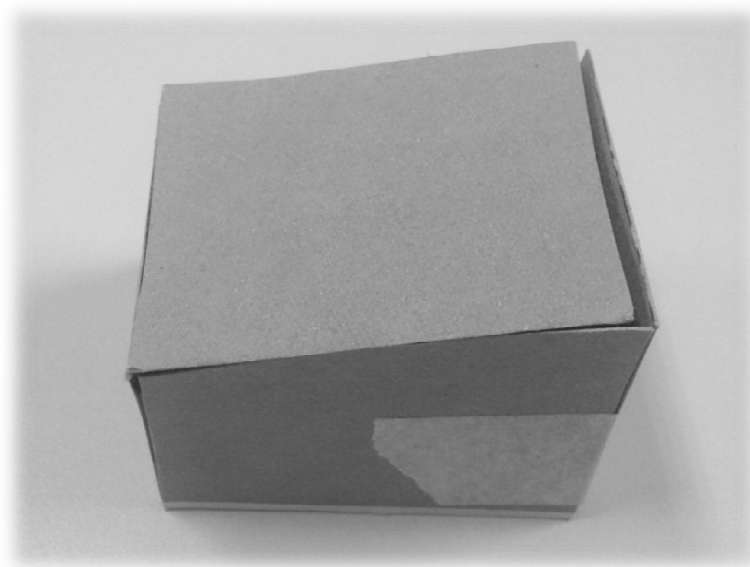


FIGURA 19 - Maquete da estufa  
Fonte: Autoria própria.

Com as medidas definidas, a estufa a base de acrílico foi construída, constituindo um protótipo que será a base para os testes a serem realizados no decorrer do trabalho.

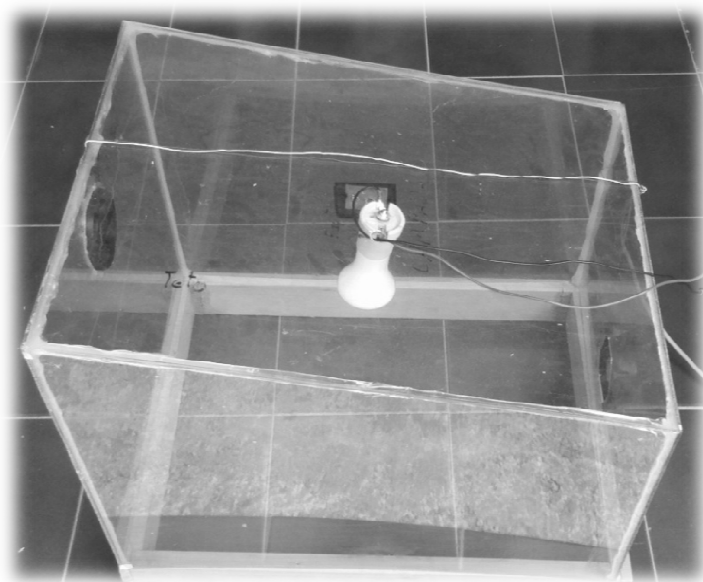


FIGURA 20 - Protótipo de estufa de acrílico  
Fonte: Autoria própria.

Assim, para se alcançar o objetivo pretendido pelo projeto a ser desenvolvido com este trabalho foram desenvolvidos quatro sistemas diferentes, que juntos são utilizados para o auxílio no controle do ambiente interno.

Estes sistemas foram divididos em sistema: de captura de dados, de controle e comunicação, de atuação e de alimentação.

O sistema de captura de dados é responsável por monitorar as variáveis de interesse no ambiente interno da estufa e enviar esses dados para o sistema de controle e comunicação. Este sistema tem como elemento principal o sensor SHT11, que realiza as medições de temperatura e umidade do ambiente interno da estufa.

O sistema de controle e comunicação é responsável por requisitar os dados do sistema de captura referentes à temperatura e a umidade da estufa, tratar esses dados recebidos e, de acordo com eles, executar uma ação a fim de controlar as variáveis de interesse. Além disso, ele faz a comunicação com o computador enviando os dados coletados pelo sistema de captura por meio de uma interface de comunicação serial.



Por este sistema possuir uma interface de comunicação com o computador, este trabalho também propõe um protótipo de interface de supervisão para o projeto, a fim de se poder acompanhar o comportamento das variáveis e possibilitar a alteração dos parâmetros de controle.

O controle empregado por este sistema é o controle *ON/OFF*, pois as variáveis que estão sendo tratadas mudam em função das alterações climáticas, sendo assim não apresentam uma alta criticidade, já que não possuem uma variação muito brusca em um pequeno intervalo de tempo.

Assim, para o controle de temperaturas elevadas foi utilizada a técnica de ventilação forçada, com o uso de um conjunto de dois ventiladores-extratores para a retirada do ar quente da estufa e para a injeção de ar externo para dentro da estufa. Para o controle de temperaturas baixas foi utilizada uma lâmpada incandescente, que desempenha o papel de aquecedor, e no controle de baixa umidade foi utilizado um umidificador.

Este sistema é composto pelo microcontrolador PIC 16F877A que contém a programação e é responsável pelo gerenciamento do sistema, pelo max232 responsável pela interface com o computador e por um LCD para acompanhamento das variáveis e configuração do controlador.

O sistema de atuação é responsável por receber os sinais de controle do sistema de controle e comunicação e realizar a interferência direta na estufa. Ele é formado por uma placa de força composta por transistor e relés e pelo aquecedor, umidificador e ventiladores-extratores.

E por último tem-se o sistema de alimentação, responsável por oferecer as tensões necessárias para o funcionamento dos componentes eletrônicos do projeto, pois os mesmos não funcionam com a tensão direta da rede alternada. Para um melhor aproveitamento este sistema foi dividido em três partes, sendo uma composta pelo transformador, outra pela fonte de alimentação de 5V localizada na placa de controle e comunicação e uma terceira parte pela fonte de 12V localizada na placa de força. Assim, além do transformador este sistema é também composto pelos reguladores de tensão. O sistema como um todo pode ser visualizado no diagrama de blocos da FIG. 21.

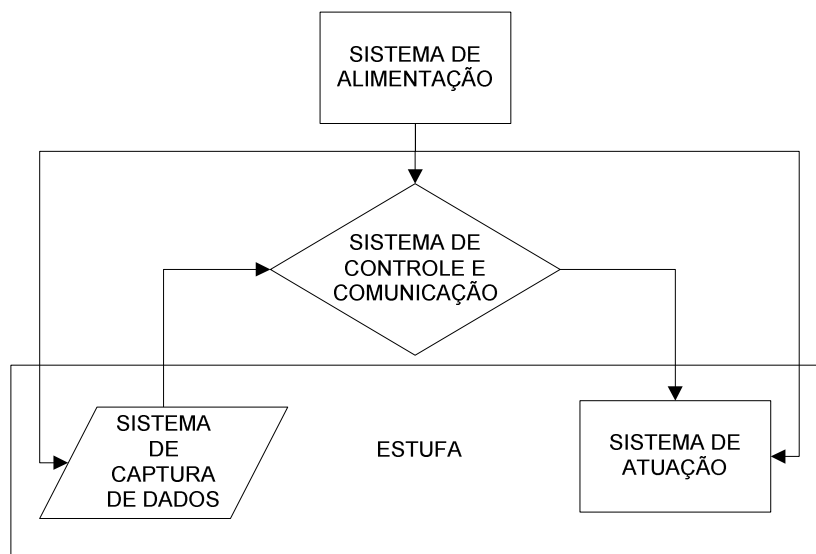


FIGURA 21 – Diagrama de blocos do projeto  
Fonte: Autoria própria.

### 3.2 Descritivo funcional

O descritivo funcional desempenha a função de orientação para a definição da programação necessária para a implementação do projeto. Nele são descritos o funcionamento do sistema como um todo, são apresentadas as condições de funcionamento do sistema e as ações que o controlador deve tomar de acordo com as situações que se apresentam no decorrer do seu funcionamento normal. Além disso, também são apresentadas as funções que o controlador deve desempenhar.

Desta forma o descritivo funcional se torna uma importante ferramenta no momento da definição da lógica de programação, pois permite decidir o que será necessário atender com a programação para que o controle do sistema possa ser desempenhado de forma satisfatória.

As funções que o controlador deste projeto irá desempenhar são:

- Realizar a comunicação com o sensor SHT11 através do protocolo proprietário e receber a medição de temperatura e umidade do sensor, a fim de que possam ser tomadas as ações necessárias para o controle.

- Permitir a configuração dos valores de *set point*, que é o valor desejado, para as variáveis a serem controladas, para que se possam estabelecer os níveis de atuação do controlador.
- Mostrar os valores de temperatura e umidade recebidos pelo sensor e as configurações em um display LCD.
- Acionar o aquecedor, os ventiladores-extratores e o umidificador de acordo com os valores medidos pelo sensor.
- Enviar os dados recebidos pelo sensor por meio de uma interface de comunicação serial para um computador, em intervalos de 1 minuto.

Desta forma, para o início do funcionamento do sistema de acordo com as condições que se deseja alcançar é necessário estabelecer os *set points* para as variáveis de temperatura e umidade, estas condições são definidas por meio de menus independentes. Com os valores de *set points* definidos pelo usuário o sistema inicia a comunicação com o sensor SHT11 que mede o valor da temperatura e da umidade no ambiente interno da estufa e as envia para o controlador para que esse execute a lógica necessária para o controle.

Com base nos valores medidos pelo sensor e recebidos pelo controlador, o mesmo irá comparar esses valores com os *set points* estipulados e tomará as atitudes correspondentes, as quais podem ser:

- Para o controle de temperaturas elevadas o controlador irá atuar quando a temperatura estiver 8% acima do nível de *set point* estipulado pelo usuário, devendo acionar os ventiladores-extratores para que a temperatura diminua. O controlador irá desativar o controle quando a temperatura estiver 8% abaixo do nível de *set point*, devendo assim desligar os ventiladores-extratores.
- Para o controle de baixas temperaturas o controlador irá atuar caso a temperatura esteja 12% abaixo do nível preestabelecido pelo usuário, devendo acionar o aquecedor da estufa para que a temperatura do ambiente interno se eleve. Sendo que quando a temperatura interna da estufa atingir o valor de 5% acima do valor de *set point* da temperatura o controlador irá desligar o aquecedor.
- Com relação ao controle da baixa umidade relativa no interior da estufa, o controlador irá atuar quando a umidade relativa estiver 10% abaixo do valor de *set point*, configurado na inicialização do sistema, acionando o umidificador

para que a valor da umidade relativa se eleve, e irá parar de atuar no sistema quando o valor da umidade relativa atingir 10% acima do valor de *set point*.

Os valores definidos para o intervalo de atuação dos controles de temperatura foram estabelecidos de forma que não houvesse o acionamento simultâneo de ambos ou que o acionamento de um deles não ocorresse em seguida à desativação do outro

O controlador continuará com este ciclo de comparação durante todo seu funcionamento, permitindo a alteração dos valores de *set point* da temperatura e da umidade em qualquer momento do funcionamento.

### 3.3 Programação

Para o desenvolvimento da lógica de programação do controlador foi utilizado o compilador PCWH da CCS®, que propicia a programação em linguagem C. Este fator é benéfico, pois a linguagem C permite a execução de tarefas mais elaboradas com um maior grau de complexidade do que a linguagem *assembly*, que é uma linguagem de máquina e possui uma estrutura muito limitada dificultando certos tipos de ações.

Além disso, o compilador da CCS® já vem com bibliotecas prontas para determinadas ações, o que permite que o programa se torne mais enxuto e de mais fácil compreensão.

Com base no descritivo funcional do sistema, onde foram definidas todas as ações que o controlador deve tomar, e no funcionamento dos componentes do sistema, desenvolveu-se o fluxograma da programação para determinação das etapas necessárias para o desempenho do controlador. Deste modo, o fluxograma torna-se uma grande ferramenta para o entendimento do programa e para a codificação do mesmo. Com base no fluxograma será feito o descritivo da programação.

