

RODRIGO TREBIEN

**THERMAL COMFORT SENSITIVITY ANALYSIS AND
SENSOR DEVELOPMENT FOR CONTROL PURPOSES**

CURITIBA

October, 2008

RODRIGO TREBIEN

**THERMAL COMFORT SENSITIVITY ANALYSIS AND
SENSOR DEVELOPMENT FOR CONTROL PURPOSES**

Document submitted to the Mechanical Engineering Graduate Program at the Pontifical Catholic University of Paraná as partial requirement for obtaining a master degree in Mechanical Engineering.

Orientador:
Nathan Mendes

Co-orientador:
Gustavo Henrique da Costa Oliveira

PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF PARANÁ - PUCPR

CURITIBA

October, 2008

Aos meus pais,
Marino Trebien e Édina Inês Tre-
bien,
responsáveis pela minha formação
educacional.

A prioridade com que sempre
trataram a educação não se re-
stringiu às palavras e cobranças,
mas esteve sempre presente em suas
próprias vidas.

Contents

List of Figures	p. v
List of Tables	p. viii
List of Symbols	p. ix
List of Abbreviations	p. x
Abstract	p. xi
1 Introduction	p. 1
2 Fanger’s model sensitivity analysis using Monte Carlo	p. 4
2.1 Methodology	p. 4
2.2 Results	p. 6
2.3 Proposal of PMV estimation based on the sensitivity analysis	p. 6
3 Estimation of T_{rm}, MET and CLO	p. 8
3.1 Analysis of T_{rm} estimation	p. 8
3.2 Evaluation of CLO and MET	p. 10
3.2.1 Determination of individual parameter values based on their derivatives	p. 13
4 Estimation of individual parameters using Genetic Algorithm	p. 15
4.1 Methodology for the use of Genetic Algorithm	p. 16
4.2 Results for MET	p. 18

4.3	Results for <i>CLO</i>	p. 19
5	Hardware for PMV Sensor	p. 21
5.1	Sensor Module	p. 21
5.2	STU (Signal Treatment Unit) Module	p. 23
5.3	ADC Module	p. 23
5.4	CPU (Central Processing Unit) Module	p. 23
5.5	DAC Module	p. 24
6	Uncertainty Analysis	p. 25
6.1	Uncertainty Analysis when T_{rm} is measured	p. 25
6.1.1	Uncertainty analysis methodology	p. 25
6.1.2	Results	p. 27
6.2	Uncertainty Analysis when $T_{rm} = T_{ar}$	p. 27
6.2.1	Uncertainty analysis methodology	p. 28
6.2.2	Results	p. 29
7	Experimental results	p. 31
8	HVAC Control Using a PMV-Based Comfort Region	p. 35
8.1	Comfort Regions	p. 35
8.2	Controller	p. 36
8.3	Environment to be Conditioned	p. 36
8.4	Results	p. 37
8.4.1	Thermal Comfort Evaluation	p. 40
9	Conclusions	p. 43
	References	p. 46

Appendix A – Sistema de Monitoramento e Controle de Climatização (SMCC)	p. 49
A.1 Módulos	p. 49
A.2 Conexões	p. 51
A.3 Interface	p. 52
A.3.1 Parâmetros	p. 52
A.3.2 Estratégia de Controle	p. 53
A.3.3 Variável de Controle	p. 54
A.3.4 Velocidade do Ar	p. 55
A.3.5 Sinal de Controle	p. 58
 Appendix B – Análise de Sensibilidade do Índice PMV e Regiões de Conforto Térmico Visando o Aperfeiçoamento de Controladores para Sistemas de Climatização	 p. 65

List of Figures

3.1	Actual PMV values with respect to the difference between the actual mean radiant temperature and the room air temperature.	p. 9
3.2	Curves for the function of the PMV with respect to human activity level.	p. 11
3.3	Curves for the function of PMV with respect to clothing thermal resistance.	p. 12
3.4	Derivative of PMV with respect to CLO , for different T_{ar} and V_{ar} values.	p. 13
5.1	PMV Sensor: right-hand side	p. 21
5.2	PMV Sensor	p. 21
5.3	PMV Sensor and parameters' sensors	p. 22
5.4	Block Diagram for the PMV Sensor hardware	p. 22
6.1	Air temperature sensor accuracy	p. 26
6.2	Relative humidity sensor accuracy	p. 26
6.3	Mean radiant temperature sensor accuracy	p. 26
7.1	Plant of the room used for the experiments.	p. 32
7.2	Experimental air velocity analysis	p. 33
8.1	Environment - occupancy /working place	p. 37
8.2	Environment	p. 37
8.3	Environment dimensions	p. 37
8.4	Air Conditioner	p. 38
8.5	Air Conditioner	p. 38
8.6	Sensors position	p. 38
8.7	Sensors position	p. 38
8.8	Sensors position	p. 39

8.9	Thermal comfort control using Comfort Regions - Temperatures and control signal	p. 39
8.10	Thermal comfort control using Comfort Regions - Relative Humidity	p. 40
8.11	Thermal comfort control using Comfort Regions - PMV Index	p. 41
8.12	SMCC - PMV Sensors used for the thermal comfort evaluation	p. 42
A.1	SMCC - Diagrama de Blocos	p. 49
A.2	SMCC - Interface em LabVIEW	p. 50
A.3	SMCC - Diagrama de Blocos LabVIEW	p. 50
A.4	SMCC - Placa de aquisição NI USB-6009	p. 51
A.5	SMCC - Interface para monitoramento dos parâmetros	p. 52
A.6	SMCC - Interface para estratégia de controle	p. 53
A.7	SMCC - Comandos gerais do SMCC	p. 54
A.8	SMCC - Configuração dos Parâmetros Individuais	p. 54
A.9	SMCC - Configurações do controlador ON\OFF	p. 55
A.10	SMCC - Interface para seleção da variável de controle	p. 55
A.11	SMCC - Interface para monitoramento da velocidade do ar e para controle do dispositivo de ventilação do condicionador de ar	p. 56
A.12	SMCC - Interface para monitoramento da velocidade do ar do ambiente climatizado	p. 57
A.13	SMCC - Valor instantâneo da velocidade do ar	p. 57
A.14	SMCC - Configuração do ventilador do condicionador de ar	p. 58
A.15	SMCC - Configuração da função swing para o ventilador do condicionador de ar	p. 58
A.16	SMCC - Leds que indicam a velocidade do ventilador do condicionador de ar	p. 59
A.17	SMCC - Interface para monitoramento do sinal de controle	p. 59
A.18	SMCC - Gráfico para monitoramento do sinal de controle contínuo	p. 60

A.19 SMCC - Indicadores e display digital para monitoramento do sinal de controle contínuo	p. 60
A.20 SMCC - Gráfico da tensão contínua à ser aplicada em um compressor variável (sinal de controle contínuo)	p. 61
A.21 SMCC - Botão para habilitar a conversão de um sinal de controle analógico em um sinal de controle digital	p. 62
A.22 SMCC - Gráfico da tensão digital à ser aplicada em um compressor "ON\OFF" (sinal de controle discreto)	p. 62
A.23 SMCC - Led que indica se o compressor variável está no ciclo normal (resfriamento) ou reverso (aquecimento)	p. 63
A.24 SMCC - Leds que indicam se o compressor "ON\OFF" está funcionando no ciclo normal (resfriamento) ou no ciclo reverso (aquecimento)	p. 64

List of Tables

2.1	Fanger's model parameters, symbols, units and limits	p. 4
2.2	Fanger's model sensitivity analysis results: parameters weight	p. 6
3.1	Derivative of PMV with respect to the difference between mean radiant temperature and the room air temperature	p. 10
3.2	Derivative of PMV with respect to the human activity level	p. 12
4.1	Activity level options and their <i>MET</i> values	p. 16
4.2	Clothing options and their <i>CLO</i> values	p. 16
4.3	Genetic Algorithm setup for the individual parameters optimization. . .	p. 17
4.4	Values for <i>MET</i> parameter obtained by using a genetic algorithm. . . .	p. 18
4.5	Comparison of methods for estimation <i>MET</i>	p. 19
4.6	Garment description and <i>CLO</i> Values for each switch.	p. 20
4.7	Errors for different ways for gotten the <i>CLO</i> options	p. 20
5.1	List of Sensors	p. 22
6.1	Uncertainty analysis results: (*) $T_{rm} = T_{ar}$; (**) $T_{rm} - T_{ar} = 0.4$; (***) T_{rm} is monitored.	p. 28
A.1	Conexões entre os sensores, placa de aquisição NI USB-6009 e o condicionador de ar	p. 51

List of Symbols

ϕ - relative humidity (%), p. 1

T_{ar} - air temperature ($^{\circ}C$), p. 2

T_{rm} - mean radiant temperature ($^{\circ}C$), p. 2

V_{ar} - air velocity (m/s), p. 2

CLO - thermal resistance of clothing (clo), p. 2

MET - human metabolism rate (met), p. 2

List of Abbreviations

HVAC - Heating, Ventilating and Air Conditioning, p. 1

ET - Effective Temperature, p. 1

ACE - Air Cleaner Effectiveness, p. 1

PMV - Predicted Mean Vote, p. 1

MBPC - Model Based Predictive Controller, p. 1

PID - Proportional, Integral and Derivative, p. 1

PMV_S - simplified PMV, p. 36

SMCC - *Sistema de Monitoramento e Controle de Climatização*, p. 36

LST - Thermal Systems Laboratory, p. 36

PUCPR - Pontifical Catholic University of Paraná, p. 36

Abstract

HVAC control systems based on thermal comfort indices provide advantages such as an improvement on the thermal quality in the built environment.

Among several thermal comfort indices, the PMV (Predicted Mean Vote) is one of the widest used. However, the computation of such index in actual equipment is not trivial since some of the PMV's environmental parameters, such as mean radiant temperature and air velocity, are not easy to be obtained. Moreover, the determination of individual parameters - clothing thermal resistance and metabolism - have inexact and uncertain characteristics and are strongly related to occupants' behavior.

In this way, this paper presents the structure and development of a PMV-based thermal comfort sensor, which considers how sensitive Fanger's model is to their parameters. A genetic algorithm is used for choosing standard values of metabolic rate and clothing thermal resistance that should be available to the built hardware. An uncertainty analysis for the six Fanger's model parameters is also shown and an experimental application of the sensor is presented, showing its viability on the thermal comfort monitoring of a mechanically ventilated room.

To conclude, PMV-based Comfort Regions have been defined so that a low-cost sensors could be used to control thermal comfort by measuring only temperature and relative humidity. This thermal comfort strategy has been applied to a split-type air conditioner and verified using two prototypes of the PMV Sensor developed in this work.

Keywords: Thermal Comfort, PMV Sensitivity Analysis, HVAC Systems, Sensor, Genetic Algorithm, Error Analysis, Optimization, Comfort Regions.

1 Introduction

Mankind has always tried to create thermally comfortable environments. This is reflected in buildings all around the world, from ancient history to nowadays, but it is still an important challenge to be considered by building designers (Holmes e Hacker, 2007). For instance, if the working environment thermal comfort is not satisfactory, people performance will decrease (Fisk e Rosenfeld, 1997; Lorsch e Abdou, 1994; Karjalainen e Koistinen, 2007; Seppanen e Fisk, 2005). Therefore, to obtain/produce/keep occupants' thermal satisfaction in buildings, which is undoubtedly the main goal of Heating, Ventilation and Air Conditioner (HVAC) systems, thermal comfort has been the object of great research efforts since many decades ago.

Thermal comfort concept is difficult to define and has been analyzed by several authors over the last decades (Hardy *et al.*, 1953; Fanger, 1972; Gagge *et al.*, 1986; Sherman, 1985; Hamdi *et al.*, 1999) so that a great number of thermal comfort indices have been established for the analysis and design of HVAC systems, as the *Comfortable Temperature*. Another index, which considers the internal temperature and the relative humidity (ϕ), is the *Effective Temperature* (ET), that was adopted as the thermal comfort index by ASHRAE (ASHRAE, 1993) for decades. The *Air Cleaner Effectiveness* (ACE), analyzed in (Fang *et al.*, 1998), is related to indoor air quality. However, the widest used thermal comfort index is the *Predicted Mean Vote* (PMV), proposed by Fanger (Fanger, 1970), which considers environmental variables and individual factors. Therefore, an HVAC equipment that uses a PMV-based control strategy may provide better results in terms of thermal comfort. PMV can be incorporated into different types of control laws for improving the controller efficiency in terms of thermal comfort. For instance, *Model Based Predictive Controller* (MBPC) (Freire *et al.*, 2005; Donaisky *et al.*, 2007; Freire *et al.*, 2008), *Proportional, Integral and Derivative* (PID) (Gouda *et al.*, 2001) and Fuzzy (Ari *et al.*, 2005; Calvino *et al.*, 2004; Gouda *et al.*, 2001; Yonezawa *et al.*, 2000; Hamdi e Lachiver, 1998). PMV can also be used in control algorithm focusing the building energy-saving (Yonezawa *et al.*, 2000; Yonezawa *et al.*, 1999).

In order to use PMV information inside an HVAC equipment control law, the PMV signal should be available. Unlike the most common sensing procedures in this context, such as temperature and humidity sensors, PMV cannot be directly measured. It is necessary to measure four environmental parameters (air temperature (T_{ar}), mean radiant temperature (T_{rm}), relative humidity and air velocity (V_{ar})) and to evaluate two individual parameters (occupants' level of physical activity and clothing thermal resistance), which makes difficult to obtain the PMV index in actual equipment.

As far as the PMV environmental parameters are concerned, mean radiant temperature and air velocity measurements are both difficult of being obtained or their sensors are not financially viable to be incorporated into HVAC devices. Moreover, those parameters are also very position-dependent so that high uncertainties on PMV measurements may appear. The individual variables related to thermal resistance of clothing (CLO) and to the metabolism (MET) due to the physical activity can also be a great source of uncertainties. Such parameters are difficult to estimate since although the occupants are aware about their clothing and activity pattern, the exact CLO and MET values are usually unknown. Then, even when the PMV index is determined for a given situation, it is not possible to know if it really represents the actual PMV for an occupant.

Works related to thermal comfort sensors, such as (Kon, 1994), usually present an overview of the hardware and a brief discussion about the final results and the related uncertainties (the scope is normally oriented to only the operational aspects). A PMV sensor is proposed in (Kang *et al.*, 1997), where the uncertainties due to air temperature, air velocity and relative humidity sensors are analyzed. However, problems related with the two individual parameters and mean radiant temperature are not discussed. Moreover, neither a sensitivity analysis nor the analysis of parameter's derivatives are carried out to determine the measurement scheme. They do not use an optimization method to reduce the PMV measurement uncertainties. Some difficulties for assessing thermal comfort in buildings are presented in (Humphreys e Nicol, 2002), which focuses on the biases of PMV regarding the actual vote. The measurement uncertainties are considered as a possible cause for those biases (therefore, the scope of this group of works are limited on theories aspects).

Unlike the works mentioned above, the present study discusses the problems for assessing the thermal comfort, focusing on the measurement and estimations of the input variables and assume that the PMV comfort model is adequate to predict the thermal sensation for individuals in buildings. The goal is to provide basics for the use of PMV

index for thermal comfort control purposes.

The present paper contains results related to the development of a PMV hardware, for closed-loop control purposes. First, a PMV sensitivity analysis is carried out in Chapter 2, to score the relative importance of each variable on the PMV index. Considering this analysis, a PMV sensor scheme is proposed in Section 2.3. Parameters, which are difficult to be obtained in actual equipment and have small weight in the model, can be treated as a constant, without a considerable modification on the value of the PMV index. On the other hand, if a certain parameter has a great weight on the PMV equation and is difficult to be directly measured, a careful analysis must be carried out to ensure a reliable evaluation. In this case, the impact on PMV index due to adaptations should be investigated and these problems are treated in Chapter 3. Chapter 4 presents some strategies based on genetic algorithm in order to reduce measurement uncertainties. Considering these analysis, the PMV-based Thermal Comfort Sensor hardware is presented in Chapter 5 and its uncertainty analysis - which considers the combination of six parameters measurement uncertainty, parameters setting, and the values obtained from the optimization methods - is carried out in Chapter 6, showing the final result of the proposed PMV Sensor. An experimental procedure is presented in Chapter 7, using the proposed sensor, to analyze the PMV modifications due to air velocity. Finally, Comfort Regions considering also the individual parameters have been proposed in Chapter 8, which are used in a thermal comfort control strategy, whose HVAC device is an split type air conditioner.

2 Fanger's model sensitivity analysis using Monte Carlo

In this chapter, a sensitivity analysis on the Fanger's model is carried out, using the Monte Carlo statistical method.

2.1 Methodology

Any procedure that involves sampling processes, by random numbers, to provide a solution of a physical or mathematical problem can be called, generically, Monte Carlo method. The process used here to determine the sensitivity of the PMV index (dependent variable) to the six independent variables is based on that method, which has already been successfully used by Duarte and Arruda (Duarte e Arruda, 1993).

First, the validity bounds for each PMV parameter should be defined. ISO suggests that the range of relativity humidity should be limited between 30 and 70%. The air velocity is assumed lower than 0.2 m/s, which is consistent with ASHRAE 55 STANDARD (1981). Regarding the T_{rm} parameter, it has been assumed, for each combination, values for the difference between T_{rm} and T_{ar} , instead of values for T_{rm} . As it will be discussed further in Section 3.1, its bounds are assumed equal to the $T_{ar} \pm 4^{\circ}$. These values and those adopted for other parameters can be found in Table 2.1.