## 3.3.1 FLUXOGRAMA

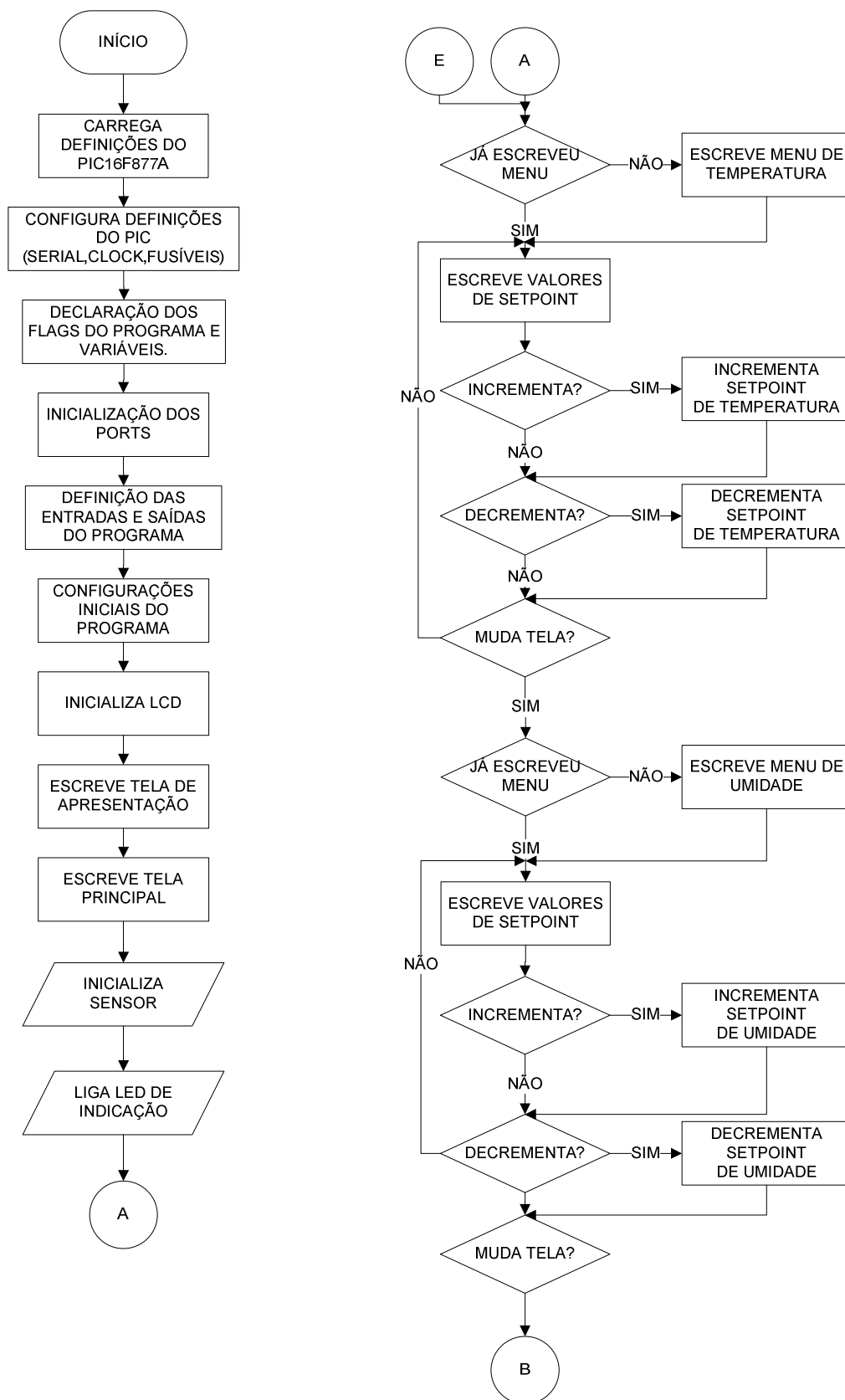


FIGURA 22 - Rotina principal parte 1  
Fonte: Autoria própria.

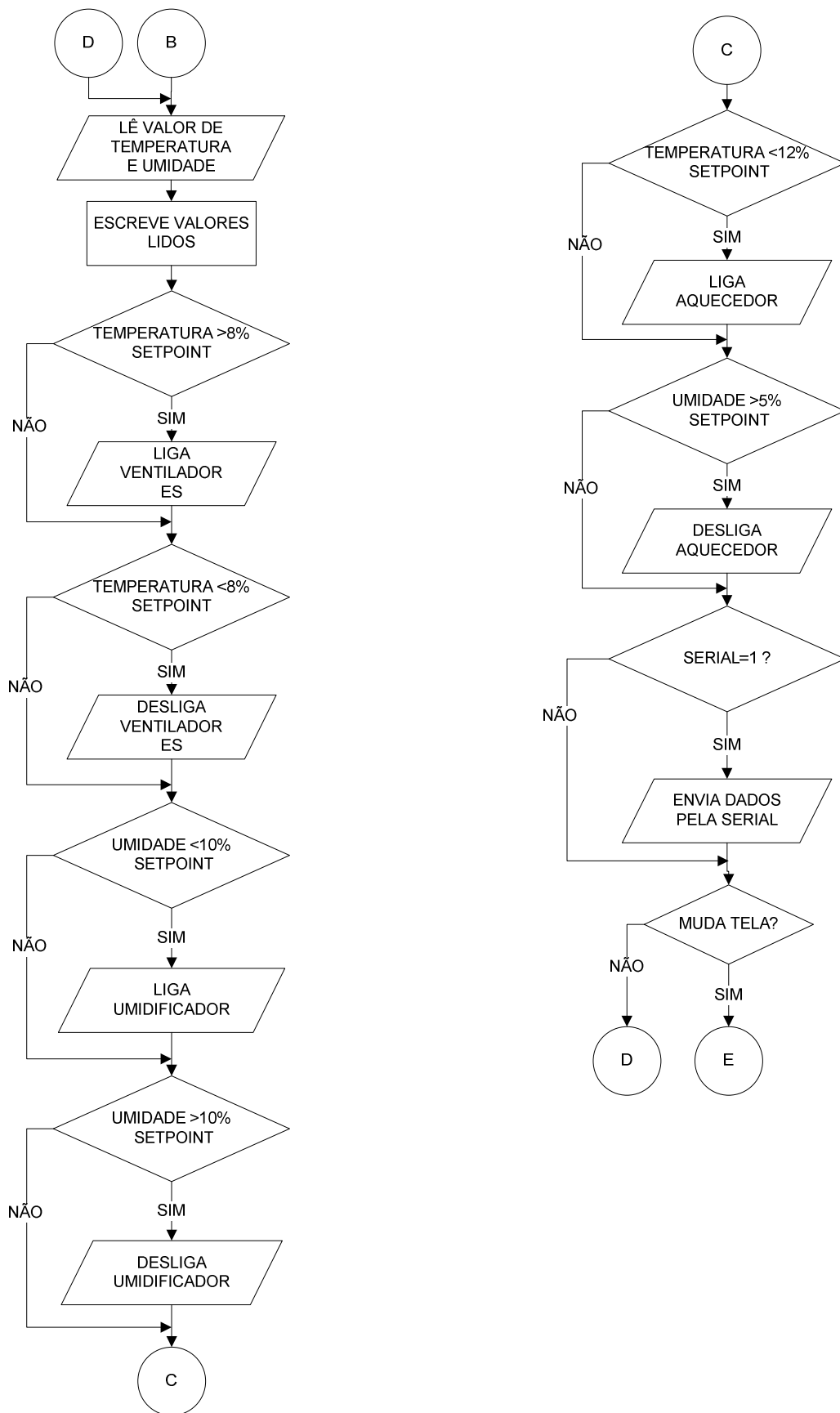


FIGURA 23 - Rotina principal parte 2  
 Fonte: Autoria própria.

Com o desenvolvimento do fluxograma foi realizada a programação do código do controlador. Os primeiros blocos, como demonstrado na primeira parte da rotina principal na FIG. 22, são responsáveis pelas definições que serão utilizadas no controlador tais como o PIC, configuração do *clock* e da serial.

Após as configurações iniciais os próximos blocos são responsáveis pela declaração dos *flags* que serão utilizadas durante o programa para indicação de estados, pela definição das variáveis internas para leitura e cálculo da temperatura e da umidade, inicialização dos *ports* para definição do modo de tratamento dos mesmos e pela definição das entradas e saídas que serão mais utilizadas no programa para um tratamento mais eficaz.

O bloco de configurações iniciais, apresentado no fluxograma é o bloco inicial do programa principal e é onde são feitas as definições das interrupções que serão utilizadas, o comportamento dos *ports* e se os mesmos serão tratados como entrada ou saída.

Para este programa foram utilizadas as interrupções externa e do *timer 2*. A interrupção externa é responsável pela alteração dos menus e a interrupção do *timer 2* é responsável pela definição do intervalo de tempo para envio dos valores de temperatura e umidade pela interface serial.

O bloco que realiza a inicialização do LCD é composto por uma sub-rotina que envia os comandos iniciais a fim de realizar a escrita no mesmo posteriormente. Os dois blocos sequenciais realizam a escrita no LCD do objetivo do sistema e do desenvolvedor do projeto.

O próximo bloco de programação estabelece a comunicação com o sensor por meio do protocolo proprietário do desenvolvedor do sensor.

Passadas essas etapas, inicia-se o *loop* principal do programa que é composto pelos blocos seguintes. Ele fica a cargo inicialmente de receber o valor de *set point* da temperatura, que é alterado por meio de dois botões, um de incremento do valor atual para controle e outro para decremento do valor atual. Esta etapa é finalizada no bloco de comparação que verifica se o botão de menu foi pressionado. Caso o mesmo tenha sido pressionado, o menu é alterado para configuração do *set point* da umidade que é realizado da mesma forma que na temperatura e, caso o botão de menu tenha sido pressionado novamente a tela muda para a de controle, representada na FIG. 23.

No primeiro bloco do *loop* principal é feita a leitura dos valores de temperatura e umidade, por meio das sub-rotinas de leitura e cálculo dos valores medidos pelo sensor. As sub-rotinas, como no bloco de inicialização do sensor, são parte do protocolo de comunicação proprietário do desenvolvedor do sensor. Quando os valores requisitados pelo controlador são recebidos, o mesmo os escreve no LCD e começa a compará-los com as condições de controle.

Os primeiros blocos de teste são responsáveis pelo controle de temperaturas altas, o segundo conjunto de blocos fica a cargo do controle de baixa umidade e o terceiro bloco fica a cargo do controle de baixa temperatura.

Os dois blocos finais do programa realizam o teste para verificar se o envio dos dados pela interface serial foi habilitado e para envio dos dados pela interface serial. Esta comunicação é habilitada pela interrupção do *timer 2* como demonstrado na FIG. 24.

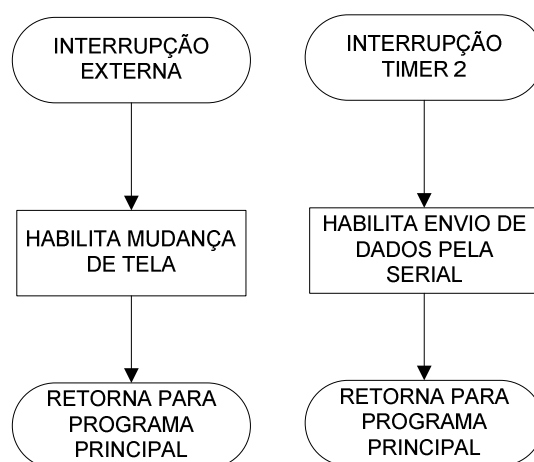


FIGURA 24 - Rotinas das interrupções  
Fonte: Autoria própria.

### 3.4 Simulação e testes

Para o início da simulação foi desenvolvido o circuito do projeto no Proteus, na ferramenta ISIS que é um programa desenvolvido pela Labcenter Electronics®. A ferramenta ISIS serve como um software de simulação de circuitos eletrônicos. O primeiro circuito para testes desenvolvido nessa ferramenta foi o circuito de comunicação e controle e o do sensor.



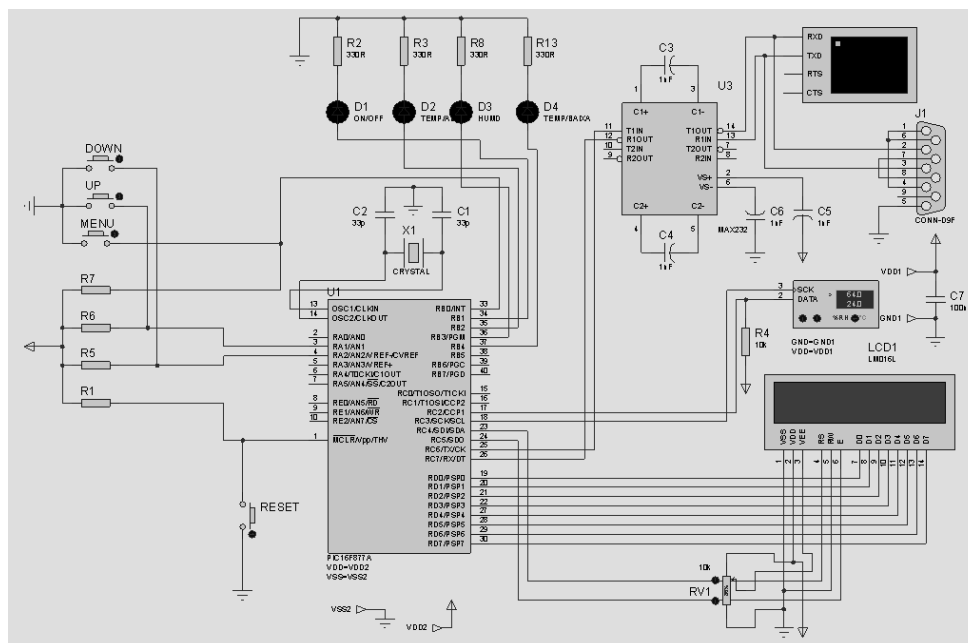


FIGURA 25 - Circuito de comunicação e controle e sensor SHT11  
Fonte: Autoria própria.

Os materiais que compõe este circuito são:

- PIC16F877A
- LCD 16x2
- Resistores
- Capacitores
- CI MAX232
- Potenciômetro
- Cristal
- Sensor SHT11

Com o desenvolvimento deste circuito foi realizada a simulação do programa desenvolvido. Os testes realizados compreenderam: escrita no LCD, funcionamento dos menus, configuração dos valores de *set point*, comunicação com o sensor, envio dos dados recebidos pelo sensor através da interface serial e acionamento das saídas de controle. Nos testes de acionamento das saídas de controle foi feita a variação dos valores de *set point* para verificação da lógica de controle. Os resultados obtidos com a simulação serão discutidos no capítulo 4.

Após a simulação do circuito de comunicação e controle foi desenvolvido o circuito de atuação do projeto.

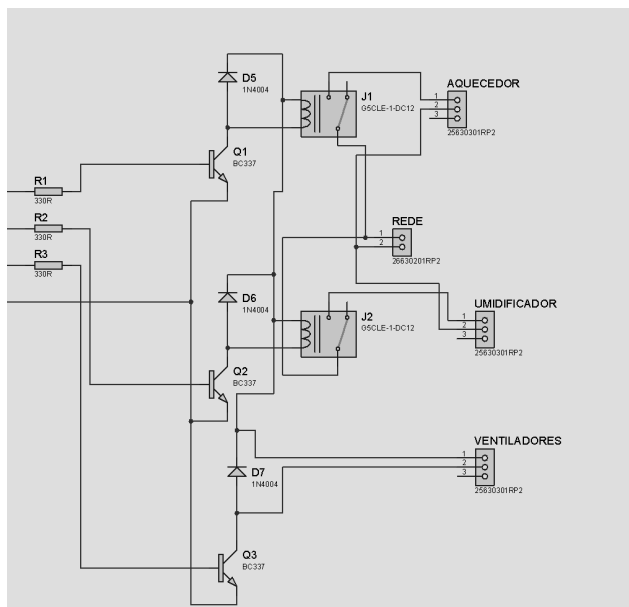


FIGURA 26 - Circuito de atuação  
Fonte: Autoria própria.

Os materiais que compõe este circuito são:

- Resistores
- Transistores
- Relés

Com o circuito de força desenvolvido foram realizados os testes de acionamento dos atuadores, os quais foram feitos com a injeção de tensão nas bases dos transistores. Os resultados obtidos com a simulação serão discutidos no capítulo 4.

Com os testes virtuais finalizados foram montados os circuitos desenvolvidos em protoboards para realização dos testes físicos, que compreenderam os mesmos realizados na ferramenta ISIS, além dos testes de influência do controle nas variáveis e da comparação do sensor SHT11 com o LM35. No capítulo 4 também será explanado o resultado dos testes físicos.

Finalizados os testes foram desenvolvidas as placas de circuito impresso dos circuitos do projeto, com o auxílio da ferramenta ARES que compõe o programa Proteus. A ferramenta ARES serve como auxílio para a confecção de

placas de circuito impresso e contém em sua biblioteca grande parte dos componentes eletrônicos. A primeira placa desenvolvida foi a do sistema de captura de dados.

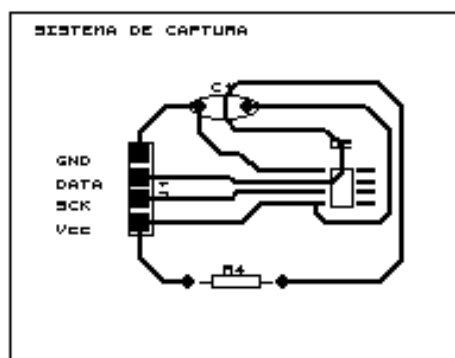


FIGURA 27 - Placa do sistema de captura  
Fonte: Autoria própria.

Após o desenvolvimento da placa o layout foi impresso em papel fotográfico e passado para a placa de cobre e esta foi corroída.

A segunda placa desenvolvida foi a do sistema de controle e comunicação.

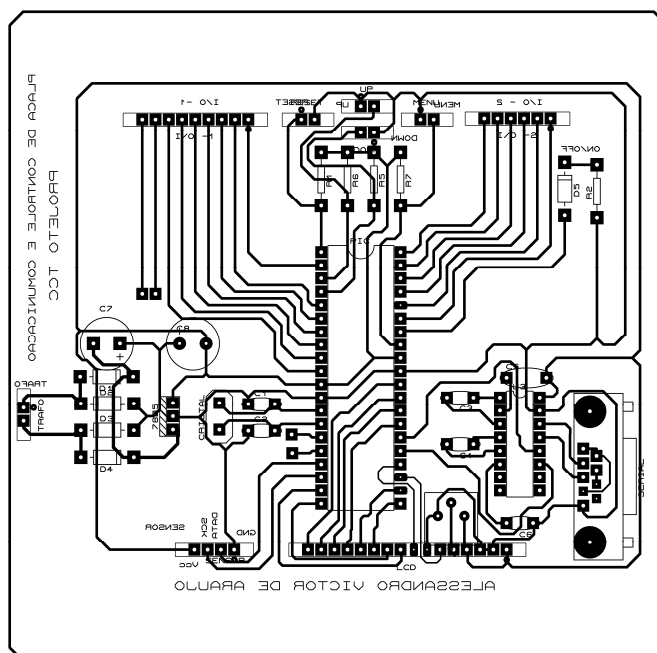


FIGURA 28 - Placa do sistema de controle e comunicação  
Fonte: Autoria própria.

O procedimento para esta placa foi o mesmo que a da placa anterior. A terceira e última placa desenvolvida foi a do sistema de atuação.

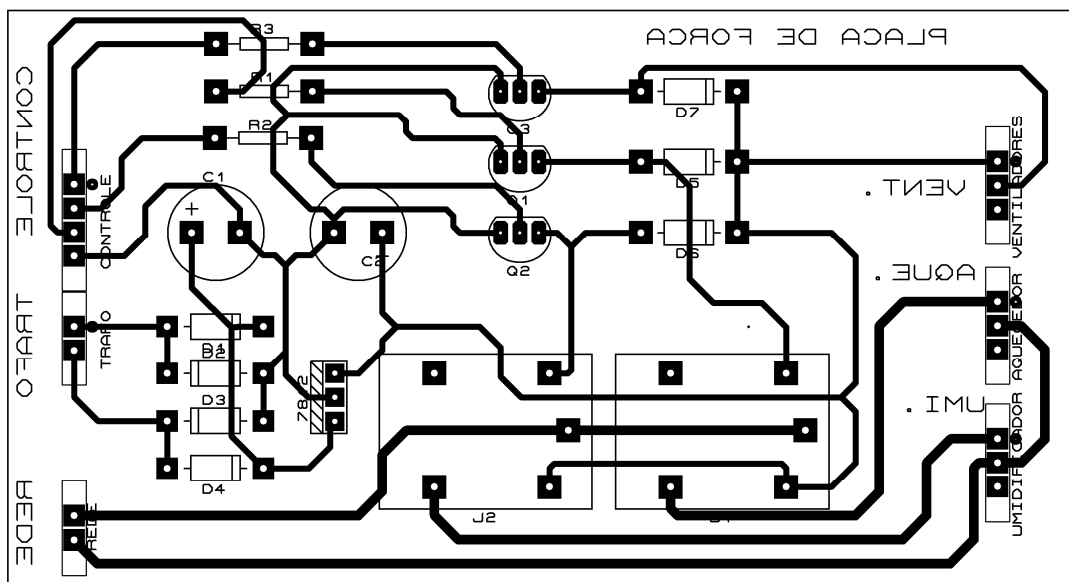


FIGURA 29 - Placa do sistema de atuação  
Fonte: Autoria própria.

### 3.5 Supervisório

Foi proposto um supervisório para monitoramento das variáveis de controle, configuração dos parâmetros do sistema e para escolha dos *set points*. A tela de supervisório proposta foi desenvolvida no software Visual Studio 2010 da Microsoft®, cuja linguagem é C#(C Sharp) que é uma linguagem de alto nível orientada a objetos.

O Visual Studio é uma ferramenta para desenvolvimento de aplicativos Windows e web e que suporta diferentes tipos de linguagens de programação.

Foi elaborada uma tela no Visual Studio composta de três abas, como mostrado nas FIG. 30,31 e 32. As duas primeiras abas são compostas de um gráfico para monitoramento das variáveis, temperatura e umidade, no decorrer do funcionamento do sistema.

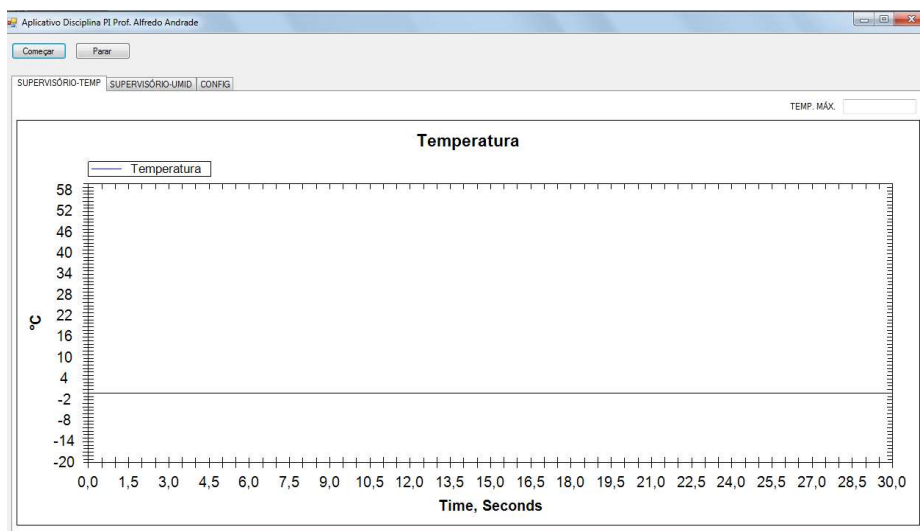


FIGURA 30 - Tela do supervisório para monitoramento da temperatura  
Fonte: Autoria própria.

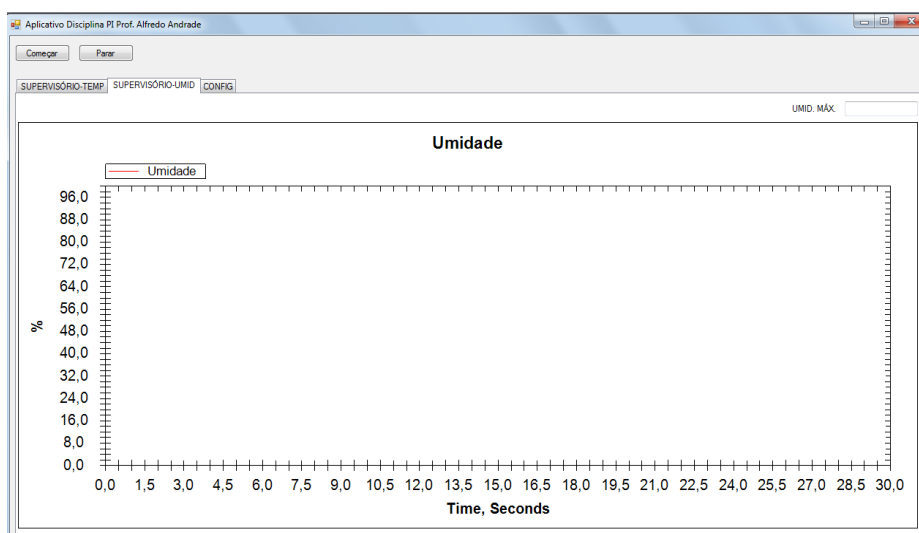


FIGURA 31 - Tela do supervisório para monitoramento da umidade  
Fonte: Autoria própria.

A terceira aba da tela do supervisório serve para configurar o canal de comunicação, o *set point*, e o intervalo de controle do controlador.