Table 2.1: Fanger's model parameters, symbols, units and limits

Parameter	Symbol	Units	Lower Limit	Upper Limit
Air temperature	T_{ar}	$^{\circ}\text{C}$	18.0	30.0
Mean radiant temperature	T_{rm}	$^{\circ}\text{C}$	$T_{ar}-4.0$	$T_{ar}+4.0$
Relative humidity	ϕ	%	30.0	70.0
Air velocity	V_{ar}	m/s	0.00	0.2
Human metabolic rate	MET	met	0.80	3.0
Thermal resistance of clothing	CLO	clo	0.30	1.15

The second step is to obtain a matrix of random values (v_{ij}). Such matrix contains six columns, one for each parameter. Each line corresponds to a particular set of values for the model, attributed to each parameter. The greater the number of matrix lines, the greater the number of combinations for determining the sensitivity to each parameter. However, it has been noticed - according to a previous sensitivity analysis study - that 1500 lines are sufficient to achieve the same tendency presented in Table 2.2, as it will be discussed in Section 2.2. For the T_{rm} analysis, random values have been generated so that the difference between T_{rm} and T_{ar} remains within the band proposed in Table 2.1.

The third step is to generate increments for each v_{ij} matrix element for determining the partial derivatives and creating new matrix (Δv_{ij}), with the same column and line numbers as the original matrix. The increments should be as small as possible but limited due to numerical truncation errors. In this way, the Brown and Dennis rule has been used (see Eq. 2.1), where $PMV(i)$ is the PMV value for the i -th line parameters combination.

In the fourth step, the matrix S_{ij} is obtained through Eq. 2.2, containing the PMV partial derivative to each of the six PMV parameters, for all lines of v_{ij} and Δ_{ij} matrices. The $PMV(i + \Delta_{ij})$ is the PMV for the parameters of v_{ij} i -th line, except the j -th parameter which is increased with the Δ_{ij} value. As it has been previously mentioned, one important goal of this sensitivity analysis, is getting values which are independent of units. For this reason the dimensionless values of the S_{ij} matrix are calculated on the fifth step, using Eq. 2.3. The sixth and last step is the creation of a sensitivity analysis vector given by Eq. 2.4, which shows in each element the weight of each parameter of Fanger's model. If the number of lines in this analysis is great, the sensitivity vector values may be great even to parameter for which the model is less sensible. To avoid wrong understandings, each element of sensitivityVector is divided by the lower element of the vector. Therefore, the minimum value of the sensitivityVector is 1.0.

$$\Delta v_{ij} = \min\{||PMV(i)||; \delta_{ij}\}$$

$$where : \delta_{ij} = \begin{cases} 10^{-9} & \text{if } ||v_{ij}|| \leq 10^{-6} \\ v_{ij} \times 10^{-3} & \text{if } ||v_{ij}|| > 10^{-6} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial PMV}{\partial v_{ij}} = \frac{PMV(i + \Delta_{ij}) - PMV(i)}{\Delta v_{ij}} \quad (2.2)$$

$$SA_{ij} = S_{ij} \times \frac{v_{ij}}{PMV(i)} = \frac{\partial PMV}{\partial v_{ij}} \times \frac{v_{ij}}{PMV(i)} \quad (2.3)$$

$$\text{sensitivityVector}_j = \sum_i SA_{ij} \quad (2.4)$$

The random distribution, necessary to the second step, can be made through either a normal or an uniform distribution. For this analysis, both random distributions have been carried out. The uniform distribution limits can be seen in Table 2.1. The average of these limits are the center of curves to normal distribution whose standard deviation is assumed as the third part of the difference between the parameter limits and the curve center point. Therefore, ninety nine percent of the normal distribution values may be within the limits shown in Table 2.1.

2.2 Results

By following the previously presented methodology for normal and uniform distribution, the Fanger's model sensitivity coefficients are computed and presented in Table 2.2. It can be noticed that T_{ar} is the most dominant parameter in the model, followed by MET and T_{rm} . Then, if small variations occur on these parameters, the PMV index will be considerably modified. For both distributions, air velocity and relative humidity are the ones with the lowest impact on PMV, within the band considered in Table 2.1. The weights found for the two distributions are very similar.

Table 2.2: Fanger's model sensitivity analysis results: parameters weight

Distribution	Parameters					
	T_{ar}	T_{rm}	ϕ	V_{ar}	MET	CLO
Normal	18.60	14.07	1.63	1.00	16.27	6.33
Uniform	20.80	15.52	1.92	1.00	16.48	6.62

2.3 Proposal of PMV estimation based on the sensitivity analysis

Despite the authors are aware of the low impact that the relativity humidity presented in the PMV sensitivity analysis, as shown in Table 2.2, this parameter will be measured due to its importance for respiratory comfort, occupants' health, perception of IAQ - Indoor Air Quality, durability of materials and energy consumption (Mendes *et al.*, 2003; Barbosa e Mendes, 2008). Moreover, sensors for this parameter are easy to be coupled

in actual equipment. Regarding air velocity, due its low impact on PMV, the proposed sensor will be prepared to treat this parameter as a constant. However, this parameter can be optionally measured in order to improve the accuracy as shown in the uncertainty analysis chapter.

On the other hand, the mean radiant temperature, the metabolism and the clothing thermal resistance parameters are very relevant for PMV prediction, but they are difficult to be estimated. Sensors of T_{rm} are difficult of being conceived and/or not-viable of being incorporated into HVAC control systems. However, for some cases, radiation heat loss may account for a great part of the total sensible heat loss (Atmaca *et al.*, 2007). Moreover, sensitivity analysis results have shown that T_{rm} has a great impact on the model - so that it should be considered on the PMV computation. Therefore, for the creation of PMV sensor assembly, the hypothesis that T_{rm} is the same as the value measured for T_{ar} is proposed, avoiding the T_{rm} sensor. The Fanger's model sensitivity analysis, carried out in Chapter 2, has shown that the PMV index is also very influenced by the two individual parameters, which are difficult to be determined in the field. Discrete options for both are proposed on the sensor, to be user-defined in an easy way.

In this way, the current sensor proposal for PMV estimation in actual equipment is based on the measurement of air temperature - most relevant - and relative humidity, which have the easiest measurement process, and on the estimation of T_{rm} , MET and CLO . Chapter 3 elucidates important issues on their estimation.

3 Estimation of T_{rm} , MET and CLO

By means of Table 2.2, it can be noticed that the T_{rm} , MET , and CLO parameters present a strong influence on the PMV value, but they are difficult to be measured or estimated. So, their influence on the PMV index requires additional analysis. Therefore, in the following, the partial derivatives of PMV to those parameters are discussed. Such derivatives are evaluated assuming three air temperature values (17°, 22°, and 27°C), two relative humidity values (30% and 70%) and two air velocity values (0 and 0.2 m/s). A combination of these values, for each of the three analyzed parameters, is performed. The other two parameters are kept constant. The result is a chart, which contains twelve curves of the PMV value regarding the analyzed parameter, where the PMV numerical derivatives can be visualized.

3.1 Analysis of T_{rm} estimation

Unlike classical temperature sensors, mean radiant temperature sensors are difficult of being obtained. Additionally, they would not be financially viable for being incorporated into HVAC devices. In fact, the mean radiant temperature measurements would not be viable in commercial equipment. Furthermore, considering that the temperatures on the internal surfaces could be different, the mean radiant temperature, and consequently the PMV, would also be different for each occupant position in the environment (Gan, 2001). A reliable value would be obtained if the sensor was located in the same occupant's position and had the same occupant's geometric shape. Therefore, a quite practical option for selecting T_{rm} is to assume it equal to T_{ar} and such option is analyzed in following. Analysis of mean radiant temperature and thermal comfort is carried out in (Gan, 2001). In that work, the importance of mean radiant temperature in relation to thermal comfort and building control is demonstrated for an office room. Furthermore, the effect of glazing on the mean radiant temperature and thermal comfort in rooms is analysed. It is shown

that a tall and narrow window performs better than a square window in terms of indoor thermal comfort. Also, double-glazing is effective in reducing the thermal discomfort due to radiant asymmetry

Based on this assumption, the ideal situation is when the actual T_{rm} is equal to T_{ar} , so the curves of PMV with respect to the difference between T_{rm} and T_{ar} , for different values of environmental parameters, are shown in Figure 3.1. The individual parameters MET and CLO are assumed equal to 1.2 and 0.66, respectively. It can be noticed that, despite the fact that the environmental conditions are different (i.e. different values for T_{ar} , V_{ar} and ϕ), the PMV variation can be approximated by a constant. For $T_{ar} = 18^\circ C$, $\phi = 0.3$ and $V_{ar} = 0.2m/s$, the PMV will be increased in one unit if T_{rm} is $8^\circ C$ above the T_{ar} , but the PMV will be decreased a little less than one unit if T_{rm} is $8^\circ C$ below the T_{ar} value. More details regarding the derivatives can be visualized in Table 3.1, where values for relative humidity are not presented because the PMV derivatives are not modified by those values.

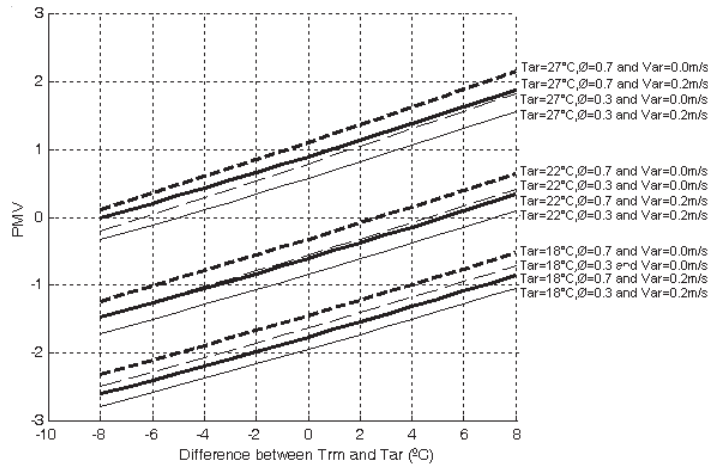


Figure 3.1: Actual PMV values with respect to the difference between the actual mean radiant temperature and the room air temperature.

It can be noticed by Table 3.1 that the derivative of PMV is almost the same in the analyzed band. The higher values can be found for higher air temperatures. By considering the most critical case, such derivative can be approximated by 0.13. Therefore, if the hypothesis that the mean radiating temperature is equal to the air temperature is adopted, a difference of $7.7^\circ C$ between actual and estimated T_{rm} implies that the actual PMV value would be a unit above or below the measured or estimated one.

Those conclusions have an application on PMV-based control algorithms. Assuming that PMV is computed with T_{rm} equal to the measured T_{ar} and an HVAC control

Table 3.1: Derivative of PMV with respect to the difference between mean radiant temperature and the room air temperature

Analyzed values		Derivatives of PMV with respect to the difference ($T_{rm} - T_{ar}$)								
T_{ar} (°C)	V_{ar} (m/s)	-8°C	-6°C	-4°C	-2°C	0°C	2°C	4°C	6°C	8°C
18	0.0	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12
	0.2	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12
22	0.0	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
	0.2	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12
27	0.0	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
	0.2	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13

equipment is able to keep the measured PMV close to zero by using the proposed sensor structure. Considering that PMV values within the band of ± 0.5 are capable to generate thermal comfort (ASHRAE, 1993), by keeping the measured PMV at zero, a thermal comfort control equipment will actually providing thermal comfort in the environment if the difference between the actual T_{rm} and T_{ar} is within the band $\pm 3.9^\circ C$. Therefore, the proposal PMV sensor structure is viable for environments where the radiative heat exchange is much lower than the convective one.

3.2 Evaluation of *CLO* and *MET*

For actual PMV measurement purposes, occupants usually do not know the thermal resistance value of their clothes (*CLO*). A PMV system measurement will have an uncertain character due to the huge number of options that a given user could be dressing. Another source of uncertainty could occur when occupants are dressing different clothing (Fanger, 1970). This problem could not lead to a great impact due the fact that, in general, an environment plays one functional role (office, dormitory, gym etc.), therefore, occupants' clothes may be similar in terms of thermal protection. Despite of being similar, the clothes are not equal, specially when the comparison is done between the masculine and feminine sexes. Thus, some error will always be present and should be investigated. The measurement of physical activity (*MET*) presents similar problems. The occupants usually do not know either the MET value of their activity and, if more than one occupant is in the thermal zone, they could be accomplishing different activities (Fanger, 1970). Additionally, different occupants may have different metabolism levels.

Therefore, the individual parameters are difficult to be included in the PMV computation for actual applications. In this way, this section analyzes those individual parameters

in order to provide a background for their selection and implementation in actual HVAC control devices.

Curves of PMV as function of the human activity and clothing thermal resistance can be seen in Figures 3.2 and 3.3, respectively. By means of these figures, the derivative of PMV can be depicted. It can be noticed that such derivative (or with respect to the error between the actual value and that indicated by the user) is not constant and the lower the individual parameter, the greater the derivative. However, although the PMV values and its derivatives vary with CLO and MET , the shape of such behavior is approximately the same for different combinations of V_{ar} and ϕ . More details regarding the derivative of PMV with respect to the MET and CLO values can be seen in Table 3.2 and Figure 3.4, respectively.

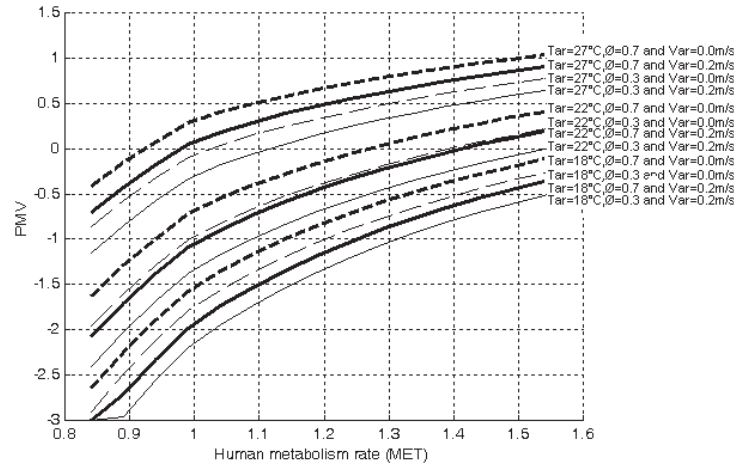


Figure 3.2: Curves for the function of the PMV with respect to human activity level.

In Table 3.2 and Figure 3.4, for each curve, T_{ar} , V_{ar} , and ϕ are treated as constant. Therefore, the positive value for all the partial derivatives indicates that the PMV increases when MET and CLO increase, which is consistent with the PMV theory. Such positive values indicate that the calculated PMV is greater than the actual one, if the occupant individual parameters are lower than the ones used in the formulae. It can also be noticed by Figure 3.4 and Table 3.2, that the lower the T_{ar} value the higher the PMV derivative. For instance, when T_{ar} is low, the PMV is more sensitive to the changes on MET and CLO , since its derivative increases when T_{ar} decreases. It can also be noticed that the derivatives slightly increase when V_{ar} is high. This indicates that the thermal comfort model is more sensitive with variations on the human activity and thermal resistance of clothing for higher air velocities. Regarding to CLO , this fact is consistent with

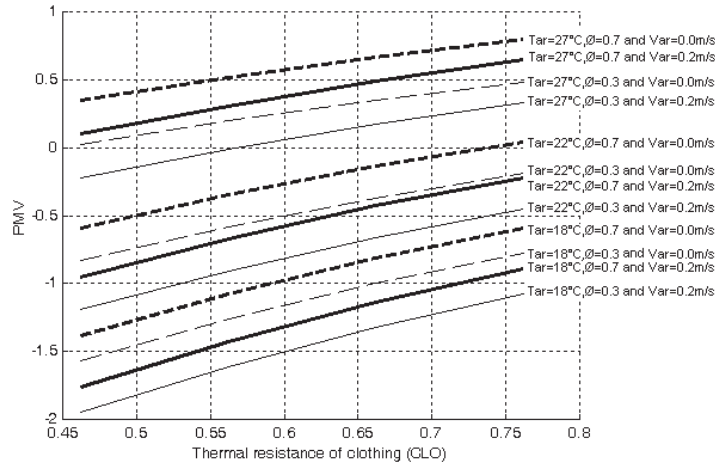


Figure 3.3: Curves for the function of PMV with respect to clothing thermal resistance.

Table 3.2: Derivative of PMV with respect to the human activity level

Other parameter values			Derivatives of PMV with respect to MET						
T_{ar}	ϕ	V_{ar}	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
(°C)	(%)	(m/s)	(met)	(met)	(met)	(met)	(met)	(met)	(met)
18	0.3	0.0	7.67	5.28	3.59	2.91	2.40	2.02	1.73
		0.2	8.27	5.77	3.98	3.24	2.67	2.23	1.90
	0.7	0.0	7.42	5.07	3.42	2.78	2.29	1.93	1.66
		0.2	8.02	5.56	3.81	3.10	2.56	2.14	1.83
22	0.3	0.0	6.55	4.37	2.85	2.32	1.92	1.63	1.41
		0.2	7.11	4.83	3.22	2.62	2.16	1.83	1.58
	0.7	0.0	6.23	4.11	2.63	2.14	1.78	1.51	1.33
		0.2	6.79	4.56	3.00	2.44	2.02	1.71	1.49
27	0.3	0.0	5.25	3.32	1.99	1.62	1.36	1.17	1.04
		0.2	5.65	3.64	2.25	1.83	1.53	1.31	1.16
	0.7	0.0	4.81	2.96	1.70	1.38	1.17	1.02	0.92
		0.2	5.21	3.28	1.96	1.60	1.34	1.16	1.04

the common sense, since the higher the thermal resistance of clothes, the lower the human body heat loss. Therefore, thermal comfort will be less influenced by the air velocity in those situations. Finally, the derivative of PMV with respect to MET and CLO is not constant and the lower the individual parameter, the higher the derivative. Therefore, in a actual PMV-based thermal comfort sensor, the calculated PMV error will be greater if differences, between the actual MET/CLO values and those used in the PMV formulae, exist for low values of activity level/clothing thermal resistance.