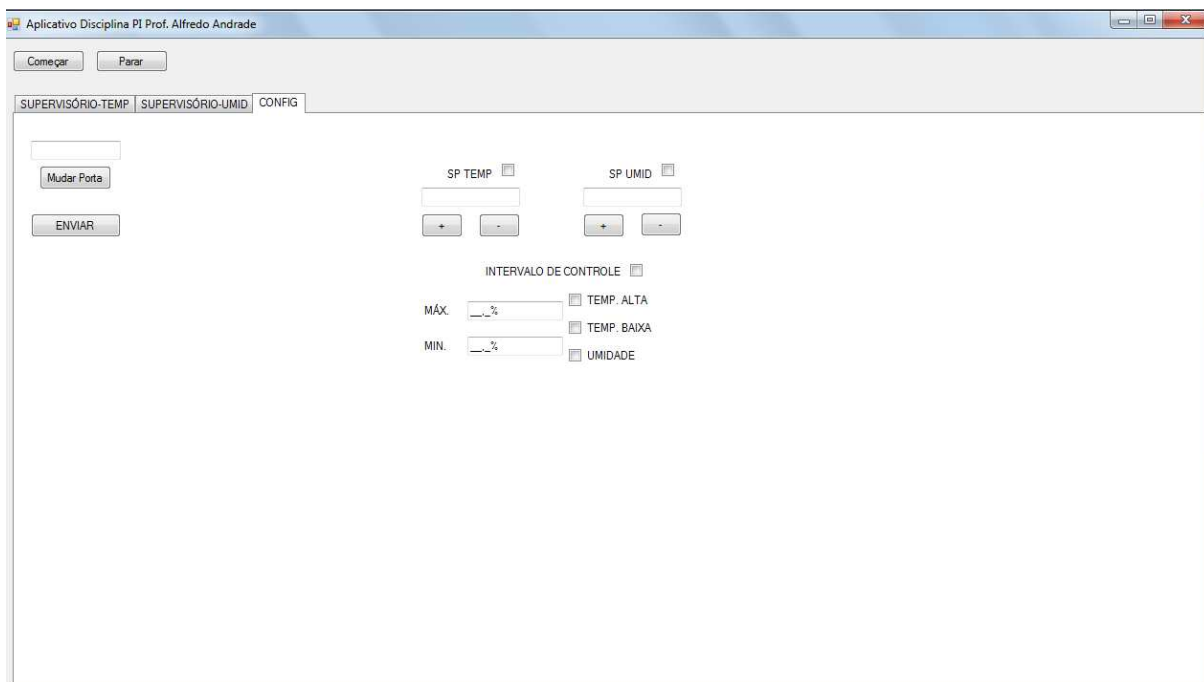


FIGURA 32 - Tela do supervisório para configuração dos parâmetros  
Fonte: Autoria própria.

## 4 RESULTADOS

A verificação do correto funcionamento do projeto iniciou-se com a simulação do programa desenvolvido com a lógica de controle para o controlador no software Proteus com a ferramenta ISIS.

A primeira etapa do teste do programa teve início com a escrita de dados no display LCD e verificou-se o correto funcionamento dos *menus*. Em seguida foi testada a comunicação do controlador com o sensor de temperatura e umidade para verificação do funcionamento do protocolo de comunicação do sensor, esses testes de comunicação foram bem sucedidos, mas verificou-se que os valores dos coeficientes para cálculo da temperatura e da umidade descritas no *datasheet* do desenvolvedor do sensor não estavam corretos. Através de uma pesquisa detalhada determinou-se os coeficientes corretos para o cálculo da temperatura e da umidade.

**TABELA 4**

Constantes para cálculo da temperatura corrigidos

VDD	$d_1(^\circ\text{C})$	SO <sub>T</sub>	$d_2(^\circ\text{C})$
5v	-40.0	14bit	0.01

Fonte: Autoria própria.

**TABELA 5**

Constantes para cálculo da umidade corrigidos

SO <sub>UH</sub>	$c_1$	$c_2$	$c_3$	SO <sub>T</sub>	$t_1$	$t_2$
12bit	-4.00	0.0405	-2.80E-06	12bit	0.01	0.00008

Fonte: Autoria própria.

Com os coeficientes corretos realizou-se outro teste com o sensor determinando desta vez o cálculo apropriado dos valores da temperatura e umidade simulados no programa.

A segunda etapa compreendeu o envio dos valores medidos pelo sensor por meio da interface serial. Este envio foi testado através do *virtual*

*terminal* disponibilizado pela ferramenta ISIS. Assim, foi verificado que a lógica implementada para o envio dos dados funcionou de forma correta.

Na etapa final do teste do programa foi implementada a lógica de controle, desta forma foi feita a parametrização dos valores de *set point* e a mudança dos valores gerados pelo sensor para simulação do controle, constatando que a lógica desenvolvida para o controle foi realizada com sucesso.

Com a finalização dos testes no programa de simulação iniciou-se os testes dos circuitos físicos. Os testes físicos foram realizados com a montagem dos circuitos no *protoboard* e nas placas de circuito impresso e compreenderam as mesmas etapas realizadas no software de simulação obtendo os mesmos resultados. O único erro encontrado nos testes físicos foi que, após o envio dos dados pela interface serial, os valores escritos de temperatura e umidade no display LCD sofriam alterações bruscas e retornavam aos valores normais. A alteração da lógica de envio dos dados pela interface serial solucionou este problema, sendo esta alteração já refletida no fluxograma do programa.

Os testes seguiram com a comparação entre o sensor utilizado neste trabalho e o sensor LM35, para comparação entre as medições de temperatura. As medições de umidade realizadas pelo sensor utilizado no trabalho não puderam ser comparadas devido à não existência de um equipamento ou outro componente que desempenhasse a mesma função.

A primeira etapa dos testes com os sensores compreendeu o acionamento do aquecedor da estufa e a coleta das medidas feitas pelos dois sensores durante um intervalo de tempo. As medidas coletadas nesta primeira etapa foram:



**TABELA 6**

Valores medidos pelos sensores com acionamento do aquecedor

<b>MEDIDAS</b>	<b>SHT11(°C)</b>	<b>LM35(°C)</b>
1	25,0	25,4
2	26,3	26
3	27,4	27,6
4	28,9	29,0
5	29,8	30,2
6	30,5	31,1
7	31,3	31,9
8	32,2	32,6
9	34,2	33,8
10	34,5	34,4

Fonte: Autoria própria.

Através das medidas mostradas na TAB. 6 nota-se que não houve uma grande diferença entre as medidas obtidas por ambos os sensores

A segunda etapa de testes foi compreendida pelos acionamentos dos ventiladores-extratores presentes na estufa, com a posterior coleta das medições realizadas pelos sensores em um período de tempo. Os dados obtidos com esse teste foram:

**TABELA 7**

Valores medidos pelos sensores com acionamento dos ventiladores-extratores

<b>MEDIDAS</b>	<b>SHT11(°C)</b>	<b>LM35(°C)</b>
1	34,0	32
2	33,6	31,6
3	32,8	30,6
4	32,1	29,8

Fonte: Autoria própria.

Nesta etapa foi verificada uma maior diferença entre as medições realizadas pelos sensores. O motivo se deve ao fato de o LM35 ser mais influenciado pela corrente de ar, devido ao seu encapsulamento aumentando

assim o efeito de troca de calor. Mas pelos dados apresentados pelo primeiro teste e pelo quarto teste, expressos a seguir, essa diferença de temperatura pode ser desconsiderada.

O terceiro teste teve o acionamento simultâneo do aquecedor e dos ventiladores-extratores, apresentando novamente uma diferença de aproximadamente 2°C entre os valores medidos pelos sensores.

**TABELA 8**

Valores medidos pelos sensores com acionamento dos controladores de temperatura

<b>MEDIDAS</b>	<b>SHT11(°C)</b>	<b>LM35(°C)</b>
<b>1</b>	30,0	28,1
<b>2</b>	28,9	27,2
<b>3</b>	28,1	26,6
<b>4</b>	26,4	24,7

Fonte: Autoria própria.

Assim, o quarto teste consistiu na desativação de todos os componentes de atuação da estufa, ficando apenas as medições dos sensores que apresentaram os seguintes dados:

**TABELA 9**

Valores medidos pelos sensores com os controladores desativados

<b>MEDIDAS</b>	<b>SHT11(°C)</b>	<b>LM35(°C)</b>
<b>1</b>	25,7	25,6
<b>2</b>	25,9	25,9
<b>3</b>	26,0	26,3

Fonte: Autoria própria.

Nota-se assim que as variações ocorridas nas medições dos sensores se devem à corrente de ar ocasionada pelo acionamento dos ventiladores-extratores.

Na sequência de testes acionou-se manualmente o aquecedor, os ventiladores-extratores e o umidificador da estufa para verificação da influencia

dos mesmos nas variáveis que não se tinha o objetivo de se controlar. Assim foi realizado o teste para verificar o comportamento da umidade quando o aquecedor estava ligado. Os dados obtidos foram:

**TABELA 10**

Valores de umidade medidos com aquecedor ativado

<b>MEDIDAS</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<b>UMIDADE (%)</b>
1	19,4	54,7
2	20,0	53,4
3	20,5	52,2
4	21,0	51,0
5	21,6	49,6
6	23,4	46,1
7	23,8	45,2

Fonte: Autoria própria.

Nota-se por meio da TAB. 10 que a umidade teve um decréscimo com o aumento da temperatura. Desta forma é possível perceber que a umidade tem um comportamento inverso ao da temperatura.

Para continuar a verificar o comportamento da umidade foi feito o teste com os ventiladores-extratores acionados. Os dados obtidos foram:

**TABELA 11**

Valores de umidade medidos com os ventiladores-extratores acionados

	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<b>UMIDADE (%)</b>
1	24,3	44,1
2	24,1	43,0
3	23,7	43,5
4	23,4	44,1
5	22,9	44,5
6	22,2	45,7
7	21,5	47,5
8	20,8	48,4

Fonte: Autoria própria.

Neste teste verificou-se que a umidade tendeu para o retorno de seu valor inicial na primeira medida da TAB. 10, mas o seu valor em medidas próximas de temperaturas obteve valores inferiores.

O teste final do comportamento da umidade foi realizado com os sistemas de atuação desligados, verificando por meio das medidas presentes na TAB. 11 que o valor da umidade tendeu a se aproximar mais do valor inicial.

**TABELA 12**

Valores de umidade medidos com os controladores desativados

<b>MEDIDAS</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<b>UMIDADE (%)</b>
1	20,6	49,6
2	20,5	49,9
3	20,4	50,4
4	20,0	51,8

Fonte: Autoria própria.

Os testes finais do projeto determinaram a influência do umidificador na temperatura interna da estufa. Esse teste foi realizado com o acionamento do umidificador e os dados coletados foram os seguintes:

**TABELA 13**

Valores de temperatura medidos com umidificador acionado

<b>MEDIDAS</b>	<b>UMIDADE (%)</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>
1	41,7	25,2
2	42,2	24,9
3	44,7	24,6
4	46	24,5
5	48,9	24,5
6	51,9	24,4
7	54,0	24,3
8	56,0	24,3

Fonte: Autoria própria.

Com o teste de variação da umidade verificou-se que a temperatura sofreu apenas um pequeno decréscimo de seu valor inicial. E por fim, o umidificador foi desligado e foram coletados novos dados para verificar o comportamento da temperatura após o desligamento. Os dados coletados foram os seguintes:

**TABELA 14**

Valores de temperatura medidos com umidificador desativado

<b>MEDIDAS</b>	<b>UMIDADE (%)</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>
<b>1</b>	58,6	24,1
<b>2</b>	61,2	24,1
<b>3</b>	61,5	24,0
<b>4</b>	62,3	23,9
<b>5</b>	62,6	23,8
<b>6</b>	61,6	24,1
<b>7</b>	61,3	24,1

Fonte: Autoria própria.

Com o último teste verificou-se que a temperatura se manteve praticamente estável após o umidificador ser desativado, notando-se que houve uma homogeneização da umidade no interior da estufa. Isso ocorreu pelo fato do umidificador estar posicionado no canto da estufa.

Com o fim dos testes notou-se que dependendo dos *set points* escolhidos os controles de temperatura e umidade podem interferir um no outro mas sem grandes problemas para o sistema.

Finalizados os testes montou-se o protótipo do controlador final que é apresentado na FIG. 33.

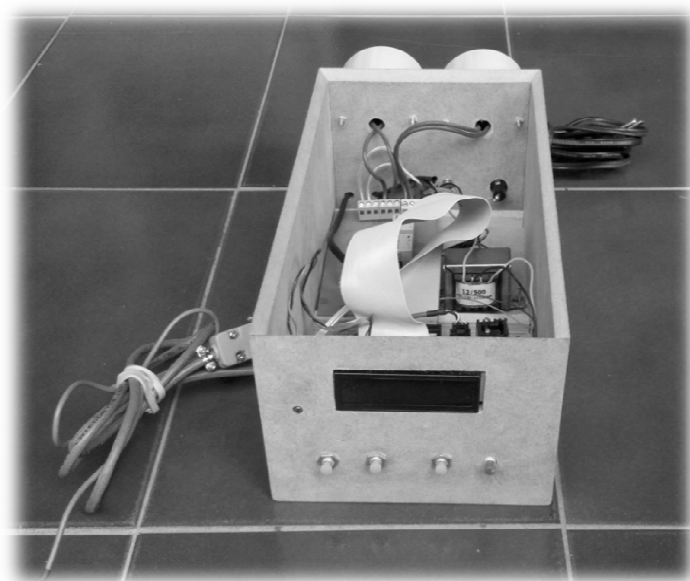


FIGURA 33 – Controlador  
Fonte: Autoria própria.

## CONCLUSÃO

O projeto desenvolvido nesse trabalho se apresentou como uma oportunidade de aprendizagem de assuntos não vistos no curso e de aplicar os conhecimentos adquiridos no decorrer do mesmo, principalmente nas áreas de programação, circuitos eletrônicos, instrumentação e controle. Estes conhecimentos propiciaram o desenvolvimento do projeto de forma que fosse possível atingir os objetivos propostos no trabalho.

O objetivo principal de desenvolver um controlador que auxiliasse no controle do ambiente interno foi atingido através da criação de uma lógica de programação desenvolvida na linguagem C e por meio do projeto de um circuito eletrônico, que juntos atuavam em condições de baixa e alta temperatura e em baixa umidade.

Foi possível observar com os testes que o sistema proposto neste trabalho obteve o funcionamento desejado, auxiliando no controle interno da estufa nas variáveis trabalhadas.

Outro teste realizado foi a comparação do sensor SHT11 com o sensor LM35. Os resultados dos testes apontaram que o sensor SHT11 possui uma boa precisão e confiabilidade para aplicação em estufas.

Os problemas encontrados no decorrer do trabalho ocorreram na etapa de simulação, no cálculo do valor de temperatura e umidade, e na lógica de programação desenvolvida para o envio dessas duas variáveis para o computador, mas ambos foram corrigidos por meio de pesquisas e na alteração do código de programação.

Visto que nos testes do sistema proposto foram utilizados protótipos de uma estufa e de um controlador, para a aplicação do mesmo em um sistema de escala real seria necessária a adaptação do sistema. Novos estudos a respeito da área de atuação do sensor utilizado e a aplicação de outras técnicas de controle do ambiente interno para verificação da melhor técnica a ser empregada também são necessários. Desta forma conclui-se que o projeto desenvolvido cumpriu os objetivos propostos no início do trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOLTON, William, *Instrumentação & Controle*. Curitiba: Hermus, 2002.
- BEGA, Egídio Alberto de et al. *Instrumentação industrial*. 2 ed, Rio de Janeiro: Interciência, 2006.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl; *Fundamentos de física: gravitação, ondas e termodinâmica*. v. 1. 7. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- METRÔLHO, José Carlos Meireles Monteiro. *Rede can para comando de atuadores em estufas agrícolas*. 1999, 201f. Dissertação (Mestrado em Electrónica Industrial) - UM, Braga, 1999.
- OGATA, Katsuhiko. *Engenharia de controle moderno*. 4. ed., São Paulo: Person Education, 2008.
- OLIVEIRA, Adalberto Luiz de Lima. *Fundamentos de controle de processo – Instrumentação*. SENAI - Programa de certificação de pessoal de manutenção. Vitória: SENAI/CST, 1999. 72 p.
- OLIVEIRA, Flavio Augusto Rodrigues de. *Instrumentação e identificação de um ambiente predial visando controle preditivo do conforto térmico*. 2010. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UNB, Brasília, 2010.
- PEREIRA, Fábio. *Microcontroladores PIC: programação em C*. 7. ed., São Paulo: Érica, 2007.
- POTTER, Merle C.; SCOTT, Elaine P. *Ciências térmicas: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transmissão de calor*. São Paulo: Thomson Learning, 2006.
- SOUZA, David José de. *Conectando o PIC 16F877A: recursos avançados*. 4. ed., São Paulo: Érica, 2007.
- INDRIUNAS, A. *Como funciona a umidade do ar*:HowStuffWorks, 2008. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/umidade-do-ar.htm>> Acesso em: 25 junho 2011, 13:40:20
- INFOESCOLA – NAVEGANDO E APRENDENDO Disponível em: <http://www.infoescola.com/fisica/temperatura/>. Acesso em: 04/05/11
- MICROCHIP. Disponível em:<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39582b.pdf>> Acesso em: 25 junho 2011, 20:40:50
- NATIONAL SEMICONDUCTOR Disponível em:<<http://www.national.com/ds/LM/LM35.pdf>>. Acesso em: 25 junho 2011, 13:40:20



PLAN TEC ESTUFAS AGRÍCOLAS Disponível em:<[www.estufasplanttec.com.br/estufas.html](http://www.estufasplanttec.com.br/estufas.html)>. Acesso em: 25 junho 2011, 22:50:10.

SENSERION Disponível em:< [www.sensirion.com/en/pdf/product\\_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf](http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf)>. Acesso em: 26 junho 2011, 16:15:20

**ANEXO DATASHEET SHT11 FABRICANTE SENSERION**

## Datasheet SHT1x (SHT10, SHT11, SHT15) Humidity and Temperature Sensor

- Fully calibrated
- Digital output
- Low power consumption
- Excellent long term stability
- SMD type package – reflow solderable



### Product Summary

SHT1x (including SHT10, SHT11 and SHT15) is Sensirion's family of surface mountable relative humidity and temperature sensors. The sensors integrate sensor elements plus signal processing on a tiny foot print and provide a fully calibrated digital output. A unique capacitive sensor element is used for measuring relative humidity while temperature is measured by a band-gap sensor. The applied CMOSens® technology guarantees excellent reliability and long term stability. Both sensors are seamlessly coupled to a 14bit analog to digital converter and a serial interface circuit. This results in superior signal quality, a fast response time and insensitivity to external disturbances (EMC).

Each SHT1x is individually calibrated in a precision humidity chamber. The calibration coefficients are programmed into an OTP memory on the chip. These coefficients are used to internally calibrate the signals from the sensors. The 2-wire serial interface and internal voltage regulation allows for easy and fast system integration. The tiny size and low power consumption makes SHT1x the ultimate choice for even the most demanding applications.

SHT1x is supplied in a surface-mountable LCC (Leadless Chip Carrier) which is approved for standard reflow soldering processes. The same sensor is also available with pins (SHT7x) or on flex print (SHTA1).

### Dimensions

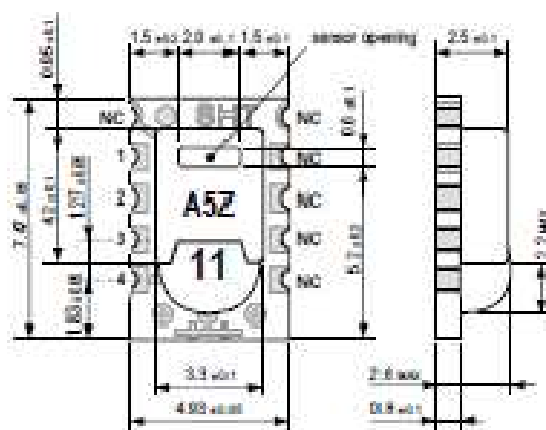


Figure 1: Drawing of SHT1x sensor packaging, dimensions in mm (1mm = 0.039inch). Sensor label gives "11" for SHT11 as an example. Contacts are assigned as follows: 1:GND, 2:DATA, 3:SCK, 4:VDD.

### Sensor Chip

SHT1x V4 – for which this datasheet applies – features a version 4 Silicon sensor chip. Besides the humidity and temperature sensors the chip contains an amplifier, A/D converter, OTP memory and a digital interface. V4 sensors can be identified by the alpha-numeric traceability code on the sensor cap – see example "A5Z" code on Figure 1.

### Material Contents

While the sensor is made of a CMOS chip the sensor housing consists of an LCP cap with epoxy glob top on an FR4 substrate. The device is fully RoHS and WEEE compliant, thus it is free of Pb, Cd, Hg, Cr(6+), PBB and PBOE.

### Evaluation Kits

For sensor trial measurements, for qualification of the sensor or even experimental application (data logging) of the sensor there is an evaluation kit EK-H4 available including SHT71 (same sensor chip as SHT1x) and 4 sensor channels, hard and software to interface with a computer. For other evaluation kits please check [www.sensirion.com/humidity](http://www.sensirion.com/humidity).

## Sensor Performance

### Relative Humidity

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution <sup>1</sup>		0.4	0.05	0.05	%RH
		8	12	12	bit
Accuracy <sup>2</sup> SHT10	typical		±4.5		%RH
	maximal	see Figure 2			
Accuracy <sup>2</sup> SHT11	typical		±3.0		%RH
	maximal	see Figure 2			
Accuracy <sup>2</sup> SHT15	typical		±2.0		%RH
	maximal	see Figure 2			
Repeatability			±0.1		%RH
Hysteresis			±1		%RH
Non-linearity	linearized		<<1		%RH
Response time <sup>3</sup> $\tau$ (63%)			8		s
Operating Range		0		100	%RH
Long term drift <sup>4</sup>	normal		< 0.5		%RH/yr

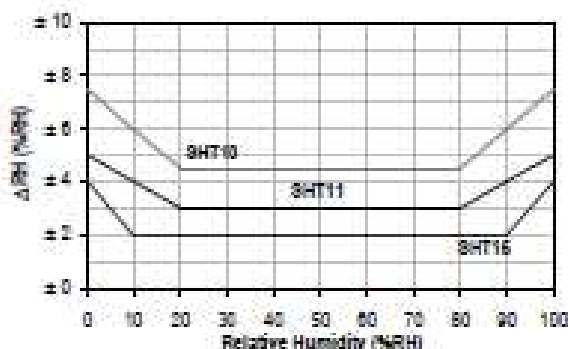


Figure 2: Maximal RH-tolerance at 25°C per sensor type.

### Electrical and General Items

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Source Voltage		2.4	3.3	5.5	V
Power Consumption <sup>5</sup>	sleep		2	5	µW
	measuring		3		mW
	average		90		µW
Communication	digital 2-wire interface, see Communication				
Storage	10 – 50°C (0 – 125°C peak), 20 – 60%RH				

<sup>1</sup> The default measurement resolution of is 14bit for temperature and 12bit for humidity. It can be reduced to 12/8bit by command to status register.

<sup>2</sup> Accuracies are tested at Outgoing Quality Control at 25°C (77°F) and 3.3V. Values exclude hysteresis and are applicable to non-condensing environments only.

<sup>3</sup> Time for reaching 63% of a step function, valid at 25°C and 1 r/s airflow.

### Temperature

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution <sup>1</sup>		0.04	0.01	0.01	°C
		12	14	14	bit
Accuracy <sup>2</sup> SHT10	typical		±0.5		°C
	maximal	see Figure 3			
Accuracy <sup>2</sup> SHT11	typical		±0.4		°C
	maximal	see Figure 3			
Accuracy <sup>2</sup> SHT15	typical		±0.3		°C
	maximal	see Figure 3			
Repeatability			±0.1		°C
Operating Range		-40		123.8	°C
		-40		254.9	°F
Response Time <sup>3</sup> $\tau$ (63%)		5		30	s
Long term drift			< 0.04		°C/yr

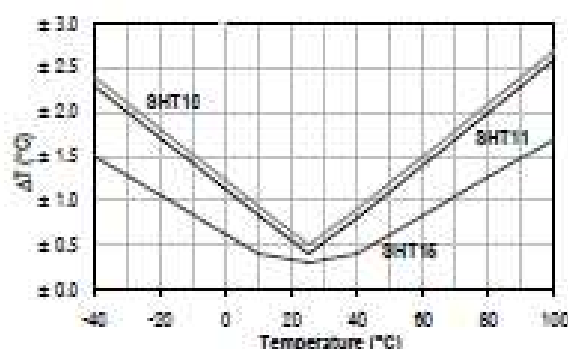


Figure 3: Maximal T-tolerance per sensor type.

### Packaging Information

Sensor Type	Packaging	Quantity	Order Number
SHT10	Tape & Reel	2000	1-100218-04
	Tape & Reel	100	1-100051-04
SHT11	Tape & Reel	400	1-100098-04
	Tape & Reel	2000	1-100524-04
	Tape & Reel	100	1-100085-04
SHT15	Tape & Reel	400	1-100093-04

This datasheet is subject to change and may be amended without prior notice.

<sup>4</sup> Value may be higher in environments with high contents of volatile organic compounds. See Section 1.3 of Users Guide.

<sup>5</sup> Values for VDD=3.3V at 25°C, average value at one 12bit measurement per second.

<sup>6</sup> Response time depends on heat capacity of and thermal resistance to sensor substrate.

## Users Guide SHT1x

### 1 Application Information

#### 1.1 Operating Conditions

Sensor works stable within recommended normal range – see Figure 4. Long term exposures to conditions outside normal range, especially at humidity >80%RH, may temporarily offset the RH signal (+3 %RH after 60h). After return to normal range it will slowly return towards calibration state by itself. See Section 1.4 'Reconditioning Procedure' to accelerate eliminating the offset. Prolonged exposure to extreme conditions may accelerate ageing.

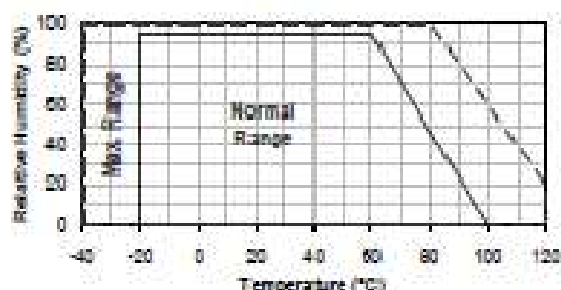


Figure 4: Operating Conditions

#### 1.2 Soldering instructions

For soldering SHT1x standard reflow soldering ovens may be used. The sensor is qualified to withstand soldering profile according to IPC/JEDEC J-STD-020D with peak temperatures at 260°C during up to 40sec including Pb-free assembly in IR/Convection reflow ovens.