Although the PMV value depends on relative humidity, its derivative with respect to CLO do not vary for different values of ϕ . This can be verified in Figure 3.4, where the

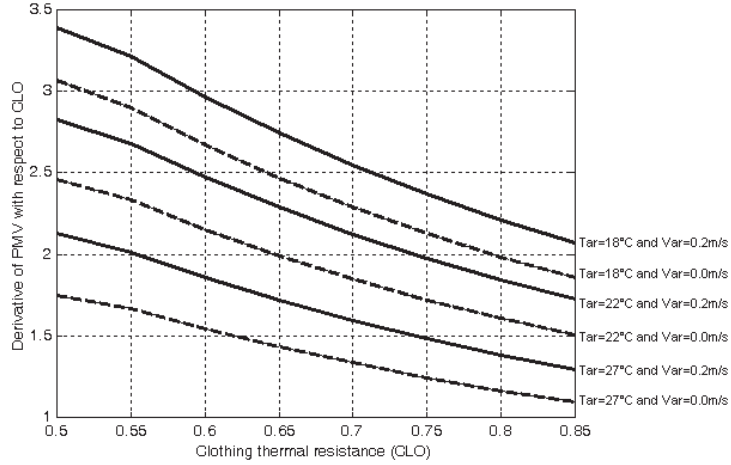


Figure 3.4: Derivative of PMV with respect to CLO , for different T_{ar} and V_{ar} values.

curves for different ϕ values are overlapped. It can also be noticed that the derivative of PMV with respect to CLO are smaller than the ones for MET. Therefore, a misselection of CLO parameter cause moderate errors on the PMV computation when compared to the selection of MET, which is consistent with the weight for those parameters shown on the sensitivity analysis presented in Section 2.2. The highest value for the derivative (among the pre-defined values in this study) was 3.39. This conclusion is useful for the analysis regarding the viability of using PMV on the HVAC control systems purposes. Assuming PMV variation between ± 0.5 is acceptable, an error between the actual CLO and the selected PMV for PMV computation can be up to 0.16. However, these limits are quit severe, because they occur for unusual values such as low temperature, high air velocities, and low CLO values simultaneously. For more frequently parameter combinations, the derivatives could be within the band 1.16 and 2.5, allowing an error of 0.43 for the CLO parameter selection.

3.2.1 Determination of individual parameter values based on their derivatives

Assuming a finite number of options for selecting the individual parameters. The lower is this number the higher can be the error due to a wrong selection. On the other hand, the greater the number of options, the more complex and expensive is the system. It has already been said that the calculated PMV errors will be higher if differences between the actual individual parameter and that indicated by the user occur for lower individual values. This conclusion can be used on PMV-based thermal comfort sensor projects,

where the individual parameters must be supplied by the occupant or estimated as a function of the thermal zone activity pattern, because more options which corresponds to low values can be selected. For instance, it was previously analyzed a *MET* estimation strategy with eight options. It was verified that if the values are equally distributed or are privileging the most usual activities, the measurement uncertainty with regard to only *MET* will lead to a maximum absolute error on PMV measurement of 1.06 (greater than the acceptable limit of 0.5). It has also been verified that if a sensitivity analysis based distribution for the eight options is carried out, the measurement uncertainty for *MET* will be reduced in a way that the PMV uncertainty will be acceptable.

Next chapter will analyze an optimal set of available selection for *MET* and *CLO* values based on the PMV derivative regarding to both individual parameters.

4 Estimation of individual parameters using Genetic Algorithm

It has been shown in Section 3.2.1, that if a sensitivity analysis based distribution for the eight options is carried out, the measurement uncertainty for *MET* will be reduced in a such way that the PMV uncertainty will be acceptable. However, for PMV sensor assembly purposes, it is not enough that the measurement uncertainty to only one parameter is just acceptable, due to the fact that the final PMV uncertainty is influenced by measurement uncertainty on the six parameters (Chapter 6). Therefore, it is necessary to reduce the individual parameter uncertainty, in order to make the final uncertainty considerably below the acceptable limit. This objective has considerable importance due to the great weight of the individual parameters, as shown in Section 2.2. Therefore, the use of an optimization method - genetic algorithm - has been adopted, to obtain the optimal set of values for each individual parameter. It has been defined ten switches for each individual parameter.

On the other hand, if those ten values, for the individual parameters, are obtained through the optimization method and then, they correspond to very uncommon *MET* and *CLO* patterns, great errors may occur. Hence an intermediate strategy will be used. First, five values will be chosen, which are related to five common individual parameter in a controlled environment. After that, the genetic algorithm will be used to search the five other values, that must be influenced by the five pre-defined options.

The values 0.8, 1.0, 1.2, 1.6, and 2.9 has been defined for the *MET* parameter, which relating activities can be seen in Table 4.1.

The clothing thermal resistance is a combination due to different garment types, which makes its setting more difficult than the one for the activity.

Then, a different way to input the values for *CLO* has been adopted. Ten options

Table 4.1: Activity level options and their *MET* values

Option	Activity level option	<i>MET</i> value
1	Reclining/sleeping	0.8
2	Seated Relaxed	1.0
3	Standing Relaxed/Sedentary activity (office, dwelling, school, laboratory)	1.2
4	Standing, light activity (Teacher/presentation/shopping/laboratory/light industry)	1.6
5	Standing, medium activity (shop assistant/domestic work)	2.0
6	Craftsmen	2.2
7	Manual work (Refrigerator/butcher)	2.4
8	Washing dishes standing	2.5
9	Domestic work (washing by hand/ironing)	2.9
10	Manual labor (iron and steel - ramming the mould with a pneumatic hammer)	3.0

remains on the proposed sensor. However, each of them is related to one single garment so that the user can intuitively select the options. Although there are ten options, in practice, 1024 is the number of garment option combinations offered to the user.

Table 4.2: Clothing options and their *CLO* values

Clothes options	<i>CLO</i> value
Shorts (no shoes)	0.15
Mini skirt + Blouse + Light dress (sleeveless) + Shoes	0.50
Suit, Tie e Shoes	1.00
Highly-insulating coveralls	1.15

4.1 Methodology for the use of Genetic Algorithm

Although the genetic algorithm will be used only for the *MET* values determination, for analyzes purposes, the methodology will be used for both individual parameters. Then, through the results it will be possible to evaluate the *CLO* uncertainty, if the strategy of optimizing the ten values were adopted for *CLO*. The methodology can be described by the following steps:

- i*) Establishment of validity limits for both individual parameters (see Table 2.1).
- ii*) Definition of the five most common and important options, which must be present

among the ten values (only for *MET*).

iii) Estimation of the highest possible error for the evaluated set of ten options on the PMV value using as many combination as possible through the Monte Carlo method. The matrix (v_{ij}) has already been obtained in Chapter 2.

iv) Development of an algorithm that considers the actual individual parameter values (from the evaluated combination) and simulates which of the ten options from the evaluated genetic algorithm individual, may be chosen by this occupant.

v) Configuration of the genetic algorithm as shown in Table 4.3.

Table 4.3: Genetic Algorithm setup for the individual parameters optimization.

Parameter	Value
Crossover probability	80%
Mutation probability	4% - 8%
Population size	200 individuals
Number of generations	100
Elitist strategy	Yes

The crossover probability is the parameter that shows the probability of two individuals from the actual generation to cross themselves for the next generation. The mutation probability determines the aptness for the algorithm to change some individual characteristic, viewing the creation of new individuals, who are capable of run away from the algorithm tendency (convergence), avoiding the local minimum problem. This parameter cannot be so great, to be possible the convergence. The population size determines the search width. Then, it determines how many individuals (sets of ten options) will be evaluated in each generation. The number of generations determines the search deepness (how many generations). Elitist strategy assure that the best value from each generation will be presented in the next generation.

vi) Optimization, for each generation, of the five variable options. Then, the genetic algorithm can determine the strongest individual (individual with the smallest quadratic error in the algorithm third step) for each generation, where an individual is composed by the five optimized values plus the pre-defined values.

vii) Tuning the five values obtained by the algorithm, making them closer to a well-defined activity. As the values are modified, the errors might be softly increased, but, the probability of error related to the difficulty of finding an option closer to the reality may be reduced.

4.2 Results for MET

For the five pre-defined *MET* options, the genetic algorithm has found the following ten options: 0.8000, 0.8932, 1.0000, 1.1094, 1.2000, 1.4046, 1.6000, 2.0081, 2.5282, and 2.9000. Then, those ten values were tuned and the activities are shown in Table 4.4, with the respective option number. It can be verified that exists a great gap among the options above 1.6000. If the occupant activity is within these bands, he/she must choose an option far from its activity. However, the genetic algorithm shows that a great *MET* error can occur in these bands and the PMV error remains small. Therefore, the optimization privileges low values for the options (Table 4.4). This result is in accordance with the analysis of the behavior of PMV with respect to the *MET* parameter, shown in Section 3.2. This quadratic error can be compared to those obtained if other strategies had been adopted (Table 4.5).

Table 4.4: Values for *MET* parameter obtained by using a genetic algorithm.

Activity	<i>MET</i> Value	Switch num- ber
Reclining\sleeping	0.8000	1
Reclining	0.8932	2
Seated Relaxed	1.0000	3
Clock and watch repair	1.1000	4
Standing Relaxed\Sedentary activity (office,dwelling,school,laboratory)	1.2000	5
Car Driving\playing electronic games	1.4000	6
Standing, light activity (Teacher\presentation\shopping\laboratory\light industry)	1.6000	7
Standing, medium activity (shop assistant\domestic work)	2.000	8
Washing dishes standing	2.5000	9
Domestic work (washing by hand\ironing)	2.9000	10

As can be seen in Table 4.5, the greater errors occur when well-known *MET* values or a uniform distribution for the *MET* interval is used rather than the optimization method. As expected, these errors are very high. The results also show that the adopted strategy, that pre-defines five-options and optimizes the other five, presents a slightly higher error when compared to that obtained when the ten values are optimized because it considers the behavior of PMV related to *MET* (Section 3.2), besides including very-common activity values. The best result, when five pre-defined options are optimized, has been obtained for a mutation probability of 4%, because the lower mutation value

Table 4.5: Comparison of methods for estimation *MET*

Method for options definition	Sets of options	Maximum error
Common values (Table 4.1)	0.80; 1.00; 1.20; 1.60; 2.00; 2.20; 2.40; 2.50; 2.90; 3.00	0.7992
Uniform distribution for <i>MET</i>	0.80; 1.04; 1.28; 1.53; 1.78; 2.02; 2.27; 2.51; 2.75; 3.00	0.9236
Ten values optimized through genetic algorithm	0.8263; 0.9135; 0.9884; 1.0752; 1.2799; 1.5511; 1.9491; 2.5375; 2.5547; 2.9035	0.3608
Five predefined values and five values optimized through genetic algorithm	0.8000; 0.8932; 1.0000; 1.1000; 1.2000; 1.4000; 1.6000; 2.0000; 2.5000; 2.9000	0.3623

aids the algorithm convergence. However, for the ten options, a mutation probability of 8% has been applied since the high mutation value aids the individual to run away from local minimum and improves the results.

4.3 Results for *CLO*

The garments, defined for the PMV Sensor, can be seen in Table 4.6. Note that more than one garment type has been defined for the same switch since different garment types can have the same *CLO* value and can not be used simultaneously. Therefore, more options are added on the system, without increasing the amount of switches. Then, the possibility of finding occupants' garments on the system is increased and the measurement uncertainty for *CLO* is reduced.

The genetic algorithm has been used to find the ten *CLO* options (ten garment sets), only to estimate the error for this case. This value can be used, in a conservative way, as an upper limit for *CLO*. Comparisons in terms of maximum error can be seen in Table 4.7.

To conclude, if the strategies presented in this chapter were used for the definition of *MET* and *CLO* option values, the PMV would be subject to errors up to 0.36 and 0.16, respectively. Therefore, the efforts, for the minimization of the individual parameter errors, allow the use of the PMV Sensor on HVAC equipment because it would be able to provide thermal comfort ($PMV = \pm 0,5$) when the PMV is kept at zero.

Table 4.6: Garment description and *CLO* Values for each switch.

Garment description	<i>CLO</i> value	Key number
Shoes	0.03	1
Walking shorts \ Thin strap, short gown	0.15	2
Normal trousers\Heavy skirt(knee-length)	0.25	3
Turtleneck Panties	0.03	4
Short sleeve shirts \ T-shirt	0.09	5
Long sleeves shirts \ Thin sweater(long sleeves, turtleneck) \ Light dress (sleeveless)	0.25	6
Sweater	0.28	7
Jacket	0.35	8
Coveralls (either daily wear, belted or work) \ Coats and overjackets \ Winter dress long sleeves \ Sleepwear (long sleeve, long pyjamas) \ Robes (long sleeve, wrap, long)	0.50	9
Highly-insulating coveralls	1.13	10

Table 4.7: Errors for different ways for gotten the *CLO* options

Methodology for options definition	Sets of options	Maximum error
Uniform distribution for <i>CLO</i>	0.3000; 0.3944; 0.4889; 0.5833; 0.6778; 0.7722; 0.8667; 0.9611; 1.0556; 1.1500	0.2201
Ten values optimized through genetic algorithm	0.3441; 0.4067; 0.4846; 0.5167; 0.5764; 0.6139; 0.7264; 0.8651; 1.0230; 1.0757	0.1602
Each switch is related to an garment type (adopted strategy)	see Table 4.6	< 0.1602

5 Hardware for PMV Sensor

The PMV sensor hardware has been conceived based on the sensitivity analysis carried out in Chapter 2 (see Figures 5.1, 5.2 and 5.3). Figure 5.4 presents a diagram with the five PMV Sensor modules. The sensor design allows it to be used for thermal comfort evaluation and control of HVAC systems. For these reasons, there are two analogic outputs in its hardware. The first one is used to return the PMV index, while the second one can be used by any other related application.

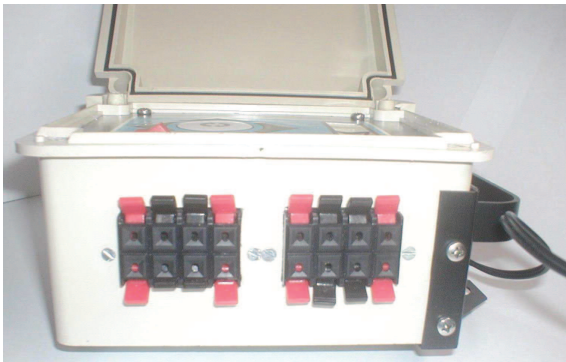


Figure 5.1: PMV Sensor: right-hand side

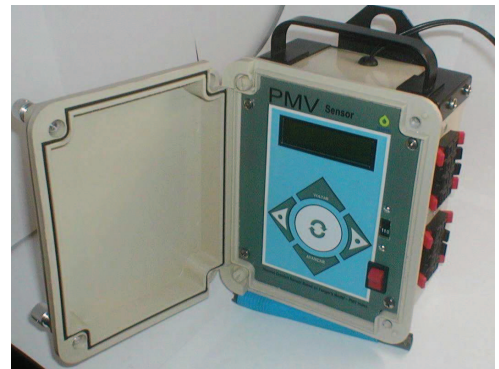


Figure 5.2: PMV Sensor

Despite Fanger's model considers six parameters, a PMV control system could be limited to modify only one of them, e.g., T_{ar} . The PMV index can be controlled indirectly by the HVAC control system because the controller can modify the parameter T_{ar} , targeting a set-point value that turns the PMV index into zero. The proposed sensor is prepared for this case because T_{ar} can be applied to the first analogical output and T_{ar} optimized can be applied to the second one.

5.1 Sensor Module

The environmental parameter sensors presented in this module are shown in Table 5.1.