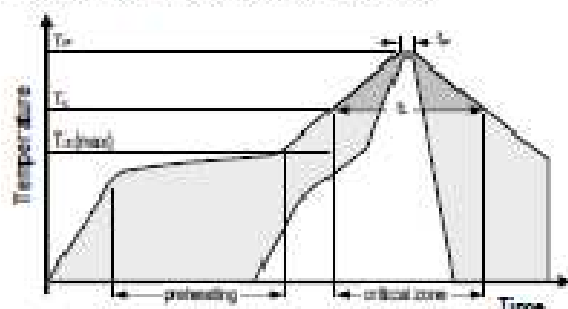


Figure 5: Soldering profile according to JEDEC standard.  $T_p < 260^\circ\text{C}$  and  $t_p < 40\text{sec}$  for Pb-free assembly.  $T_1 < 220^\circ\text{C}$  and  $t_1 < 150\text{sec}$ . Ramp-up/down speeds shall be  $< 5^\circ\text{C}/\text{sec}$ .

For soldering in Vapor Phase Reflow (VPR) ovens the peak conditions are limited to  $T_p < 233^\circ\text{C}$  during  $t_p < 60\text{sec}$  and ramp-up/down speeds shall be limited to  $10^\circ\text{C}/\text{sec}$ . For manual soldering contact time must be limited to 5 seconds at up to  $350^\circ\text{C}$ <sup>1</sup>.

<sup>1</sup>  $233^\circ\text{C} = 451^\circ\text{F}$ ,  $260^\circ\text{C} = 500^\circ\text{F}$ ,  $350^\circ\text{C} = 662^\circ\text{F}$

**IMPORTANT:** After soldering the devices should be stored at >75%RH for at least 12h to allow the polymer to re-hydrate. Otherwise the sensor may read an offset that slowly disappears if exposed to ambient conditions. Alternatively the re-hydration process may be performed at ambient conditions (>40%RH) during more than 5 days.

In no case, neither after manual nor reflow soldering, a board wash shall be applied. Therefore it is strongly recommended to use 'no-clean' solder paste. In case of application with exposure of the sensor to corrosive gases or condensed water (i.e. environments with high relative humidity) the soldering pads shall be sealed (e.g. conformal coating) to prevent loose contacts or short cuts.

For the design of the SHT1x footprint it is recommended to use dimensions according to Figure 7. Sensor pads are coated with 35µm Cu, 5µm Ni and 0.1µm Au.

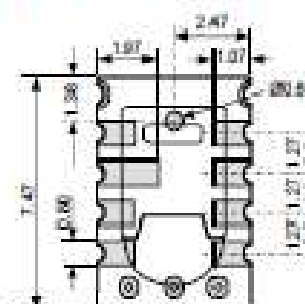


Figure 6: Rear side electrodes of sensor, view from top side.

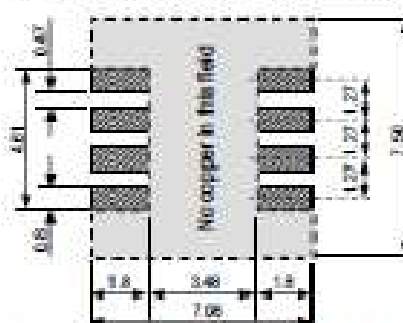


Figure 7: Recommended footprint for SHT1x. Values in mm.

#### 1.3 Storage Conditions and Handling Instructions

It is of great importance to understand that a humidity sensor is not a normal electronic component and needs to be handled with care. Chemical vapors at high concentration in combination with long exposure times may offset the sensor reading.

For these reasons it is recommended to store the sensors in original packaging including the sealed ESD bag at

**Datasheet SHT1x**

following conditions: Temperature shall be in the range of 10°C – 50°C (0 – 125°C for limited time) and humidity at 20 – 60%RH (sensors that are not stored in ESD bags). For sensors that have been removed from the original packaging we recommend to store them in ESD bags made of metal-in PE-HD<sup>1</sup>.

In manufacturing and transport the sensors shall be prevented of high concentration of chemical solvents and long exposure times. Out-gassing of glues, adhesive tapes and stickers or out-gassing packaging material such as bubble foils, foams, etc. shall be avoided. Manufacturing area shall be well ventilated.

For more detailed information please consult the document "Handling instructions" or contact Sensirion.

#### 1.4 Reconditioning Procedure

As stated above extreme conditions or exposure to solvent vapors may offset the sensor. The following reconditioning procedure may bring the sensor back to calibration state:

Baking: 100 – 105°C at < 5%RH for 10h  
 Re-Hydration: 20 – 30°C at ~ 75%RH for 12h<sup>2</sup>

#### 1.5 Temperature Effects

Relative humidity reading strongly depends on temperature. Therefore, it is essential to keep humidity sensors at the same temperature as the air of which the relative humidity is to be measured. In case of testing or qualification the reference sensor and test sensor must show equal temperature to allow for comparing humidity readings.

If the SHT1x shares a PCB with electronic components that produce heat it should be mounted in a way that prevents heat transfer or keeps it as low as possible. Measures to reduce heat transfer can be ventilation, reduction of copper layers between the SHT1x and the rest of the PCB or milling a slit into the PCB around the sensor (see Figure 8).

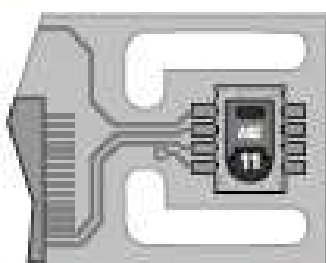


Figure 8: Top view of example of mounted SHT1x with slits milled into PCB to minimize heat transfer.

<sup>1</sup> For example, 591 anti-static bag, product "1010" with zipper.

<sup>2</sup> 75%RH can conveniently be generated with saturated NaCl solution. 100 – 105°C correspond to 212 – 221°F, 20 – 30°C correspond to 68 – 86°F

Furthermore, there are self-heating effects in case the measurement frequency is too high. Please refer to Section 3.3 for detailed information.

#### 1.6 Light

The SHT1x is not light sensitive. Prolonged direct exposure to sunshine or strong UV radiation may age the housing.

#### 1.7 Membranes

SHT1x does not contain a membrane at the sensor opening. However, a membrane may be added to prevent dirt and droplets from entering the housing and to protect the sensor. It will also reduce peak concentrations of chemical vapors. For optimal response times the air volume behind the membrane must be kept minimal. Sensirion recommends and supplies the SF1 filter cap for optimal IP54 protection (for higher protection – i.e. IP67 - SF1 must be sealed to the PCB with epoxy). Please compare Figure 9.

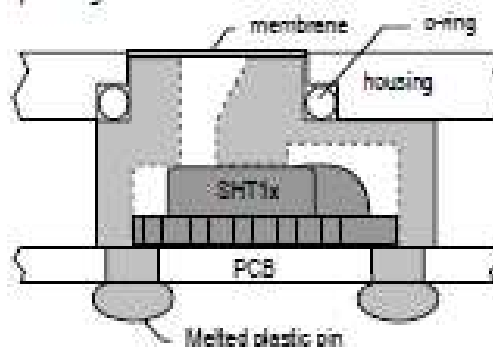


Figure 9: Side view of SF1 filter cap mounted between PCB and housing wall. Volume below membrane is kept minimal.

#### 1.8 Materials Used for Sealing / Mounting

Many materials absorb humidity and will act as a buffer increasing response times and hysteresis. Materials in the vicinity of the sensor must therefore be carefully chosen. Recommended materials are: Any metals, LCP, POM (Delrin), PTFE (Teflon), PE, PEEK, PP, PB, PPS, PSU, PVDF, PVF.

For sealing and gluing (use sparingly): Use high filled epoxy for electronic packaging (e.g. glob top, underfill), and Silicone. Out-gassing of these materials may also contaminate the SHT1x (see Section 1.3). Therefore try to add the sensor as a last manufacturing step to the assembly, store the assembly well ventilated after manufacturing or bake at >50°C for 24h to outgas contaminants before packing.

#### 1.9 Wiring Considerations and Signal Integrity

Carrying the SCK and DATA signal parallel and in close proximity (e.g. in wires) for more than 10cm may result in cross talk and loss of communication. This may be

## Datasheet SHT1x

resolved by routing VDD and/or GND between the two data signals and/or using shielded cables. Furthermore, slowing down SCK frequency will possibly improve signal integrity. Power supply pins (VDD, GND) must be decoupled with a 100nF capacitor if wires are used. Capacitor should be placed as close to the sensor as possible. Please see the Application Note "ESD, Latch-up and EMC" for more information.

### 1.10 ESD (Electrostatic Discharge)

ESD immunity is qualified according to MIL-STD-883E, method 3015 (Human Body Model at  $\pm 2$  kV).

Latch-up immunity is provided at a force current of  $\pm 100$  mA with  $T_{amb} = 80^\circ\text{C}$  according to JEDEC78A. See Application Note "ESD, Latch-up and EMC" for more information.

## 2 Interface Specifications

Pin	Name	Comment
1	GND	Ground
2	DATA	Serial Data, bidirectional
3	SCK	Serial Clock, input only
4	VDD	Source Voltage
NC	NC	Must be left unconnected




Table 1: SHT1x pin assignment, NC remain floating.

### 2.1 Power Pins (VDD, GND)

The supply voltage of SHT1x must be in the range of 2.4 – 5.5V, recommended supply voltage is 3.3V. Power supply pins Supply Voltage (VDD) and Ground (GND) must be decoupled with a 100 nF capacitor – see Figure 10.

The serial interface of the SHT1x is optimized for sensor readout and effective power consumption. The sensor cannot be addressed by I<sup>2</sup>C protocol; however, the sensor can be connected to an I<sup>2</sup>C bus without interference with other devices connected to the bus. The controller must switch between the protocols.

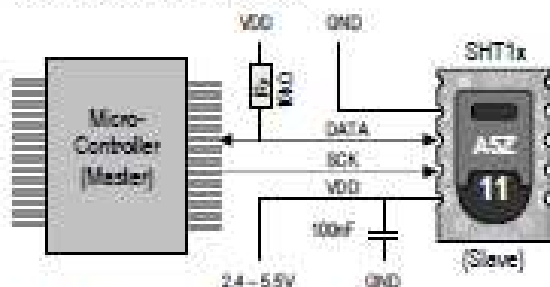


Figure 10: Typical application circuit, including pull up resistor  $R_p$  and decoupling of VDD and GND by a capacitor.

### 2.2 Serial clock input (SCK)

SCK is used to synchronize the communication between microcontroller and SHT1x. Since the interface consists of fully static logic there is no minimum SCK frequency.

### 2.3 Serial data (DATA)

The DATA tri-state pin is used to transfer data in and out of the sensor. For sending a command to the sensor, DATA is valid on the rising edge of the serial clock (SCK) and must remain stable while SCK is high. After the falling edge of SCK the DATA value may be changed. For safe communication DATA valid shall be extended  $T_{D,u}$  and  $T_{D,o}$  before the rising and after the falling edge of SCK, respectively – see Figure 11. For reading data from the sensor, DATA is valid  $T_v$  after SCK has gone low and remains valid until the next falling edge of SCK.

To avoid signal contention the microcontroller must only drive DATA low. An external pull-up resistor (e.g. 10k $\Omega$ ) is required to pull the signal high – it should be noted that pull-up resistors may be included in I/O circuits of microcontrollers. See Table 2 for detailed I/O characteristic of the sensor.

### 2.4 Electrical Characteristics

The electrical characteristics such as power consumption, low and high level input and output voltages depend on the supply voltage. Table 2 gives electrical characteristics of SHT1x with the assumption of 5V supply voltage if not stated otherwise.

Parameter	Conditions	min	typ	max	Units
Power supply DC <sup>10</sup>		2.4	3.3	5.5	V
Supply current	measuring		0.55	1	mA
	average <sup>11</sup>	2	28		$\mu\text{A}$
	sleep		0.3	1.5	$\mu\text{A}$
Low level output voltage	$I_{O,L} < 4$ mA	0		250	mV
High level output voltage	$R_p < 25$ k $\Omega$	90%		100%	VDD
Low level input voltage	Negative going	0%		20%	VDD
High level input voltage	Positive going	80%		100%	VDD
Input current on pads				1	$\mu\text{A}$
Output current	on			4	mA
	Tri-stated (off)		10	20	$\mu\text{A}$

Table 2: SHT1x DC characteristics.  $R_p$  stands for pull up resistor, while  $I_{O,L}$  is low level output current.

<sup>10</sup> Recommended voltage supply for highest accuracy is 3.3V, due to sensor calibration.

<sup>11</sup> Minimum value with one measurement of 8bit resolution without OTP reset per second. Typical value with one measurement of 12bit resolution per second.

**Datasheet SHT1x**

Absolute maximum ratings for VDD versus GND are +7V and -0.3V. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect the sensor reliability (e.g. hot carrier degradation, oxide breakdown). For proper communication with the sensor it is essential to make sure that signal design is strictly within the limits given in Table 3 and Figure 11.