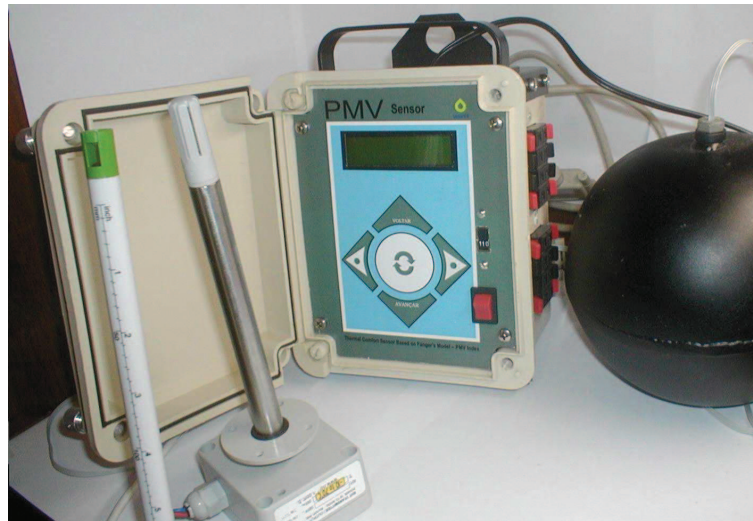


Figure 5.3: PMV Sensor and parameters' sensors

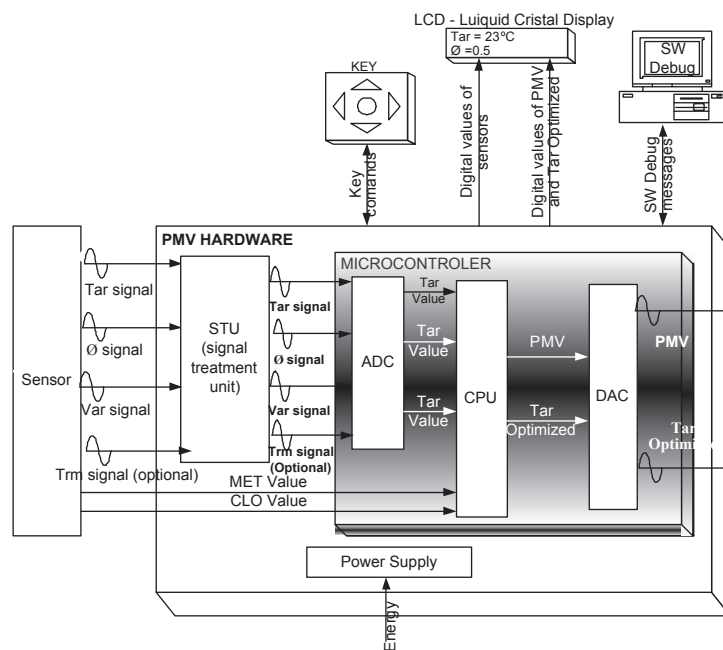


Figure 5.4: Block Diagram for the PMV Sensor hardware

Table 5.1: List of Sensors

Parameter	Signal	Lower limit	Full scale
T_{ar}	Voltage (V)	0	10
$T_{rm}(optional)$	Voltage (V)	0	0.5
V_{ar}	Voltage (V)	0	10
ϕ	Voltage (V)	0	10

5.2 STU (Signal Treatment Unit) Module

The impedance of the input signals should be high to reduce the sensitivity to sensor impedance, which is influenced by fluctuations on temperature and wire length. On the other hand, the source for signals applied to the ADC module (see Section 5.3) must have a lower impedance due to the fact that analogical to digital converter needs a minimum current. Therefore, the STU module role is to adequate the impedance for both sensors and ADC modules, by using an operational amplifier for each sensed signal. These components have a high impedance for the inputs and low for the outputs. Signal limits for T_{ar} , V_{ar} , and ϕ sensors are from 0 to 10V (see Table 5.1). However ADC peripheral operates from 0 to 3V. Then STU module has also the purpose of applying a gain to the sensor signal, using specific resistors value together with the operation amplifier. So STU has been configured to a gain of 30% due to the fact that it must reduce the signals level.

5.3 ADC Module

In order to evaluate the PMV index, the PMV sensor must include a digital processor. ADC module converts measured analogical signals (from "STU") to digital codes. For the processor chosen, there is a peripheral component that plays the role of ADC Module. (see Figure 5.4). The advantages of a microprocessor that contains an ADC peripheral, as size, costs and consumption, are important to allow the use of this sensor in HVAC control systems. This A/D microcontroller has 12 pins which provides 2^{12} combinations, 2.44 mV resolution and $3^{\frac{1}{2}}$ digits.

5.4 CPU (Central Processing Unit) Module

A 8-MHz 16-bit 5kB-RAM RISC CPU has been used to calculate the PMV. CPU is enhanced by timers and hardware multipliers and runs a non-linear optimization method to find out the optimal air temperature that leads PMV to zero. In spite of being complex and non-linear, Fanger's model optimization should not use high computation effort methods like genetic algorithm, which not suits a real time application.

5.5 DAC Module

The PMV index obtained from the CPU module is digital. However, as this project aims to obtain an equipment for general use in HVAC applications, the evaluated values (either PMV and PMV set-point or T_{ar} and T_{ar} -optimized) should be converted into analogical signals. If the PMV sensor had digital interfaces, the HVAC equipment, which uses the PMV sensor, would have an interface, with the same communication protocol. Therefore, digital signals from "CPU" module must be converted into analogical signals in the "DAC" module. The "DAC" module plan is done by two MSP430 peripherals, one for each output signal, which are devices denominated as digital to analogical converter.

6 Uncertainty Analysis

An uncertainty analysis is carried out in four steps that includes the determination of derivatives of PMV with respect to its parameters. However, in this case the uncertainty analysis is complex because the PMV equation is not only complex but also non-linear with respect to its parameters. Furthermore, the partial derivative of PMV with respect to its parameters is also non-linear and dependent not only of the own parameter but also on the other Fanger's model parameters. Therefore, it is impossible to do the uncertainty analysis through the derivative function analytical solution. Even the numerical method to solve the partial derivative presents some problems due to the difficult to determine the values that lead the partial derivative to its maximum values. A best strategy is to evaluate the four steps, considering all possible combinations of the six model parameters and then, considering the most critical case as the PMV uncertainty. Despite the fact that to obtain all combinations is impossible, good results are obtained in case of using the Monte Carlo statistic method (Duarte e Arruda, 1993) to generate as many combinations as possible.

In Section 6.1 and 6.2, uncertainty analysis are carried considering two scenarios: *i*) T_{rm} is measured and *ii*) T_{rm} is not measured, but considered equal to T_{ar} .

6.1 Uncertainty Analysis when T_{rm} is measured

As seen in Section 2.3, the proposed PMV sensor considers the hypotheses that $T_{rm} = T_{ar}$. However, Figure 5.4 shows that an input to T_{rm} signal can be optionally included. Then, the PMV uncertainty analysis is carried out considering that a T_{rm} sensor is coupled to the PMV sensor.

6.1.1 Uncertainty analysis methodology

The uncertainty analysis methodology is based on the following steps:

i) It is necessary to obtain a matrix of random values (v_{ij}), a matrix of PMV values (PMV_{ij}) and a matrix of derivatives of PMV to each parameter (S_{ij}), for each combination. These matrices have already been determined in Chapter 2 and will be used in this analysis.

ii) It is necessary to determine the PMV parameters accuracy matrix ($IM_{Parameter\ ij}$), for the values of v_{ij} matrix.

T_{ar} , ϕ , T_{rm} and V_{ar} parameters are read through analogical sensors (see Table 5.1), which accuracy can be seen in Figures 6.1, 6.2, and 6.3 and Equation 6.1. Equation 6.1 shows that the uncertainty for any V_{ar} value is low. Furthermore, this parameter has a low weight on Fanger's model results (Section 2.2), so that the final PMV error, influenced by the six parameter uncertainty, may not have much influence from V_{ar} accuracy.

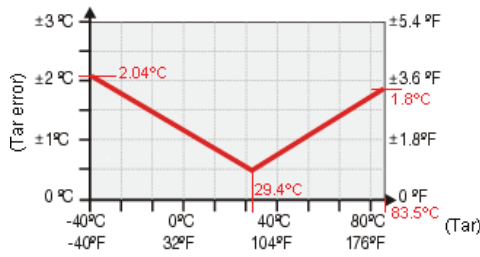


Figure 6.1: Air temperature sensor accuracy

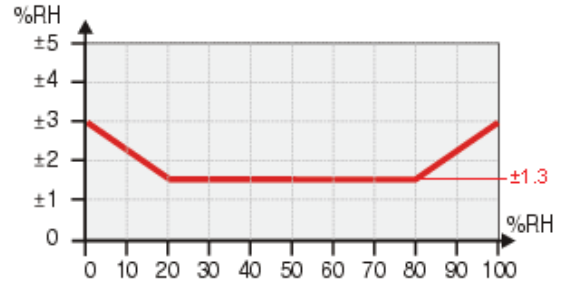


Figure 6.2: Relative humidity sensor accuracy

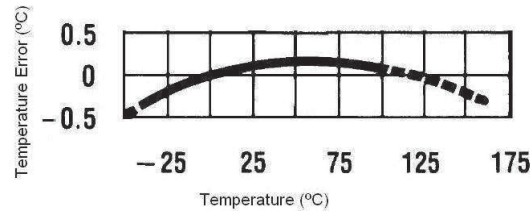


Figure 6.3: Mean radiant temperature sensor accuracy

$$IM_{V_{ar}} = 0.04 + 2\% \text{ of } V_{ar} \text{ measured value} \quad (6.1)$$

The measurement uncertainty for MET , which is provided via ten switches, is evaluated from the difference between the real MET value and the one selected by the user. The CLO parameter can be provided by ten switches. In Section 4.3 is shown that the determination of the exact CLO accuracy is practically impossible in an actual system. With the adopted strategy, 1024 combinations can be used to determine CLO , which

should decrease the difference between the attributed and the actual CLO value. Based on Chapter 4, a measurement uncertainty constant for PMV regarding to CLO is considered to be equal to 0.048, within a wide band.

iii) In this step, the uncertainty of PMV to each parameter for each combination is then calculated. These values are provided by Eq. 6.2, where each ij position is the measurement uncertainty of PMV with respect to the parameter j , when the values of the i – th combination are considered.

$$IM(PMV)_{Parameter\ ij} = S_{ij} \times IM_{Parameter\ ij} \quad (6.2)$$

iv) Finally, the final PMV error is evaluated for all the 1500 PMV parameters combinations, considering the combination of the PMV uncertainty with respect to the six parameters. As the parameter uncertainties are not related among themselves, Eq. 6.3 should be used (Beck e Arnold, 1977).

$$IM = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^{nParameters} IM_{Parameter\ j}^2 \right)} \quad (6.3)$$

6.1.2 Results

If T_{rm} is monitored, the greatest PMV errors will occur for the combination shown in Table 6.1, where the derivative of PMV with respect to the six parameters and the accuracy of each parameter for the analyzed combination is presented. As one can notice, in this combination, MET , followed by T_{ar} , has the highest impact on the PMV uncertainty. The PMV measurement uncertainty due to the combination of the six parameters is 0.4239, which is less than the limit of 0.5. Therefore, after choosing examples of actual sensors and carrying out the uncertainty analysis, it can be concluded that when T_{rm} is measured, the proposed PMV sensor is capable to evaluate the PMV index.

6.2 Uncertainty Analysis when $T_{rm} = T_{ar}$

In this section, the PMV uncertainty analysis is carried out assuming $T_{rm} = T_{ar}$, as proposed in Section 2.3.

Table 6.1: Uncertainty analysis results: (*) $T_{rm} = T_{ar}$; (**) $T_{rm} - T_{ar} = 0.4$; (***) T_{rm} is monitored.

Parameter	Combination of values	S_{ij}	Accuracy to Pj	$IM(PMV)_{ij}$
T_{ar}	23.42	0.27	0.63	0.171
T_{rm}^*	19.71	0.19	0.63	0.120
T_{rm}^{**}			0.75	1.443
T_{rm}^{***}			0.12	0.02
ϕ	0.68	0.80	0.01	0.010
V_{ar}	0.03	0.00	0.04	0.000
MET	0.95	7.46	0.05	0.384
CLO	0.35	4.50	-	0.048

6.2.1 Uncertainty analysis methodology

The strategy adopted in Section 6.1 is possible when the six PMV parameters measurement uncertainties are known for all combinations. Then, the analysis result is the maximum PMV uncertainty. However, when the hypothesis that $T_{rm} = T_{ar}$ is adopted, the measurement accuracy for T_{rm} is not known due to the fact that is not possible to determine the difference between the two temperatures. However, assuming 0.5 as the maximum absolute error possible on the PMV index, the accuracy of the other five parameters and treating the difference between T_{ar} and T_{rm} as an unknown, it is possible to determine the maximum value for the difference between those temperatures that leads to the uncertainty on the PMV index of 0.5. Then, the analysis is inverse and its result is the maximum difference between T_{rm} and T_{ar} instead of the maximum error.

Considering the methodology presented in Section 6.1.1, the first and third steps remain the same. However, the steps two and four are described as follows:

ii) Due to the adopted strategy, T_{rm} accuracy is function of both T_{ar} sensor accuracy and the difference between T_{rm} and T_{ar} . As both positive and negative errors can occur in the two T_{rm} source uncertainty, the expected T_{rm} accuracy can be evaluated through Equation 6.4, where the value for the difference $T_{rm}-T_{ar}$ will be determined through this analysis.

$$IM_{T_{rm}} = \sqrt{(IM_{T_{ar}})^2 + (T_{rm} - T_{ar})^2}. \quad (6.4)$$

iv) When comparing to strategy adopted in Section 6.1, ϕ , V_{ar} , MET and CLO uncertainties remain not related to themselves. However, the uncertainty of T_{ar} and T_{rm} is now inter-related so that the PMV uncertainty due to the six parameters is now

provided by Eq. 6.5.

$$\begin{aligned}
 IM(PMV)_i = & (((IM(PMV)_{T_{ar}})_i + (IM(PMV)_{T_{rm}})_i))^2 \\
 & + (IM(PMV)_{\phi})_i^2 + (IM(PMV)_{V_{ar}})_i^2 \\
 & + (IM(PMV)_{MET})_i^2 + (IM(PMV)_{CLO})_i^2)^{0.5}
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

If any absolute value of the fourth-step matrix is greater than 0.5, it means that PMV index uncertainty will be greater than the thermal comfort tolerance established by ASHRAE, even if T_{ar} is equal to T_{rm} . This situation may not occur because the strategy - which was chosen for providing the individual parameter values - was developed targeting the increase of the accuracy of measurement of individual parameters that represent two of the three most critical parameters. Otherwise (all values below 0.5), the difference between the temperatures can be increased interactively till all values of the sixth-step matrix remains within $|0.5|$.

6.2.2 Results

If T_{rm} is considered equal to T_{ar} instead of being measured, the greatest errors in PMV will occur for the parameters combination shown in Table 6.1. The PMV measurement uncertainty due to the combination of the six parameters is 0.485, which is less than 0.5. Therefore the difference between T_{rm} and T_{ar} was increased interactively. The value of 0.4°C is the maximum difference between the two temperatures that leads to the PMV uncertainty of 0.5, for all combinations of parameters. The combination that cause the maximum uncertainty on PMV can also be seen in Table 6.1, because the values are the same of those presented when T_{rm} is measured, except for the line related to the T_{rm} parameter.

The limit between the temperatures is strict. However, this value was obtained considering that all of the 1500 values of PMV uncertainty are up to 0.5, that is, a very severe rule. However, analyzing the data, if the difference between T_{rm} and T_{ar} is 0.63°C, only one of the 1500 combinations will lead to a PMV error greater than 0.5 and 1473 combinations (98.2%) will lead to a PMV error up to 0.4. These results show that the rules adopted are severe because few specific parameter combinations lead to great PMV errors. Then, the difference between the two temperatures was increased and verified that if the difference between T_{rm} and T_{ar} is 2°C, 95% of the combinations will lead to an error on the PMV index up to 0.5. Therefore, after choosing examples of actual sensors and carrying out the uncertainty analysis, it can be concluded that proposed PMV sensor is

capable to evaluate the PMV index in environments where the difference between those two temperatures are lower than 2°C.

7 Experimental results

The results discussed in Chapter 2 shown that the Fanger's model presents low sensitivity in relation to V_{ar} , for the analyzed band. However, especially in tropical climates, a fan is frequently used to improve thermal comfort by increasing indoor air velocity. In fact, although the low sensitivity of the PMV index, a fan can cause a huge variations in the indoor V_{ar} leading to a significant change in the PMV value. For instance, a fan can easily and quickly double the V_{ar} value, which does not occur quite often with T_{ar} . However, the greatest sensation is felt only by individuals placed in the air flow directly. It is important to mention that the use of HVAC systems, like fans, are responsibly for large gradients not only on the V_{ar} , but also on the ϕ and mainly on T_{ar} , which is the predominant parameter of the Fanger's model. This fact contributes for the great modification on thermal comfort sensation for the occupants near the fan.

However, HVAC systems are designed to avoid air velocities higher than $0.25m/s$ in summer or $0.15m/s$ in the winter, independently of the spatial gradients (ASHRAE, 1981). These constraints are also discussed in (Bin e Sekhar, 2006), where CFD simulation have been carried out. In (Humphreys e Nicol, 2002) the behavior of PMV over the entire range of ASHRAE database environments is presented, where the mean air speed limit for these places is $0.13 m/s$. In addition, PMV appears to be free from serious bias at low air speeds, but it overestimates the warmth sensation if the air speed exceeds about $0.2 m/s$. Therefore, it underestimates the cooling effect of an increased air movement. This $0-0.2m/s$ range may be compared to the range $0-1m/s$ given in ISO 7730. Therefore, even if a fan is used and high air velocities is present near the fan, the occupant's region is the correct place to be monitored, where the air velocity must not be so high to ensure comfort for the occupants and Fanger model reliability.

First, the measurement of air velocity is difficult in actual applications, due to the great gradients and the sensor cost. Second, air velocity has a low impact on the PMV equation and low air velocities should be ensured for the HVAC system. In this way, the hypotheses that this parameter is treated as a constant was proposed in Section 2.3.

Therefore, Experiments have been run in an office having the dimensions presented in Figure 7.1, - to investigate the air velocity impact on the PMV, by using the proposed sensor. It is assumed the occupant is placed close to the table.

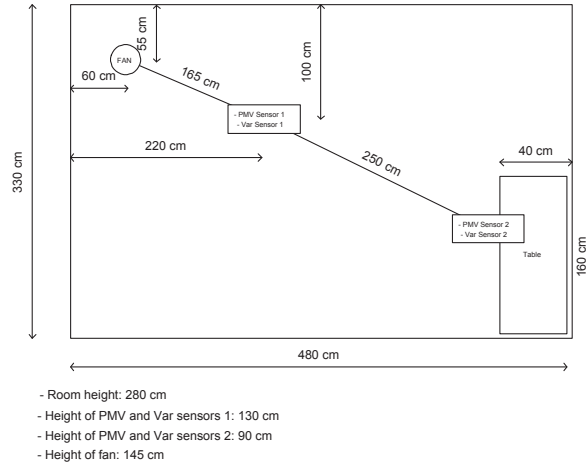


Figure 7.1: Plant of the room used for the experiments.

A fan, which is used as the only HVAC equipment, is placed in the opposite corner in relation to the the occupant's area, to avoid discomfort generated by the great values of air flow. Great modifications on both the V_{ar} parameter and PMV index are expected near the fan. However, if the HVAC system is properly designed, the values for V_{ar} should not be higher than 0.25m/s in the occupants' area (ASHRAE, 1981). During the experiment, the influence of some PMV parameters are analyzed. First, the fan will be turned on and off (using the faster speed option), changing V_{ar} through its limits values. Second, the activity level and thermal resistance of clothes are configured on their lower and upper expected values for an office, to know, from 1.2 to 1.6 met and from 0.37 to 0.87 clo, respectively. Through the use of two actual units of the proposed sensors, V_{ar} and PMV values were monitored near to the fan and on the occupant's region (near the table), as shown in Figure 7.2.

Figure 7.2 shows that the air velocity for the occupant placed near the fan is about 1.5m/s and the one for the occupant placed near the table is about 0.25m/s. It can be noticed that in spite of PMV can be changed in 1.7 units near the fan, the modifications on PMV values are up to 0.5 for the occupants region. Therefore, it is proven that great modifications on thermal comfort sensation is felt by individuals who are placed in the air flow directly, but the influence is much lower on the occupants region, even when the office's air velocities is very modified.

In Figure 7.2, it can also be noticed that the modifications on thermal comfort when

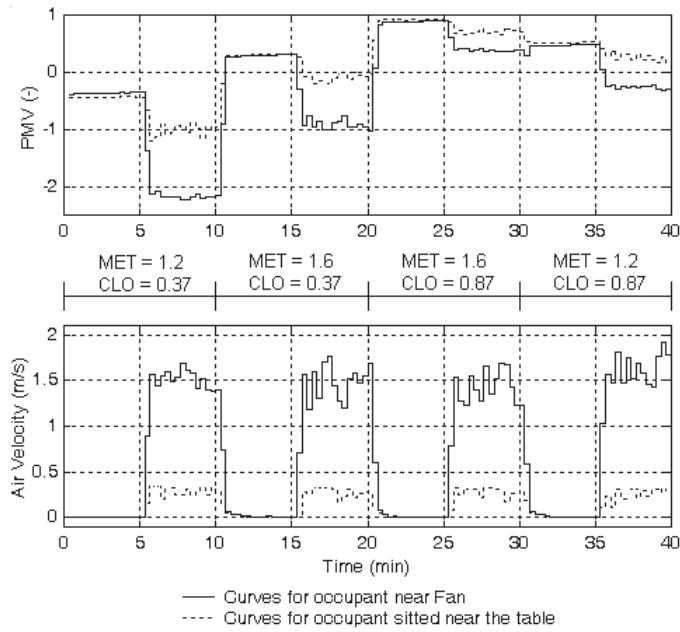


Figure 7.2: Experimental air velocity analysis

the fan is activated, is different for different moments of the experiment, due to the different values for MET and CLO parameters. The greatest variations on PMV index have occurred when both MET and CLO values were lower. Thermal comfort is not highly influenced, even for the occupant near the fan, when MET and CLO values were high. For the two other combinations, the variations on thermal comfort are moderate. But the variation on PMV index is higher for high values for MET and small value for CLO than otherwise, showing that if values suitable for a office are considered, the modification on the thermal comfort sensation due to the variation on the air velocity will be more attenuated when the occupants modify their garments. This fact is in accordance with the common sense why one may reduce the sensation regarding air velocity if the clothes are of high thermal resistance value.

Those conclusions show that even using a fan for the air circulation and for improving the convective heat exchange, the thermal comfort condition with regard to limits for air velocity can be granted on the occupant's region. A second conclusion is that due to the lower variation on the occupant's region and to the lower weight for the V_{ar} parameter, even when a fan is used, the variation on the PMV index will be up to 0.5 - which is the acceptable limit for PMV variation - on the occupant's region. Then, the hypothesis of treating this parameter as a constant is valid.

It is important to mention that in case of natural ventilation (NV), higher variations on V_{ar} can occur even in the occupant's areas. However, the Fanger's model is not adequate

for this case. This limitation on the Fanger's model cannot prejudice our purpose, to know, PMV sensor for thermal comfort control, due the fact that this control is not done in NV environments. The main reason is that the effect of the control actuator (HVAC equipments) will be severally decreased if there is both windows or doors opened.

8 HVAC Control Using a PMV-Based Comfort Region

The PMV is likely the widest used thermal comfort index and the PMV Sensor has been successfully used on PMV monitoring of an experiment (see Chapter 7). Despite the sensor can be used in many ways to control PMV, a low-cost PMV-Sensor could be likely more useful if had only sensors for temperature and relative humidity. Therefore, a simplified analysis to control a split-type HVAC is presented.

Comfort Regions considering the individual parameters (see Appendix B) have been proposed in (Trebien *et al.*, 2007). Therefore, in spite of the fact that this Comfort Region for thermal comfort control considers the Fanger's Model to generate the comfort regions, it is not necessary a real-time PMV evaluation.

8.1 Comfort Regions

The PMV-based Comfort Regions, proposed in (Trebien *et al.*, 2007), are regions defined by *Relative Humidity and Temperature* graphs. The Fanger's Model has been used to define these areas considering a specific value for MET and CLO. The Comfort Region is defined for the combination of T_{ar} and ϕ parameters, which lead to PMV value between -0.5 and +0.5. It is assumed that $T_{rm} = T_{ar}$ and a constant value for V_{ar} is pre-defined. In this way, only T_{ar} and ϕ have to be monitored.

As mentioned in (Trebien *et al.*, 2007), it is possible to pre-define a comfort region for a specific environment. Then, this Region is obtained by the intersection of the four comfort regions related to the combination of the limit values for MET and CLO for this environment. This comfort region would be smaller than those defined by using specific values for MET and CLO. Then, the ten switches for each of the individual parameters can be replaced by a n-position knob related to n environments.

8.2 Controller

In this chapter, an experiment to evaluate the performance of a PMV-Based-Comfort-Region Controller is present. Then, not only T_{ar} and ϕ but also T_{rm} , V_{ar} , T_{ext} , PMV and the Simplified PMV (PMV_S) should be analyzed. Therefore, although the PMV-Based-Comfort-Region Controller is very simple, it has been decided to use the *Sistema de Monitoramento e Controle de Climatização* (SMCC), presented in Appendix A. This system allows the user to monitor eight parameters and select the controller (ON/OFF, PI, PID, RTS, EE). Finally the user can select the control variable, among these options: air temperature, PMV or PMV-based Comfort Regions. By specifying limits for the relative humidity, the Comfort Region is defined by lower and upper acceptable values for air temperature, which is the main parameter to be modified. These limits can define the setpoint and acceptable variation for any controller included on SMCC. For this experiment, an Office-like environment has been used as the source for the PMV-based Comfort Region.

The SMCC can active either the normal or the reverse compressor cycle, when PMV-Based-Comfort-Region Controller indicates that is necessary cooling or heating the indoor air.

8.3 Environment to be Conditioned

The analyzed environment is an office, that is located in the *Thermal Systems Laboratory* (LST), at *Pontifical Catholic University of Paraná* (PUCPR) (Figures 8.1 and 8.2).

Figure 8.3 shows the environment dimensions, where up to eight occupants can simultaneously work.

A 12000-Btu split type air conditioner (Figures 8.4 and 8.5) has been used as the HVAC device in this experiment. The air conditioner is presented without its front cover, due to the need of making confections between the SMCC and the air conditioner circuit board.

It is important to mention that when this air conditioner is turned on or off, it should remains at the new state for thirty seconds (on) or three minutes (off), which has to be considered by the controller. There are some fields on the SMCC interface for these configurations, to avoid mistakes on switching erroneous.

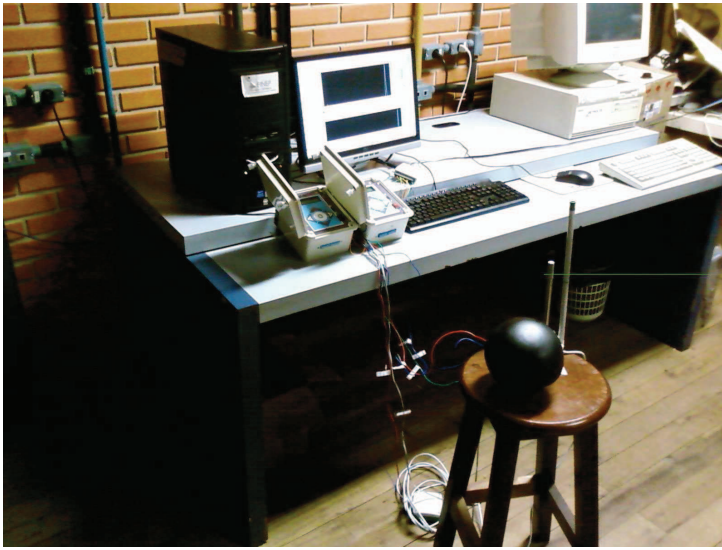


Figure 8.1: Environment - occupancy /working place



Figure 8.2: Environment

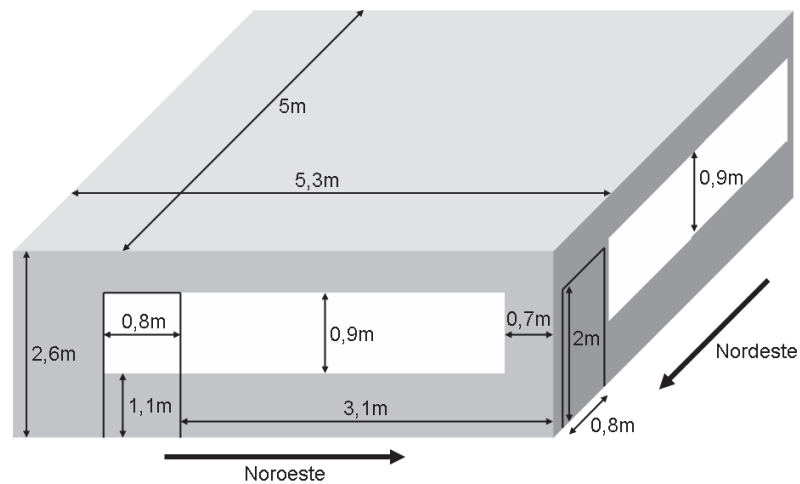


Figure 8.3: Environment dimensions

The environmental parameters and PMV sensors have been positioned near to a desk, that is placed at the opposite air conditioner corner (Figures 8.6, 8.7 and 8.8). Then, the control process should be more complex, due to the presence of convective transport delay.

The environmental parameter sensors and PMV sensors signals have been connected to the SMCC acquisition board, which has been installed on the computer placed on the occupant desk.

8.4 Results

When the experiment started, the indoor air temperature and the relative humidity were 20.8°C and 53.4% , respectively, as shown in Figure 8.9. Considering an office (which



Figure 8.4: Air Conditioner



Figure 8.5: Air Conditioner



Figure 8.6: Sensors position

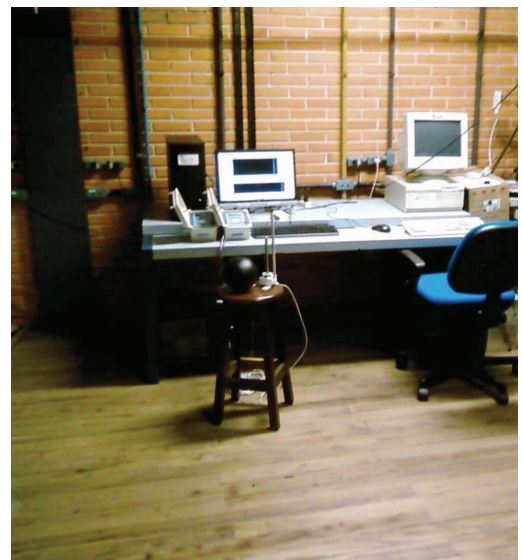


Figure 8.7: Sensors position

defines MET and CLO values) and this relative humidity value, it is necessary an air temperature within a band between 22.3°C and 22.5°C , for the thermal comfort condition. Therefore, the SMCC turns the compressor on in the reverse cycle (respecting the three-minutes period that the compressor should remains off), as shown in Figure 8.9.

At the very first minutes, the heating process takes place, as shown in Figure 8.9. Then, the PMV-Based-Comfort-Region Controller has decreased the temperature setpoint so that the air temperature reached the comfort band in 24 minutes, which is quite fast. Then the SMCC turns the compressor off. However, the indoor air temperature had increased until 19:06, due to the convective transport delay and an overshoot was verified.

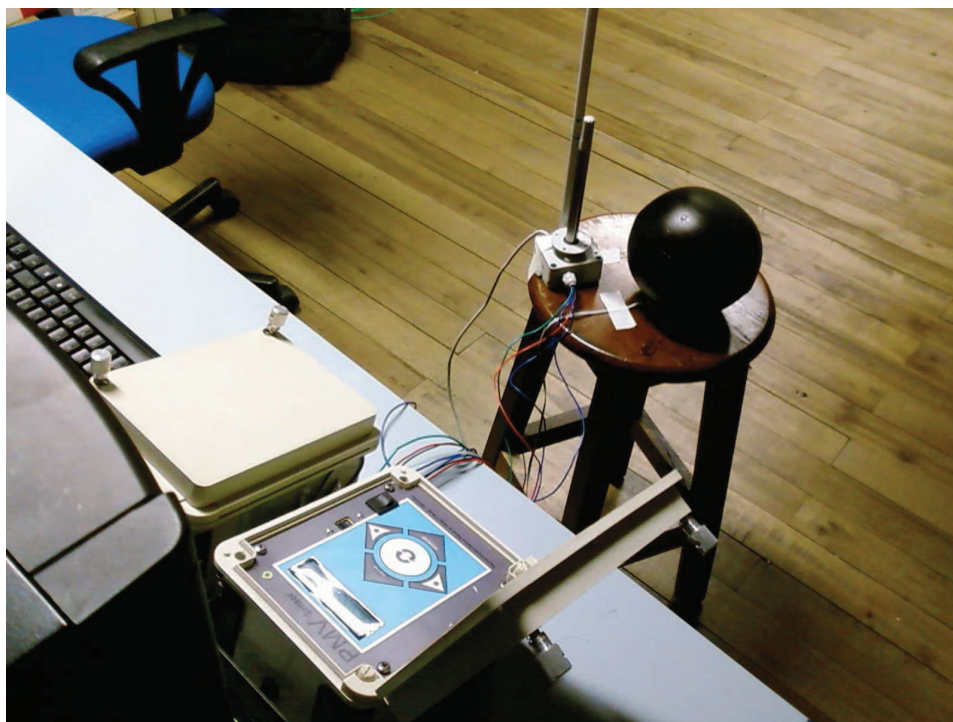


Figure 8.8: Sensors position

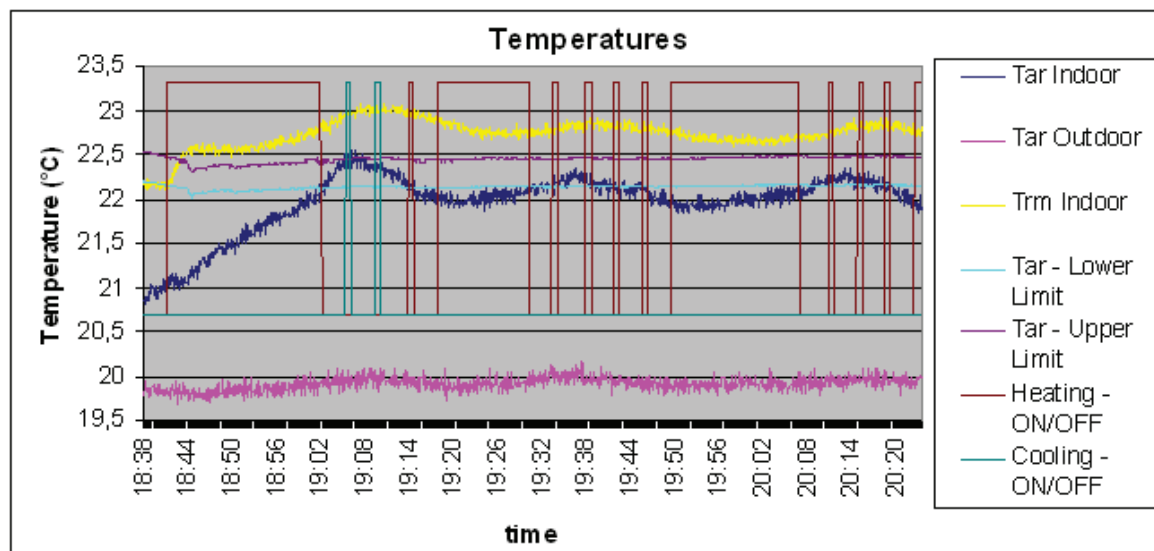


Figure 8.9: Thermal comfort control using Comfort Regions - Temperatures and control signal

After 3-minute wait, the SMCC turns the compressor on for cooling the environment.