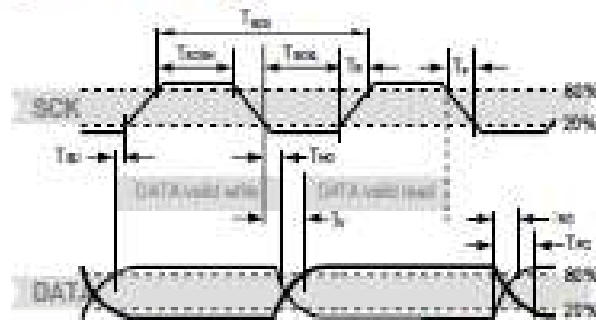


Figure 11: Timing Diagram, abbreviations are explained in Table 3. Bold DATA line is controlled by the sensor, plain DATA line is controlled by the micro-controller. Note that DATA valid read time is triggered by falling edge of anterior toggle.

	Parameter	Conditions	min	typ	max	Units
F <sub>SCK</sub>	SCK Frequency	VDD > 4.5V	0	0.1	5	MHz
		VDD < 4.5V	0	0.1	1	MHz
T <sub>SCKL</sub>	SCK low time		100			ns
T <sub>R</sub> /T <sub>F</sub>	SCK rise/fall time		1	200	*	ns
T <sub>FHL</sub>	DATA fall time	OL = 5pF	3.5	10	20	ns
		OL = 100pF	30	40	200	ns
T <sub>RH</sub>	DATA rise time		**	**	**	ns
T <sub>V</sub>	DATA valid time		200	250	***	ns
T <sub>DU</sub>	DATA setup time		100	150	***	ns
T <sub>HL</sub>	DATA hold time		10	15	***	ns

\*  $T_{R,HL} + T_{F,HL} = (F_{SCK})^{-1} - T_{SCKH} - T_{SCKL}$

\*\* T<sub>RH</sub> is determined by the R<sub>PC<sub>DATA</sub></sub> line-constant at DATA line

\*\*\* T<sub>V,HL</sub> and T<sub>DU,HL</sub> depend on external pull-up resistor (R<sub>p</sub>) and total bus line capacitance (C<sub>bus</sub>) at DATA line

\*\*\*\* T<sub>HL</sub> = T<sub>V</sub> - min(T<sub>R</sub>, T<sub>F</sub>)

Table 3: SHT1x I/O signal characteristics, OL stands for Output Load, entries are displayed in Figure 11.

## 3 Communication with Sensor

### 3.1 Start up Sensor

As a first step the sensor is powered up to chosen supply voltage VDD. The slew rate during power up shall not fall below 1V/μs. After power-up the sensor needs 11ms to get to Sleep State. No commands must be sent before that time.

### 3.2 Sending a Command

To initiate a transmission, a Transmission Start sequence has to be issued. It consists of a lowering of the DATA line while SCK is high, followed by a low pulse on SCK and raising DATA again while SCK is still high – see Figure 12.

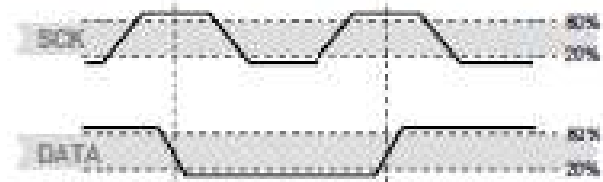


Figure 12: "Transmission Start" sequence

The subsequent command consists of three address bits (only '000' is supported) and five command bits. The SHT1x indicates the proper reception of a command by pulling the DATA pin low (ACK bit) after the falling edge of the 8th SCK clock. The DATA line is released (and goes high) after the falling edge of the 9th SCK clock.

Command	Code
Reserved	0000x
Measure Temperature	00011
Measure Relative Humidity	00101
Read Status Register	00111
Write Status Register	00110
Reserved	0101x-1110x
Soft reset, resets the interface, clears the status register to default values. Wait minimum 11 ms before next command	11110

Table 4: SHT1x list of commands

### 3.3 Measurement of RH and T

After issuing a measurement command ('00000101' for relative humidity, '00000011' for temperature) the controller has to wait for the measurement to complete. This takes a maximum of 2080/320 ms for a 8/12/14bit measurement. The time varies with the speed of the internal oscillator and can be lower by up to 30%. To signal the completion of a measurement, the SHT1x pulls data line low and enters Idle Mode. The controller must wait for this Data Ready signal before restarting SCK to readout the data. Measurement data is stored until readout, therefore the controller can continue with other tasks and readout at its convenience.

Two bytes of measurement data and one byte of CRC checksum (optional) will then be transmitted. The micro controller must acknowledge each byte by pulling the DATA line low. All values are MSB first, right justified (e.g. the 5<sup>th</sup> SCK is MSB for a 12bit value, for a 8bit result the first byte is not used).



Communication terminates after the acknowledge bit of the CRC data. If CRC-8 checksum is not used the controller may terminate the communication after the measurement data LSB by keeping ACK high. The device automatically returns to Sleep Mode after measurement and communication are completed.

**Important:** To keep self heating below 0.1°C, SHT1x should not be active for more than 10% of the time – e.g. maximum one measurement per second at 12bit accuracy shall be made.

### 3.4 Connection reset sequence

If communication with the device is lost the following signal sequence will reset the serial interface: While leaving DATA high, toggle SCK nine or more times – see Figure 13. This must be followed by a Transmission Start sequence preceding the next command. This sequence resets the interface only. The status register preserves its content.

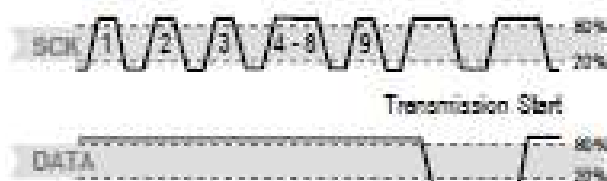


Figure 13: Connection Reset Sequence

### 3.5 CRC Checksum calculation

The whole digital transmission is secured by an 8bit checksum, it ensures that any wrong data can be detected and eliminated. As described above this is an additional feature of which may be used or abandoned. Please consult Application Note "CRC Checksum" for information on how to calculate the CRC.

### 3.6 Status Register

Some of the advanced functions of the SHT1x such as selecting measurement resolution, end-of-battery notice, use of OTP reload or using the heater may be activated by sending a command to the status register. The following section gives a brief overview of these features.

After the command Status Register Read or Status Register Write – see Table 4 – the content of 8 bits of the status register may be read out or written. For the communication compare Figure 14 and Figure 15 – the assignment of the bits is displayed in Table 5.



Figure 14: Status Register Write



Figure 15: Status Register Read

Examples of full communication cycle are displayed in Figure 16 and Figure 17.

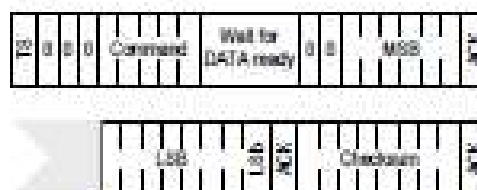


Figure 16: Overview of Measurement Sequence. TS = Transmission Start, MSB = Most Significant Byte, LSB = Last Significant Byte, Lsb = Last Significant Bit.

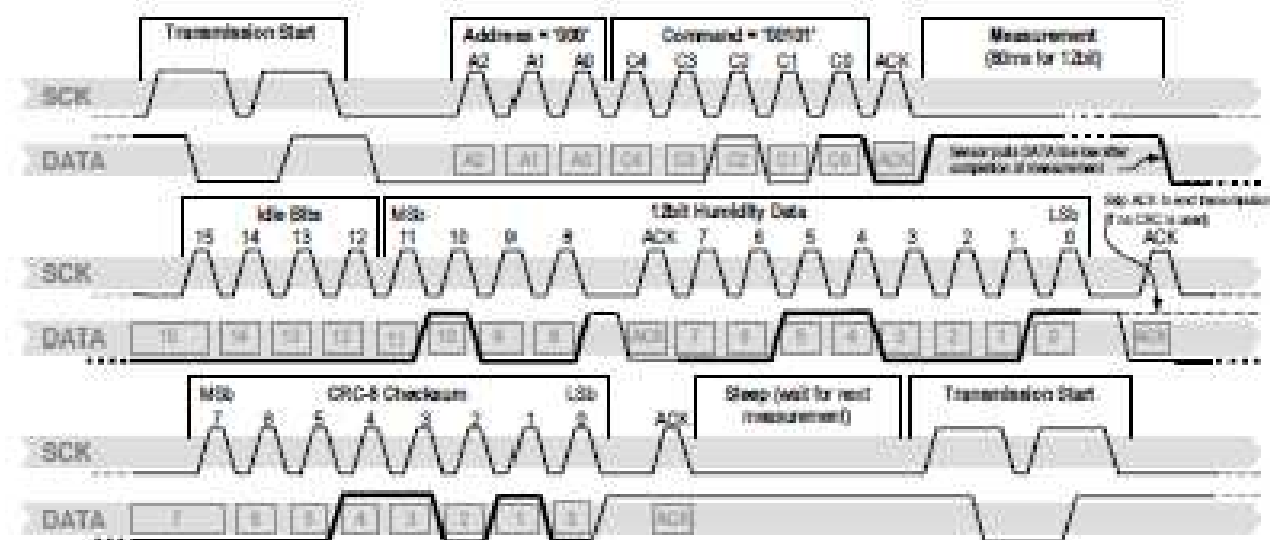


Figure 17: Example RH measurement sequence for value "000010000110001" = 1073 = 35.50%RH (without temperature compensation). DATA valid times are given and referenced in boxes on DATA line. Bold DATA lines are controlled by sensor while plain lines are controlled by the micro-controller.

Bit	Type	Description	Default
7		reserved	0
6	R	End of Battery (low voltage detection) 0 <sup>1</sup> for VDD > 2.47V 1 <sup>1</sup> for VDD < 2.47V	X No default value, bit is only updated after a measurement
5		reserved	0
4		reserved	0
3		For Testing only, do not use	0
2	R/W	Heater	0 off
1	R/W	no reload from OTP	0 reload
0	R/W	1 <sup>1</sup> = 8bit RH / 12bit Temp. resolution 0 <sup>1</sup> = 12bit RH / 14bit Temp. resolution	0 12bit RH 14bit Temp.

Table 5: Status Register Bits

**Measurement resolution** The default measurement resolution of 14bit (temperature) and 12bit (humidity) can be reduced to 12 and 8bit. This is especially useful in high speed or extreme low power applications.

**End of Battery** function detects and notifies VDD voltages below 2.47V. Accuracy is ±0.05V.

**Heater**: An on chip heating element can be addressed by writing a command into status register. The heater may increase the temperature of the sensor by 5 – 10°C<sup>12</sup> beyond ambient temperature. The heater draws roughly 8mA @ 5V supply voltage.

For example the heater can be helpful for functionality analysis: Humidity and temperature readings before and after applying the heater are compared. Temperature shall increase while relative humidity decreases at the same time. Dew point shall remain the same.

Please note: The temperature reading will display the temperature of the heated sensor element and not ambient temperature. Furthermore, the sensor is not qualified for continuous application of the heater.

**OTP reload**: With this operation the calibration data is uploaded to the register before each measurement. This may be deactivated for reducing measurement time by about 10ms.

## 4 Conversion of Signal Output

### 4.1 Relative Humidity

For compensating non-linearity of the humidity sensor – see Figure 18 – and for obtaining the full accuracy of the sensor it is recommended to convert the humidity readout

( $SO_{RH}$ ) with the following formula with coefficients given in Table 6:

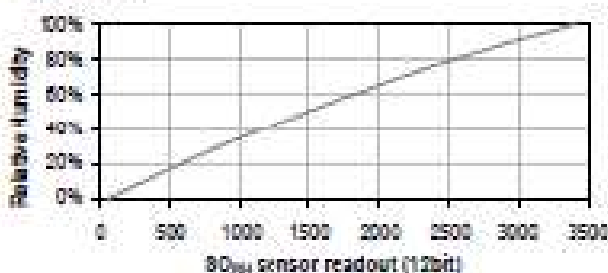
$$RH_{true} = c_1 + c_2 \cdot SO_{RH} + c_3 \cdot SO_{RH}^2 \quad (\%RH)$$

$SO_{RH}$	$c_1$	$c_2$	$c_3$
12 bit	-2.0468	0.0367	-1.5955E-6
8 bit	-2.0468	0.5872	-4.0845E-4

Table 6: V4 humidity conversion coefficients

The values given in Table 6 are optimized coefficients for V4 sensors. The parameter set for V3 sensors, which has been proposed in earlier datasheets, still applies and is provided by Sensirion upon request.

Values higher than 99% RH indicate fully saturated air and must be processed and displayed as 100%RH<sup>13</sup>. Please note that the humidity sensor has no significant voltage dependency.