In a few minutes, the indoor air temperature reached the setpoint temperature band so that the compressor is periodically activated to increase the temperature, and compensate the energy loss through the room envelope.

As shown in Appendix A, there are three options for the ON/OFF controller switch

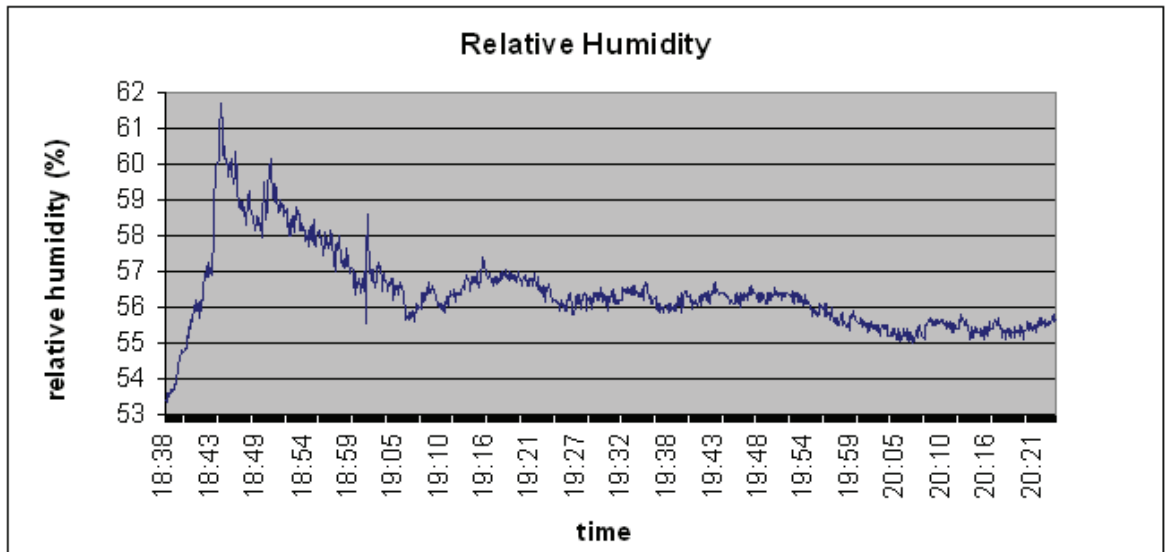


Figure 8.10: Thermal comfort control using Comfort Regions - Relative Humidity

rule. For this experiment, the low energy consumption rule has been selected. Consequently, the number of switches has been increased. In this strategy, for the reverse cycle, the compressor is turned off when the air temperature just reaches the lower limit. This strategy effect can easily be observed in Figure 8.9, as the air temperature has oscillated around the comfort region lower limit.

8.4.1 Thermal Comfort Evaluation

Among the eight analogical inputs, the SMCC reserves two of them for the environment PMV index (see Table A.1). The first one is designed to the standard PMV index, to know, when the index is obtained through the PMV Sensor configured to measure both mean radiant temperature and air velocity. The second input is designed to monitor the simplified PMV, that is obtained through the PMV Sensor configured to consider $T_{rm} = T_{ar}$ and a constant value to V_{ar} . Therefore, it is possible to evaluate the PMV-Based-Comfort-Region Controller results, due to the fact that instead of considering the air temperature or the relative humidity, it is verified the actual thermal comfort (see Figure 8.11).

By means of Figure 8.11, it is possible to conclude about the performance of the thermal comfort control using the comfort region. After reaching the set-point band (at 19:02), although the overshoot or the oscillation around the comfort region lower limit (see Figure 8.9), the thermal comfort condition has always been generated. In spite of using different strategies for calculating PMV index, thermal comfort conditions can be

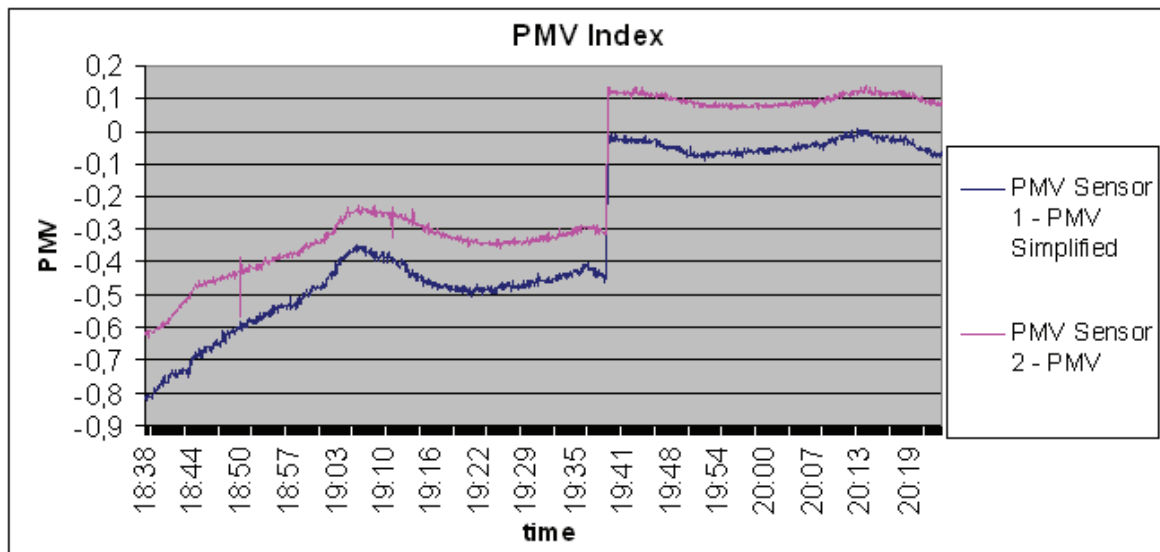


Figure 8.11: Thermal comfort control using Comfort Regions - PMV Index

observed for both PMV Sensors.

For the two PMV Sensors, the MET value has been set to 1.2, that is a lower limit for activity level in an office. Figure 8.11 shows that the PMV has been modified considerable at 19:39. This behavior is related to the modification on CLO value, from 0.6 to 0.85, which are closer to the lower and upper expected values. Despite the increase on the warm sensation, due to the increase of clothing thermal resistance, the occupant's thermal comfort has been guaranteed below 0.5.

For this experiment, two PMV Sensors (Figure 8.12), developed as shown in Chapter 5, have been used.

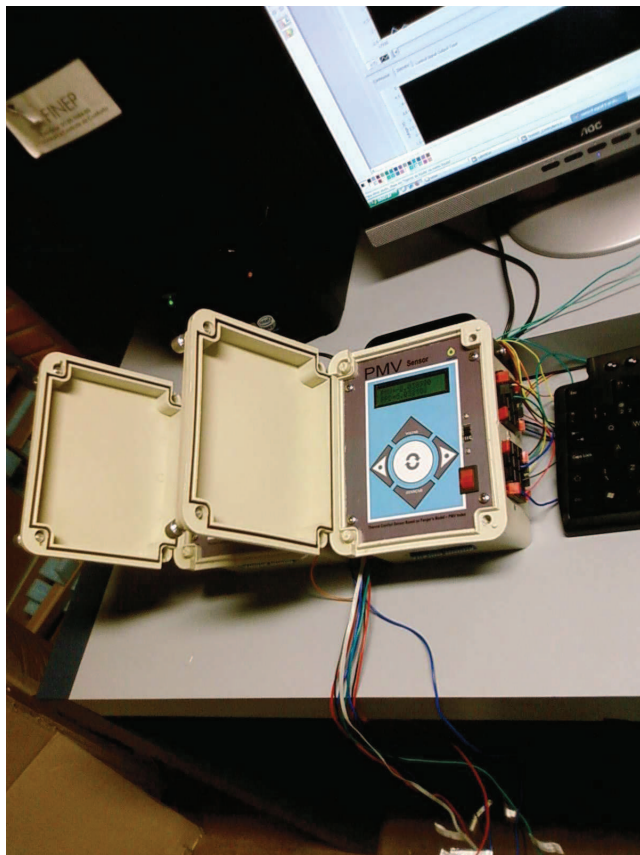


Figure 8.12: SMCC - PMV Sensors used for the thermal comfort evaluation

9 Conclusions

The attainment of PMV index in real equipment is considerably problematic due to the difficulty of measuring T_{rm} and the difficulty on the determination of individual parameters. Due to those difficulties, adjustments and adaptations must be carried out in order to develop a PMV-based sensor to be coupled to a HVAC system. In this way, this paper has presented the conception and design of a PMV-based thermal comfort sensor, considering how sensitive Fanger's model is to its parameters. The behavior of PMV with respect to three parameters for which the PMV equation is very sensible (T_{rm} , MET and CLO), was analyzed. Results obtained by using a genetic algorithm have then been used for better choosing standard values of the individual parameters. After that, the sensor hardware was presented and the PMV uncertainty was calculated. Finally, the effect of air velocity was investigated through an experiment using the actual PMV-sensor developed in this work.

Results based on the Fanger's model sensitivity analysis show that the PMV index is much more sensitive to variations on T_{ar} , MET and T_{rm} parameters than those on V_{ar} and ϕ parameters. These results are in accordance with the graphs shown in Sections 3.1 and 3.2, where the curves with same T_{ar} value are placed near each other, even for different V_{ar} and ϕ values. Results have also shown that V_{ar} , according to the model, has the lowest weight on the PMV equation, for the analyzed values. Therefore, if the air velocity measurement process is expensive or difficult to be obtained, this parameter can be treated as a constant. However, if a HVAC equipment, which acts directly on air velocity, is used, the V_{ar} value can be considerably modified. Experiments using two proposed actual thermal comfort sensors have shown that even using a fan for the air circulation and for improving the convective heat transfer, the thermal comfort condition with regard to limits for air velocity can be very substantial in the occupant's region. If these variations are high even in the occupant's area, the air velocity measurement should be done, despite its low weight on the model.

A detailed analysis has been presented on the three most predominant parameters:

T_{rm} , MET , and CLO (see Table 2.2). We have concluded, for the bands taken into account in the present study, that the partial derivative of PMV with respect to T_{rm} can be considered as a constant (about 0.13). For the hypothesis that T_{rm} value is equal to the measured value of T_{ar} , this derivative leads to an error of one unit on PMV if the difference between the actual T_{rm} and the measured T_{ar} is as high as 7.7°C. It has also been concluded that the partial derivative of the individual parameters (MET and CLO) is not constant. The lower the air temperature and mainly the lower the own individual parameter, the greater the derivative value. This information is important to determine about the viability of PMV as a control variable. First, the results can help on the validation of some adaptations, like the one for the hypothesis that T_{rm} is equal to T_{ar} . Second, that information can be used as a guide for HVAC systems designers, on the distribution of options for the individual parameters, focusing on the lower values for these individual parameters. Such distribution was validated through the use of a genetic algorithm in order to find the optimal values for the individual parameters due to the fact that more low values are selected by the algorithm.

The optimal strategy to get the two individual parameters are different. For MET , the best way is an interface with ten options related to ten human activities. Then, the definition of the activities values is done by choosing the five most important activities in a controlled environment and using the genetic algorithm to find the other five values. It has been shown that this strategy was responsible to reduce considerably the uncertainty on MET . With respect to the thermal resistance of clothing, each option is related to single garments and its CLO values, so that, there is 1024 combinations for the CLO parameter, reducing its uncertainty.

When a parameter is directly measured (without adjustments and adaptations), like T_{ar} , ϕ and V_{ar} , the uncertainty will be low and no analysis nor the use of optimization methods is necessary. However, due to the combination of uncertainty of the parameters, shown in Chapter 6, their accuracy can be decisive on the total PMV error. Great importance should be given to T_{ar} measurement process, as it has a high influence on two highly predominant factors (T_{ar} and T_{rm}). The uncertainty analysis has also shown that when the hypotheses that T_{rm} is equal to T_{ar} , the proposed PMV sensor is capable to evaluate the PMV index in environments where the difference between the two temperatures are up to 2°C. Otherwise, T_{rm} should be measured due to the fact that in this case, PMV measurement uncertainty is up to 0.4239 and then, the proposed PMV sensor is capable to evaluate the PMV index.

Results have shown that the proposed PMV sensor can be used in a thermal comfort control system, as a source of PMV index. If the control strategy uses a switching device to modify the state of the HVAC system control actuator and it is capable to maintain the PMV index around zero, the T_{rm} sensor must be used to improve the overall accuracy. Then, the unavoidable error due to the switching device should be limited by the difference between the maximum error on PMV calculated value (0.42) and the maximum value around zero for PMV to the neutrality sensation range (from -0.5 to 0.5). However, assuming a built environment where the difference between the temperatures is within 2°C, if the control strategy modify continuously the capacity of the actuator, and then, it is capable to maintain the PMV index on the zero target, the use of T_{rm} sensor will not be necessary. In this case, if the controller leads the PMV index to zero, the real PMV index of the built environmental will be between -0.5 and 0.5, considering all the uncertainties on the PMV value.

In order to make possible the use of the PMV index in actual applications and to be commercially viable, simpler equipment could be required. In this way, a PMV-based-Comfort-Region Controller, which measures only indoor air temperature and relative humidity, has been tested. Experimental results have shown that this controller is able to provide thermal comfort to the room occupants since air temperature is kept within a comfort temperature band, calculated by using measured relative humidity and estimated individual parameters. Those results have been contrasted against values read from two PMV Sensor prototypes developed in this work. The first equipment has been configured to measure the six Fanger's model parameters, while the other considered the hypotheses, proposed in this work, i.e., $T_{rm} = T_{ar}$ and a user-defined air velocity. The PMV Sensor signals have shown the thermal comfort conditions have always been guaranteed to the occupants. The results validate not only the PMV-based-Comfort-Region Controller, but also the proposed PMV Sensor.

References

- Ari, S., I. A. Cosden, E. H. Khalifa, J. Dannenhoffer, C. Isik e P.J. Wilcoxon (2005). Constrained fuzzy logic approximation for indoor comfort and energy optimization. In: *Proc. of the 24th International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS 2005)*. pp. 500–504.
- ASHRAE (1981). *Standard 55-1981 - Thermal Environment Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE. Atlanta, GA.
- ASHRAE (1993). *ASHRAE Fundamentals, chap. 8*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, GA.
- Atmaca, I., O. Kaynakli e A. Yigit (2007). Effects of radiant temperature on thermal comfort. *Building and Environment* **42**, 3210–3220.
- Barbosa, R. M. e N. Mendes (2008). Combined simulation of central hvac systems with a whole-building hygrothermal model. *Energy and Buildings* **40**, 276–288.
- Beck, James V. e Kenneth J. Arnold (1977). *Parameter Estimation in Engineering and Science*.
- Bin, Y. e S. C. Sekhar (2006). Three-dimensional numerical simulation of a hybrid fresh air and recirculated air diffuser for decoupled ventilation strategy. *Building and Environment* **42**(5), 1975–1982.
- Calvino, F., M. Gennusa, G. Rizzo e G. Scaccianoce (2004). The control of indoor thermal comfort conditions: Introducing a fuzzy adaptive controller. *Energy and Buildings* **36**, 97–102.
- Donaisky, Emerson, G. H. C. Oliveira, R. Z. Freire e Nathan Mendes (2007). Pmv-based predictive algorithms for controlling thermal comfort in building plants. In: *Proc. of 16th IEEE Conference on Control Applications (CCA'07)*. Suntec City, Singapore.
- Duarte, M. A. V. e J. R. F. Arruda (1993). Updating rotor - bearing finite element models using experimental frequency response functions. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* **XV**(2), 136–149.
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort - Analysis and Applications in Environmental Engineering*. McGraw-Hill Inc.. New York, USA.
- Fanger, P. O. (1972). *Thermal Comfort - Analysis and Applications in Environmental Engineering*. McGraw-Hill Inc.. New York, USA.
- Fang, L., G. Clausen e P. O. Fanger (1998). Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality. *Indoor Air* **8**(2), 80–90.

- Fisk, W. J. e A. H. Rosenfeld (1997). Estimates of improved productivity and health from better indoor environments. *Indoor Air* **7**(3), 158–172.
- Freire, R. Z., G. H. C. Oliveira e N. Mendes (2005). Thermal comfort based predictive controllers for building heating systems. In: *Proc. of the 16th IFAC World Congress (IFAC'05)*. Prague, Czech Republic.
- Freire, R. Z., G. H. C. Oliveira e N. Mendes (2008). Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings. *Energy and Buildings* **40**, 1353–1365.
- Gagge, A. P., A. P. Fobelets e L. G. Berlund (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions* **92**, 709–731.
- Gan, G. (2001). Analysis of mean radiant temperature and thermal comfort. *Building Service Engineering* **22**(2), 95–101.
- Gouda, M. M., S. Danaher e C. P. Underwood (2001). Thermal comfort based fuzzy logic controller. *Building Serv. Eng. Res. Technol.* **22**(4), 237–253.
- Hamdi, M. e G. Lachiver (1998). A fuzzy control system based on the human sensation of thermal comfort. In: *Proc. of IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. United States. pp. 487–492.
- Hamdi, M., G. Lachiver e F. Michaud (1999). A new predictive thermal sensation index of human response. *Energy and Buildings* **29**, 167–178.
- Hardy, H. B., J. W. Ballou e O. C. Wetmore (1953). The prediction of equilibrium thermal comfort from physical data on fabrics. *Textile Research Journal* **23**(1), 1–10.
- Holmes, M. J. e J. N. Hacker (2007). Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century. *Energy and Buildings* **39**, 802–814.
- Humphreys, M. A. e J. F. Nicol (2002). The validity of iso-pmv for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings* **34**, 667–684.
- Kang, J., Y. Kim, H. King, J. Jeong e S. Park (1997). Comfort sensing system for indoor environment. In: *Proc. of the 1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators (TRANSDUCERS'97)*. Chicago, USA. pp. 311–314.
- Karjalainen, S. e O. Koistinen (2007). User problems with individual temperature control in offices. *Building and Environment* **42**, 2880–2887.
- Kon, A. (1994). Thermal comfort sensor. In: *Proc. of 16th IEEE Instrum. Meas. Tech. Conf. IMTC*. New York. pp. 454–456.
- Lorsch, H. e O. Abdou (1994). The impact of the building indoor environment on occupant productivity-part 2: Effects of temperature. *ASHRAE Transactions* **100**, 895–901.
- Mendes, N., F. C. Winkelmann, R. Lamberts e P. C. Philippi (2003). Moisture effects on conduction loads. *Energy and Buildings* **35**(7), 631–644.
- Salsbury, T. I. (2002). A new pulse modulation adaptive controller (pmac) applied to hvac systems. *Control Engineering Practice* **10**, 1357–1370.

-
- Seppanen, O. e W. J. Fisk (2005). Control of temperature for health and productivity in offices. *ASHRAE Transactions* **111**, 680–686.
- Sherman, M. (1985). A simplified model of thermal comfort. *Energy and Buildings* **8**, 37–50.
- Trebién, Rodrigo, N. Mendes e G. H. C. Oliveira (2007). Análise de sensibilidade do índice pmv e regiões de conforto térmico visando o aperfeiçoamento de controladores para sistemas de climatização. *Revista Ambiente Construído*.
- Yonezawa, K., F. Yamada, Y. Wada e Y. Hanada (2000). Comfort air-conditioning control for building energy-saving. In: *Proc. of the 26th Annual Conference of the IEEE (IECON 2000)*. Vol. 3. pp. 1737–1742.
- Yonezawa, K., S. Sugawara e N. Nishimura (1999). Development of air-conditioning control algorithm for building energy-saving. In: *Proc. of the 1999 IEEE*. USA. pp. 1579–1584.

APPENDIX A – Sistema de Monitoramento e Controle de Climatização (SMCC)

Esta seção descreve o Sistema de Monitoramento e Controle de Climatização, denominado, a partir deste momento, de SMCC. Este sistema foi construído para possibilitar o uso do PMV Sensor para controle de um condicionador de ar do tipo Split e, ainda, o monitoramento dos parâmetros ambientais.

Porém, esta ferramenta pode ser integrada com outros sensores e atuadores compatíveis. O SMCC é implementado em LabVIEW versão 7.1, da National Instruments.

A.1 Módulos

Faz parte do SMCC, a própria aplicação desenvolvida em LabVIEW 7.1, um PC e uma placa de aquisição, como visto na Figura A.1. Considera-se que os sensores, atuadores e o ambiente a ser climatizado, como elementos externos ao sistema.

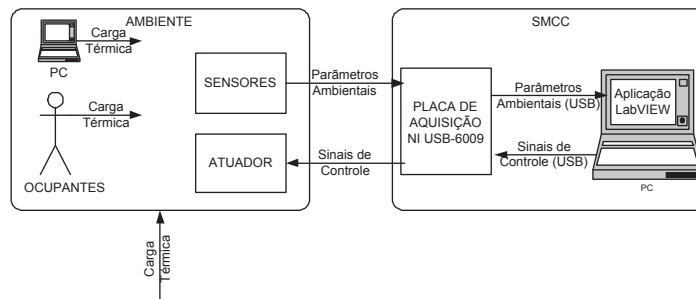


Figura A.1: SMCC - Diagrama de Blocos

Na Figura A.2 é possível observar a interface da aplicação LabVIEW, detalhada na Seção A.3. Na Figura A.3, é apresentado o Diagrama de Blocos da Aplicação Lab View.

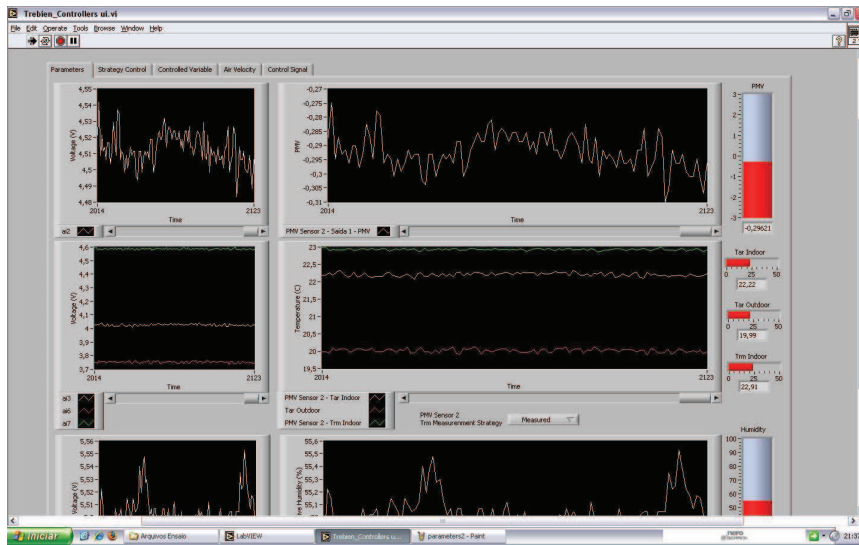


Figura A.2: SMCC - Interface em LabVIEW

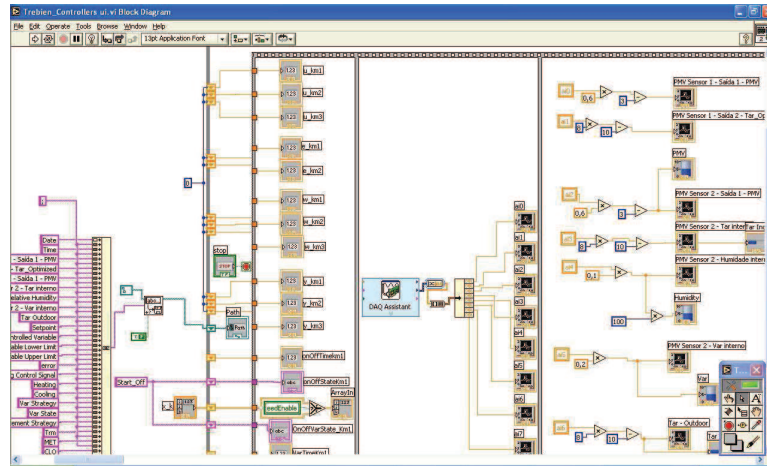


Figura A.3: SMCC - Diagrama de Blocos LabVIEW

O SMCC utiliza a placa de aquisição NI USB-6009 (8 Inputs, 14bit, Multifunction I\O), conforme verificado na Figura A.4. Este modelo foi escolhido, pois possui pequenas dimensões e uma conexão com o PC através de uma interface USB. Desta forma, é possível uma fácil instalação do sistema em diferentes ambientes, inclusive notebooks. Apesar desta portabilidade, a placa possui o número de entradas e saídas analógicas e, ainda, o número de saída digitais, apropriadas para o monitoramento e controle de um sistema de climatização. As conexões analógicas e digitais são descritas na Seção A.2.



Figura A.4: SMCC - Placa de aquisição NI USB-6009

A.2 Conexões

Para o funcionamento do SMCC, deve-se realizar algumas conexões entre os sensores, a placa de aquisição NI USB-6009 e o condicionador de ar, como visto na Tabela A.1. Pode-se observar que todas as entradas se referem às ligações entre a placa de aquisição NI USB-6009 e os sensores e, que todas as saídas, se referem às ligações entre a placa de aquisição NI USB-6009 e o condicionador de ar.

Tabela A.1: Conexões entre os sensores, placa de aquisição NI USB-6009 e o condicionador de ar

Sinal	Pino	Direção	Tipo	Dispositivo
PMV Simplificado-Interno	AI0	Input	Analógico	Sensores
$T_{ar-Optimized}$ -Interno	AI1			
PMV Completo-Interno	AI2			
T_{ar} -Interno	AI3			
ϕ -Interno	AI4			
V_{ar} -Interno	AI5			
T_{ar} -Externo	AI6			
T_{rm} -Interno	AI7			
Compressor-Control Signal	AO0	Output	Digital	Condicionador de ar
Compressor-Heating	P0.0			
Compressor-Cooling	P0.1			
Fan-Low Speed	P0.2			
Fan-Moderate Speed	P0.3			
Fan-Swing	P0.4			

Com relação às entradas, algumas ligações são obrigatórias para o funcionamento do controle (de acordo com a estratégia de controle escolhida), enquanto outras são utilizadas apenas para o monitoramento dos parâmetros. Com relação às saídas, deve-se utilizar a saída AO0 para compressores variáveis ou as saídas P0.0 e P0.1 para compressores ON-OFF (funções aquecer e resfriar, respectivamente).

A.3 Interface

Esta seção mostra, detalhadamente, as interfaces do SMCC e, portanto, as principais funcionalidades. Conforme verificado na Figura A.2, a interface é dividida em cinco abas principais, representando os cinco principais grupos de funcionalidades. Cada uma destas abas será mostrada nas próximas cinco seções.

A.3.1 Parâmetros

A aba "Parameters" possibilita monitorar os principais parâmetros em um sistema de climatização, à saber, PMV (completo) interno, temperatura do ar, temperatura radiante média e umidade relativa do ambiente climatizado e, ainda, a temperatura do ar externo, como visto na Figura A.5. A velocidade do ar não é mostrada nesta aba, pois existe uma aba específica para este parâmetro (ver Seção A.3.4).

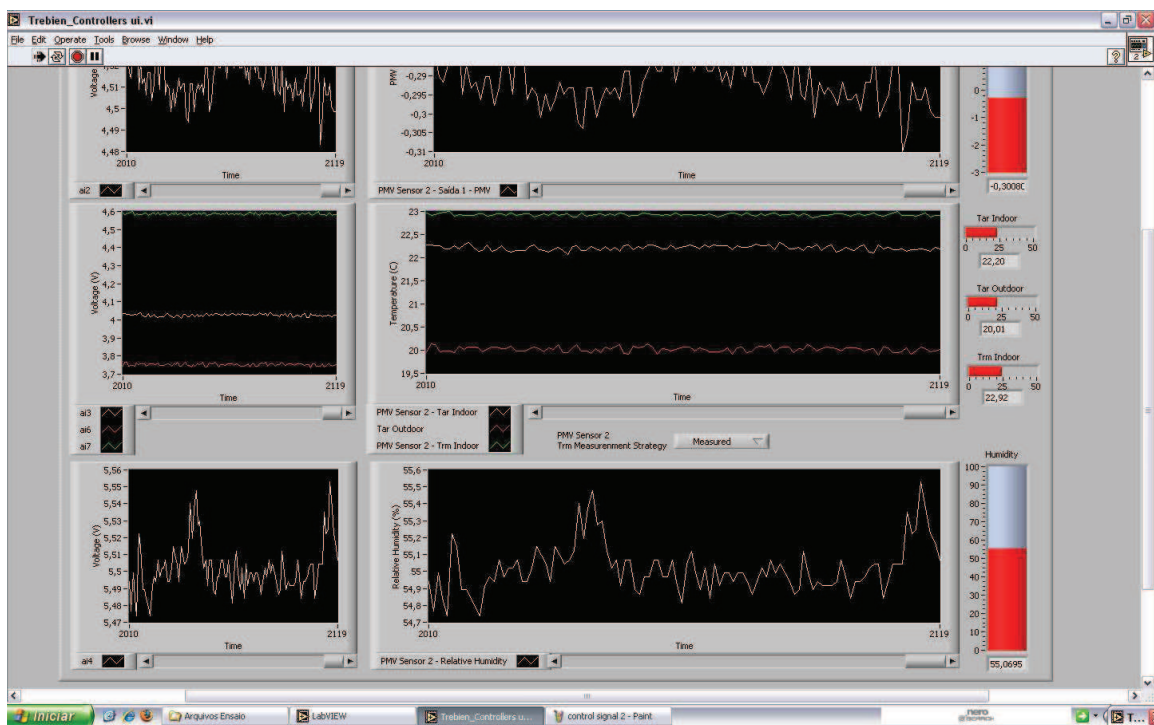


Figura A.5: SMCC - Interface para monitoramento dos parâmetros

O PMV mostrado nesta aba é o PMV completo, pois é estimado através no sensoriamento da temperatura radiante média e da velocidade do ar. Este parâmetro e a umidade relativa são mostrados em um gráficos separados. As três temperaturas monitoradas (interna, externa e radiante média) são mostradas no mesmo gráfico, para facilitar as análises. Conforme verificado na Figura A.5, à esquerda dos três gráficos que mostram

os parâmetros, existem gráficos que mostram a tensão do sensor do respectivo parâmetro. Logo à direita dos gráficos dos parâmetros, existe um mostrador de nível e um display digital, informando o valor instantâneo de cada parâmetro.

A.3.2 Estratégia de Controle

A aba "Strategy Control" possibilita selecionar o tipo de controlador, como visto na Figura A.6. Esta escolha ocorre selecionando a aba que possui o nome correspondente ao controlador ("ON\OFF", "PI", "PID", "RTS", "EED" ou "PID ED"). Neste caso, abre-se a aba para a configuração do controlador.

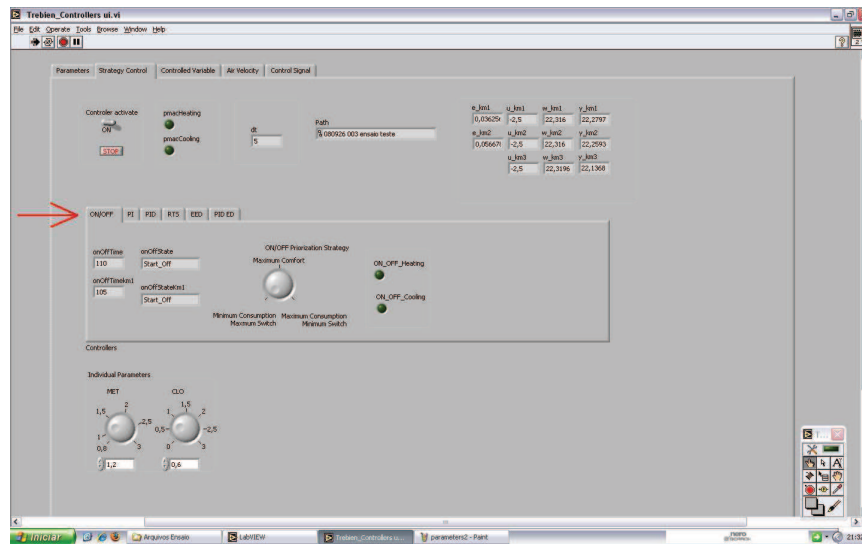


Figura A.6: SMCC - Interface para estratégia de controle

Nesta aba também existem alguns comandos gerais do SMCC, como uma chave liga-desliga, indicador digital do período de amostragem e caminho onde será armazenado o arquivo (.csv) contendo todas as informações do ensaio (ver Figura A.7). Nesta aba também é possível indicar os parâmetros individuais (MET e CLO) que está sendo considerado no PMV Sensor (Figura A.8), para que estes valores possam ser armazenados no arquivo do ensaio.

Com relação ao controlador ON\OFF, a aba "ON\OFF" mostra as informações da máquina de estados do controlador ON\OFF, dois leds indicando o estado do compressor (aquecendo ou resfriando) e, ainda, um seletor da priorização para a mudança dos estados do controlador (Figura A.9). Pode-se priorizar um consumo mínimo, porém, com um maior número de chaveamentos ou a minimização do chaveamento, porém, com um aumento no consumo do controlador. Pode-se ainda priorizar o conforto térmico. Neste caso, ocorrerá um nível médio de consumo e chaveamento.