Figure 18: Conversion from  $SO_{RH}$  to relative humidity

### 4.2 Temperature compensation of Humidity Signal

For temperatures significantly different from 25°C (~77°F) the humidity signal requires temperature compensation. The temperature correction corresponds roughly to 0.12%RH/°C @ 60%RH. Coefficients for the temperature compensation are given in Table 7.

$$RH_{true} = (T_{LC} - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot SO_{RH}) + RH_{true}$$

$SO_{RH}$	$t_1$	$t_2$
12 bit	0.01	0.00000
8 bit	0.01	0.00128

Table 7: Temperature compensation coefficients<sup>14</sup>

### 4.3 Temperature

The band-gap PTAT (Proportional To Absolute Temperature) temperature sensor is very linear by design.

<sup>12</sup> Corresponds to 0 – 10°F

<sup>13</sup> If wetted excessively (strong condensation of water on sensor surface), sensor output signal can drop below 100%RH (even below 0%RH in some cases), but the sensor will recover completely when water droplets evaporate. The sensor is not damaged by water immersion or condensation.

<sup>14</sup> Coefficients apply both to V3 as well as to V4 sensors.

## Datasheet SHT1x

Use the following formula to convert digital readout ( $SO_1$ ) to temperature value, with coefficients given in Table 8:

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_1$$

VDD	$d_1$ (°C)	$d_1$ (°F)	$SO_1$	$d_2$ (°C)	$d_2$ (°F)
5V	-40.1	-40.2	14bit	0.01	0.018
4V	-39.8	-39.6	12bit	0.04	0.072
3.5V	-39.7	-39.5			
3V	-39.6	-39.3			
2.5V	-39.4	-38.9			

Table 8: Temperature conversion coefficients<sup>14</sup>.

### 4.4 Dew Point

SHT1x is not measuring dew point directly, however dew point can be derived from humidity and temperature readings. Since humidity and temperature are both measured on the same monolithic chip, the SHT1x allows superb dew point measurements.

For dew point ( $T_d$ ) calculations there are various formulas to be applied, most of them quite complicated. For the temperature range of -40 – 50°C the following approximation provides good accuracy with parameters given in Table 9:

$$T_d(RH, T) = T_n \cdot \frac{\ln\left(\frac{RH}{100\%}\right) + \frac{m \cdot T}{T_n + T}}{m - \ln\left(\frac{RH}{100\%}\right) - \frac{m \cdot T}{T_n + T}}$$

Temperature Range	$T_n$ (°C)	$m$
Above water, 0 – 50°C	243.12	17.62
Above ice, -40 – 0°C	272.62	22.46

Table 9: Parameters for dew point ( $T_d$ ) calculation.

Please note that “ln[...]” denotes the natural logarithm. For RH and T the linearized and compensated values for relative humidity and temperature shall be applied.

For more information on dew point calculation see Application Note “Introduction to Humidity”.

## 5 Environmental Stability

If sensors are qualified for assemblies or devices, please make sure that they experience same conditions as the reference sensor. It should be taken into account that response times in assemblies may be longer, hence

enough dwell time for the measurement shall be granted. For detailed information please consult Application Note “Qualification Guide”.

The SHT1x sensor series were tested according to AEC-Q100 Rev. G qualification test method. Sensor specifications are tested to prevail under the AEC-Q100 temperature grade 2 test conditions listed in Table 10<sup>15</sup>. Sensor performance under other test conditions cannot be guaranteed and is not part of the sensor specifications. Especially, no guarantee can be given for sensor performance in the field or for customer's specific application.

Please contact Sensirion for detailed information.

Environment	Standard	Results <sup>17</sup>
HTSL	125°C, 1000 hours	Within specifications
TC	-50°C - 125°C, 1000 cycles Acc. JESD22-A104-C	Within specifications
UHST	130°C / 85%RH / <sup>2</sup> 2.3bar, 96h	Within specifications
THU	85°C / 85%RH, 1000h	Within specifications
ESD immunity	MIL-STD 883E, method 3015 (Human Body Model at ±2kV)	Qualified
Latch-up	force current of ±100mA with $T_{amb} = 80^\circ\text{C}$ , acc. JEDEC 17	Qualified

Table 10: Qualification tests: HTSL = High Temperature Storage Lifetime, TC = Temperature Cycles, UHST = Unbiased Highly accelerated Stress Test, THB = Temperature Humidity Unbiased

## 6 Packaging

### 6.1 Packaging type

SHT1x are supplied in a surface mountable LCC (Leadless Chip Carrier) type package. The sensor housing consists of a Liquid Crystal Polymer (LCP) cap with epoxy glob top on a standard 0.8mm FR4 substrate. The device is fully RoHS and WEEE compliant – it is free of Pb, Cd, Hg, Cr(6+), PBB and PBDE.

Device size is 7.47 x 4.93 x 2.5 mm (0.29 x 0.19 x 0.1 inch), see Figure 1, weight is 100 mg.

### 6.2 Traceability information

All SHT1x are marked with an alphanumeric, three digit code on the chip cap (for reference: V3 sensors were labeled with numeric codes) – see “A5Z” on Figure 1. The lot numbers allow full traceability through production.

<sup>14</sup> Temperature coefficients have slightly been adjusted compared to datasheet SHT1x version 3.01. Coefficients apply to V3 as well as V4 sensors.

<sup>15</sup> Sensor operation temperature range is -40 to 105°C according to AEC-Q100 temperature grade 2.

<sup>17</sup> According to accuracy and long term drift specification given on Page 2.

## Datasheet SHT1x

calibration and testing. No information can be derived from the code directly; respective data is stored at Sensirion and is provided upon request.

Labels on the reels are displayed in Figures 19 and 20, they both give traceability information.



Figure 19: First label on reel: XX = Sensor Type (11 for SHT11), NN = Chip Version (04 for V4), Y = last digit of year, RRR = number of sensors on reel divided by 10 (200 for 2000 units), TTTT = Traceability Code.

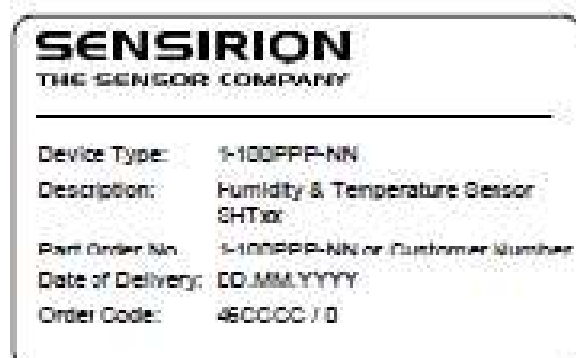


Figure 20: Second label on reel: For Device Type and Part Order Number please refer to Table 12, Delivery Date (also Date Code) is date of packaging of sensors (DD = day, MM = month, YYYY = year), 0000 = Sensirion order number.



### 6.3 Shipping Package

SHT1x are shipped in 12mm tape at 100pcs, 400pcs and 2000pcs – for details see Figure 21 and Table 11. Reels are individually labeled with barcode and human readable labels.

Sensor Type	Packaging	Quantity	Order Number
SHT10	Tape & Reel	2000	1-100218-04
SHT11	Tape & Reel	100	1-100061-04
	Tape & Reel	400	1-100068-04
	Tape & Reel	2000	1-100534-04
SHT15	Tape & Reel	100	1-100085-04
	Tape & Reel	400	1-100093-04

Table 11: Packaging types per sensor type.

Dimensions of packaging tape are given in Figure 21. All tapes have a minimum of 480mm empty leader tape (first pockets of the tape) and a minimum of 300mm empty trailer tape (last pockets of the tape).

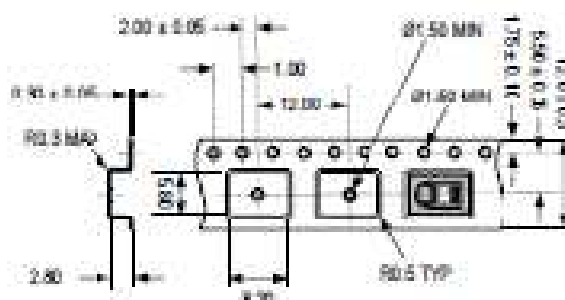


Figure 21: Tape configuration and unit orientation within tape, dimensions in mm (1mm = 0.039inch). The leader tape is at the right side of the figure while the trailer tape is to the left (direction of unreeling).

## Revision History

Date	Version	Page(s)	Changes
July 2008	4.0	1 – 11	New release, rework of datasheet
September 2008	4.1	3, 4	Adjustment of normal operating range and recommendation for anti-static bag
April 2009	4.2	2, 7	Amended foot note 2, communication diagram updated (Figure 17).
May 2010	4.3	1 – 11	Various errors corrected and additional information given (ask for change protocol).

## Important Notices

### Warning, Personal Injury

Do not use this product as safety or emergency stop devices or in any other application where failure of the product could result in personal injury. Do not use this product for applications other than its intended and authorized use. Before installing, handling, using or servicing this product, please consult the data sheet and application notes. Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

If the Buyer shall purchase or use SENSIRION products for any unintended or unauthorized application, Buyer shall defend, indemnify and hold harmless SENSIRION and its officers, employees, subsidiaries, affiliates and distributors against all claims, costs, damages and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if SENSIRION shall be allegedly negligent with respect to the design or the manufacture of the product.

### ESD Precautions

The inherent design of this component causes it to be sensitive to electrostatic discharge (ESD). To prevent ESD-induced damage and/or degradation, take customary and statutory ESD precautions when handling this product.

See application note #ESD, Latchup and EMC# for more information.

### Warranty

SENSIRION warrants solely to the original purchaser of this product for a period of 12 months (one year) from the date of delivery that this product shall be of the quality, material and workmanship defined in SENSIRION's published specifications of the product. Within such period, if proven to be defective, SENSIRION shall repair and/or replace this product, in SENSIRION's discretion, free of charge to the Buyer provided that:

- notice in writing describing the defects shall be given to SENSIRION within fourteen (14) days after their appearance;

- such defects shall be found, to SENSIRION's reasonable satisfaction, to have arisen from SENSIRION's faulty design, material, or workmanship;
- the defective product shall be returned to SENSIRION's factory at the Buyer's expense; and
- the warranty period for any repaired or replaced product shall be limited to the unexpired portion of the original period.

This warranty does not apply to any equipment which has not been installed and used within the specifications recommended by SENSIRION for the intended and proper use of the equipment. EXCEPT FOR THE WARRANTIES EXPRESSLY SET FORTH HEREIN, SENSIRION MAKES NO WARRANTIES, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, WITH RESPECT TO THE PRODUCT. ANY AND ALL WARRANTIES, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE EXPRESSLY EXCLUDED AND DECLINED.

SENSIRION is only liable for defects of this product arising under the conditions of operation provided for in the data sheet and proper use of the goods. SENSIRION explicitly disclaims all warranties, express or implied, for any period during which the goods are operated or stored not in accordance with the technical specifications.

SENSIRION does not assume any liability arising out of any application or use of any product or circuit and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. All operating parameters, including without limitation recommended parameters, must be validated for each customer's applications by customer's technical experts. Recommended parameters can and do vary in different applications.

SENSIRION reserves the right, without further notice, (i) to change the product specifications and/or the information in this document and (ii) to improve reliability, functions and design of this product.

Copyright© 2009, SENSIRION.  
CMOSens® is a trademark of Sensirion  
All rights reserved

## Headquarter and Sales Offices

### Headquarter

SENSIRION AG  
Leutkircher Str. 50  
CH-8712 St. Gallen, ZH  
Switzerland

Phone: +41 44 306 40 00  
Fax: +41 44 306 40 30  
[info@sensirion.com](mailto:info@sensirion.com)  
<http://www.sensirion.com/>

### Sales Office USA:

SENSIRION Inc.  
2801 Townsgate Rd., Suite 204  
Westlake Village, CA 91381  
USA

Phone: +1 805 409 4900  
Fax: +1 805 436 0487  
[richard.hugot@sensirion.com](mailto:richard.hugot@sensirion.com)  
<http://www.sensirion.com/>

### Sales Office Japan:

SENSIRION JAPAN Co. Ltd.  
Postal Code: 108-0074  
Shinjyogawa Station Bldg. 7F,  
4-22-5, Takasawa, Minato-ku  
Tokyo, Japan

Phone: +81 3 3444 4048  
Fax: +81 3 3444 4038  
[info@sensirion.co.jp](mailto:info@sensirion.co.jp)  
<http://www.sensirion.co.jp/>

### Sales Office Korea:

SENSIRION KOREA Co. Ltd.  
#414, Anyang Construction Tower 5/F,  
1112-1, Ssang-dong, Anyang-city  
Gyeonggi-Province  
South Korea

Phone: +82 31 448 9025-27  
Fax: +82 31 448 9027  
[info@sensirion.co.kr](mailto:info@sensirion.co.kr)  
<http://www.sensirion.co.kr/>

### Sales Office China:

Sensirion China Co. Ltd.  
Room 2411, Main Tower  
Jin Zhong Huan Business Building  
Fujian District, Shenzhen,  
Postal Code 518048  
PR China

phone: +86 755 8292 1500  
fax: +86 755 8292 1580  
[info@sensirion.com.cn](mailto:info@sensirion.com.cn)  
[www.sensirion.com.cn/](http://www.sensirion.com.cn/)

Find your local representative at: <http://www.sensirion.com/eng/>