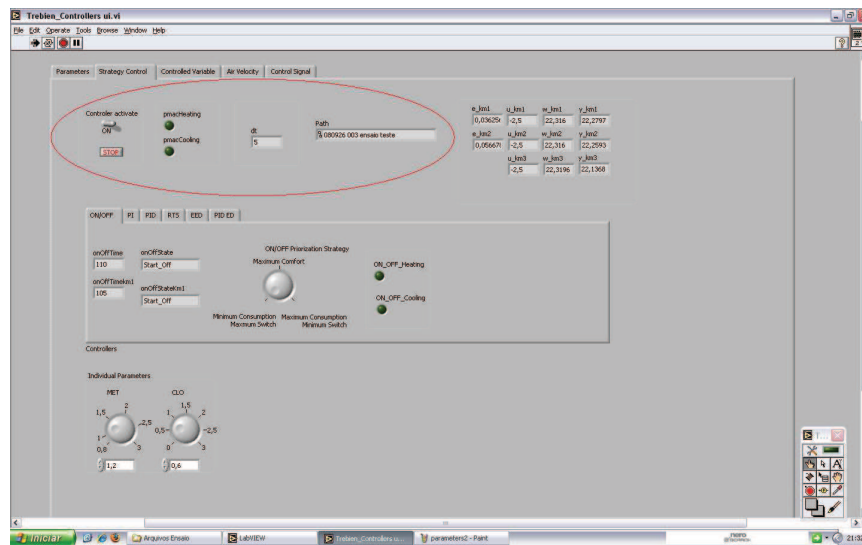


Figura A.7: SMCC - Comandos gerais do SMCC

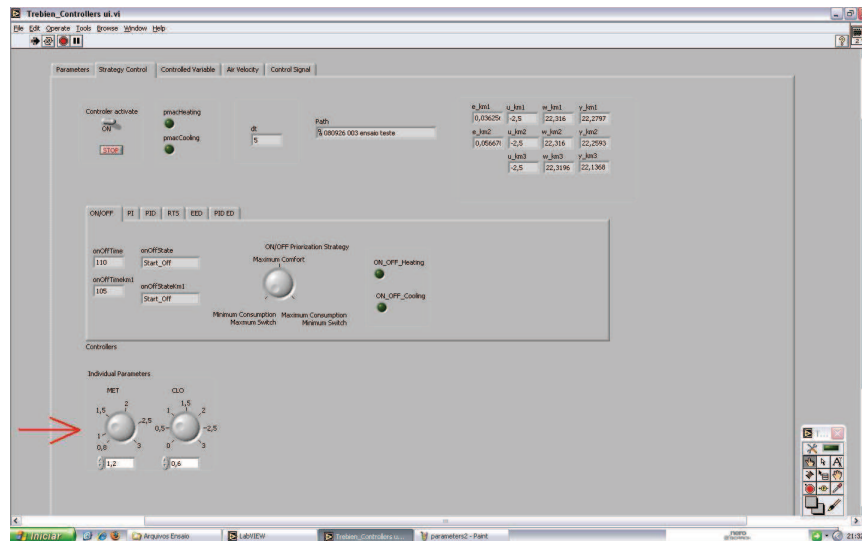


Figura A.8: SMCC - Configuração dos Parâmetros Individuais

A.3.3 Variável de Controle

A aba "Control Variable" possibilita selecionar a variável de controle, dentre três opções, conforme visto na Figura A.10. Primeiramente, pode-se optar pela temperatura do ar como variável de controle, clicando na aba "Air Temperature". Também é possível optar pelo PMV interno, clicando na aba "PMV". Finalmente pode-se optar pela Controle através de regiões de conforto, clicando-se na aba "Comfort Region". O SMCC foi elaborado de forma que qualquer uma das opções, para variável de controle, funcione com qualquer um dos seis tipos de controladores, descritos na seção A.3.2.

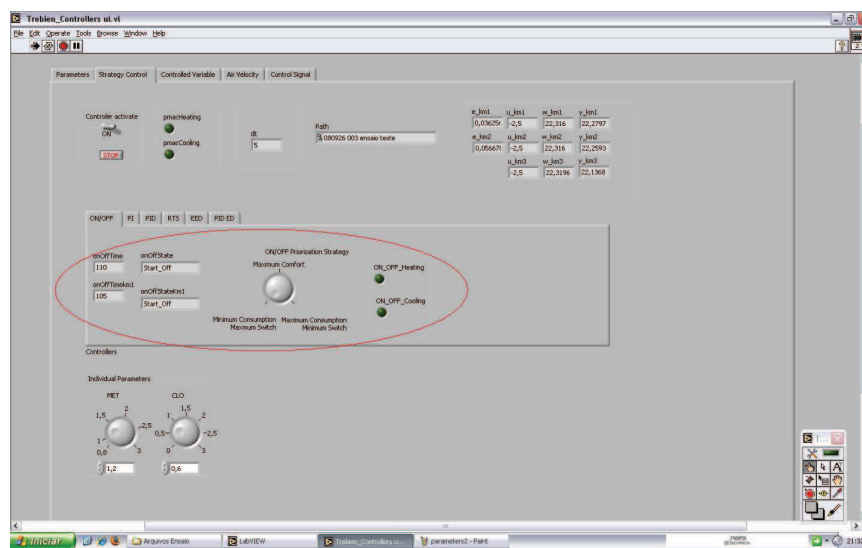


Figura A.9: SMCC - Configurações do controlador ON\OFF

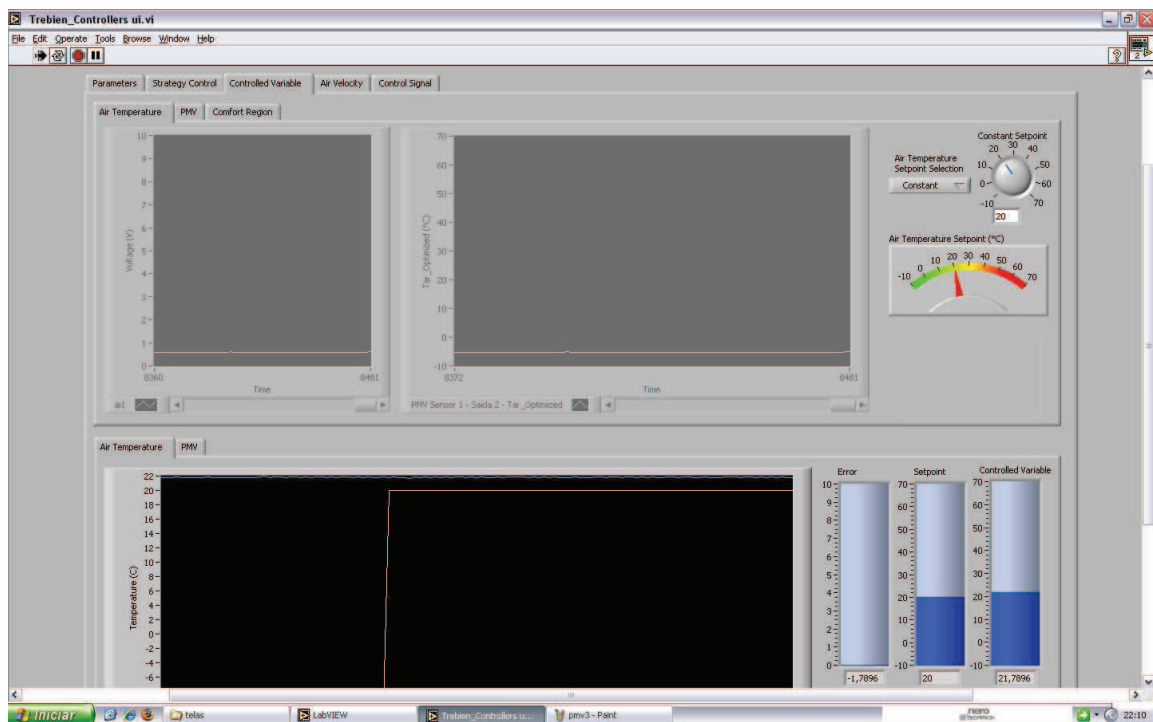


Figura A.10: SMCC - Interface para seleção da variável de controle

A.3.4 Velocidade do Ar

A aba "Air Velocity" possibilita monitorar a velocidade do ar do ambiente climatizado e, ainda, controlar a velocidade do condicionador de ar utilizado para a climatização. A possibilidade de atuar no sistema de ventilação do condicionador de ar é o motivo para este parâmetro ser apresentado em uma aba própria, ao contrário dos demais parâmetros que são apresentados na aba "Parameters", conforme mencionado na seção A.3.1.

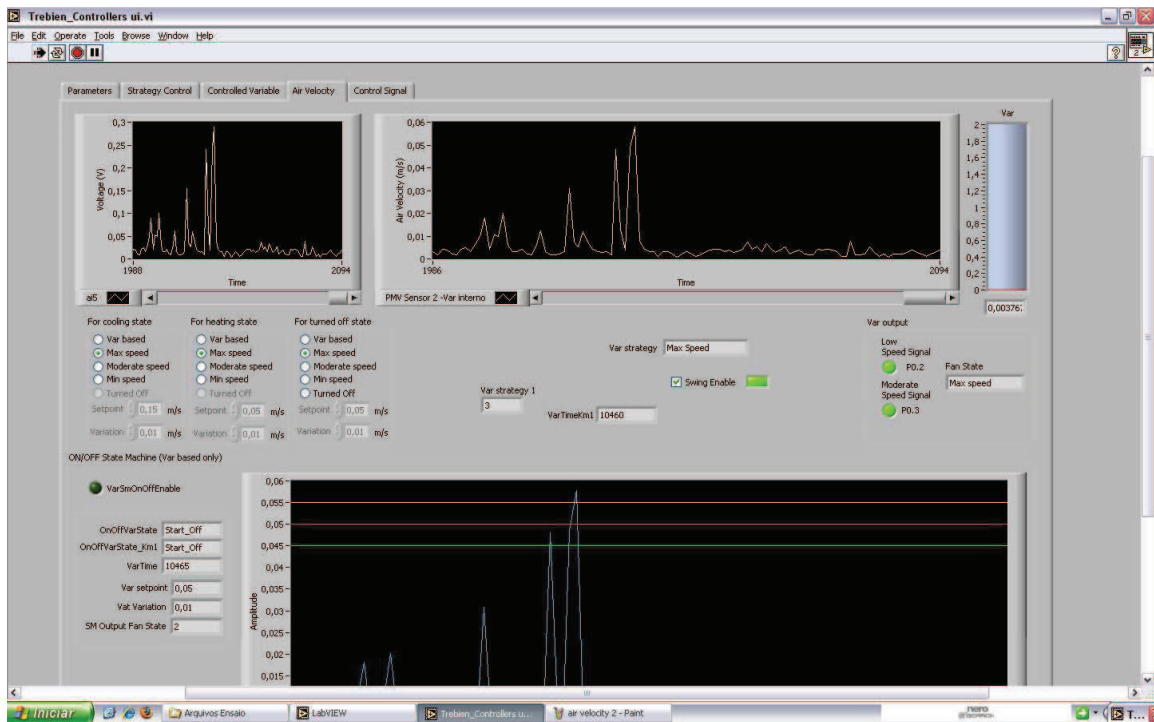


Figura A.11: SMCC - Interface para monitoramento da velocidade do ar e para controle do dispositivo de ventilação do condicionador de ar

Nesta interface, é possível monitor a velocidade do ar. Os gráficos da tensão do sensor de velocidade do ar e do próprio parâmetro, seguem o padrão dos demais parâmetros, como visto na Figura A.12. O valor instantâneo da velocidade do ar é mostrado em um gráfico de nível e um display digital (Figura A.13).

Na Figura A.14, pode-se observar três conjuntos de opções para configuração do ventilador do condicionador de ar. Os dois primeiros conjuntos têm a finalidade de configurar o ventilador quando o compressor do condicionador de ar estiver nos modos de resfriamento ou aquecimento, respectivamente. Nestes casos, pode-se optar pelo controle automatizado, baseado na própria velocidade do ar do ambiente ou ainda pela velocidade máxima, média ou mínima. Nestes casos, pelo fato do compressor estar ligado, não é possível optar pelo desligamento do ventilador. O terceiro conjunto de opções, configura o ventilador do condicionador de ar, para o caso do compressor do condicionador de ar estar desligado. Neste caso, além das opções descritas anteriormente, pode-se optar pelo desligamento do dispositivo de ventilação.

Na Figura A.15 pode-se verificar o check-box para habilitar a função swing, responsável por uma maior distribuição do ar que sai do condicionador de ar. Na Figura A.16, pode-se verificar a presença de dois leds, que indicam se o ventilador do condicionador de ar está na velocidade baixa (led "Low Speed Signal" fica aceso), velocidade

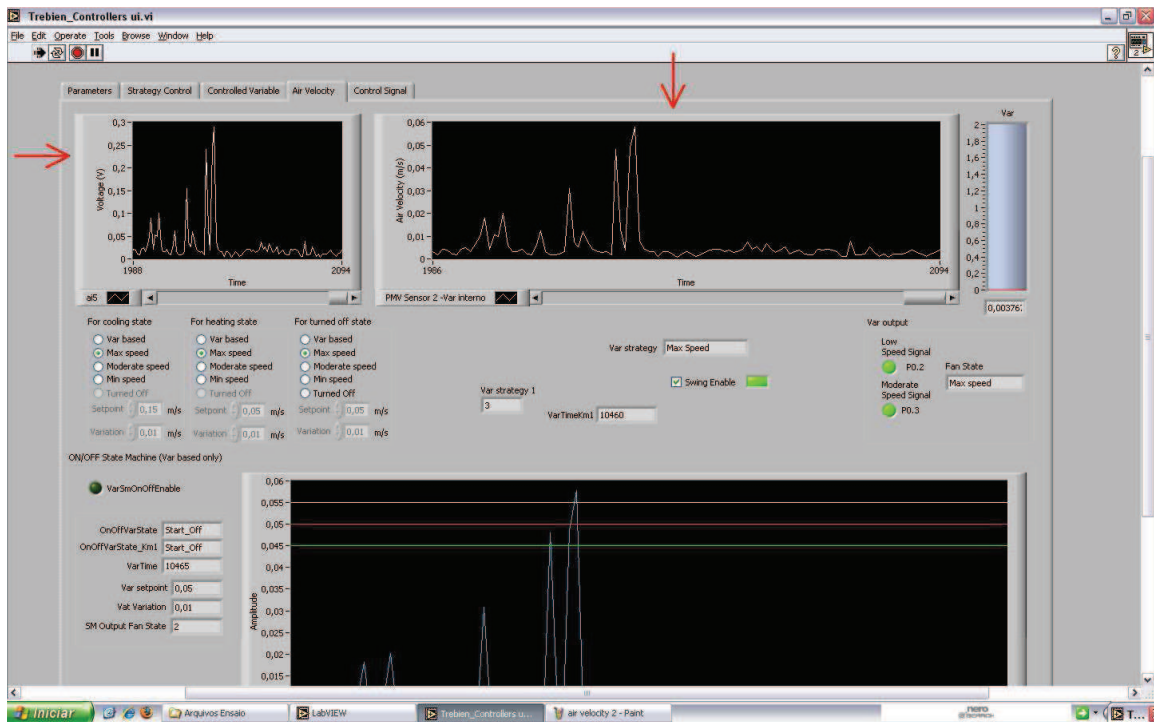


Figura A.12: SMCC - Interface para monitoramento da velocidade do ar do ambiente climatizado

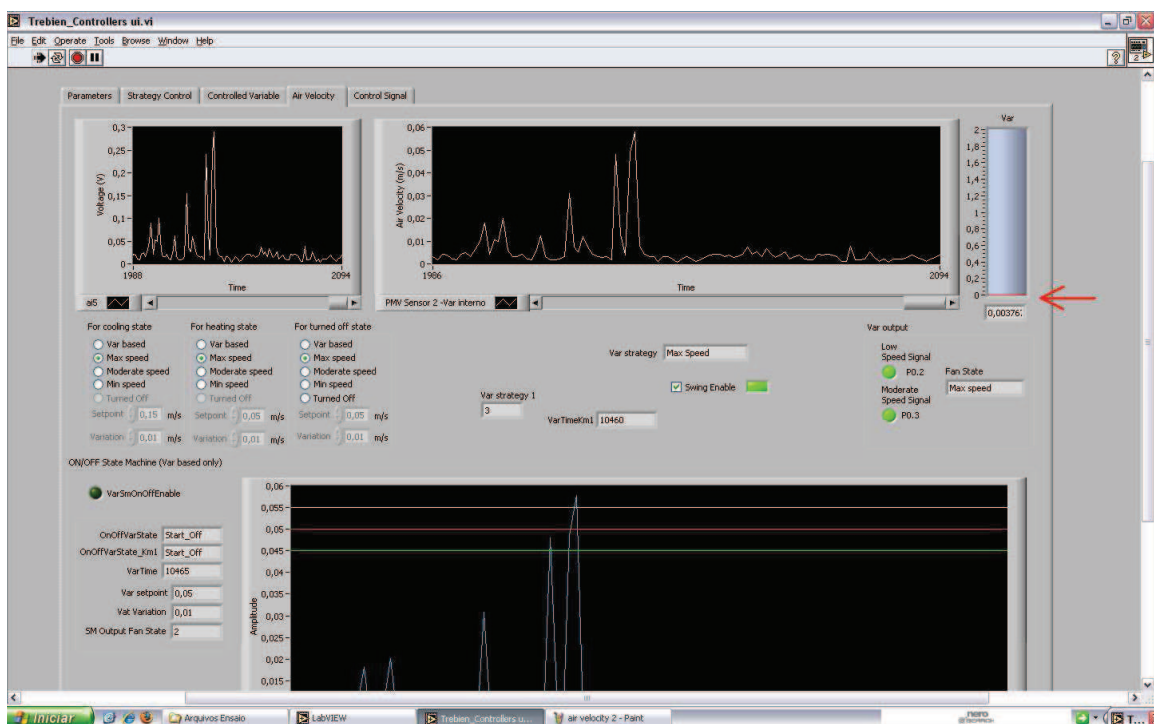


Figura A.13: SMCC - Valor instantâneo da velocidade do ar

média (led "Moderate Speed Signal" fica aceso) e velocidade alta (os dois leds permanecem acesos).

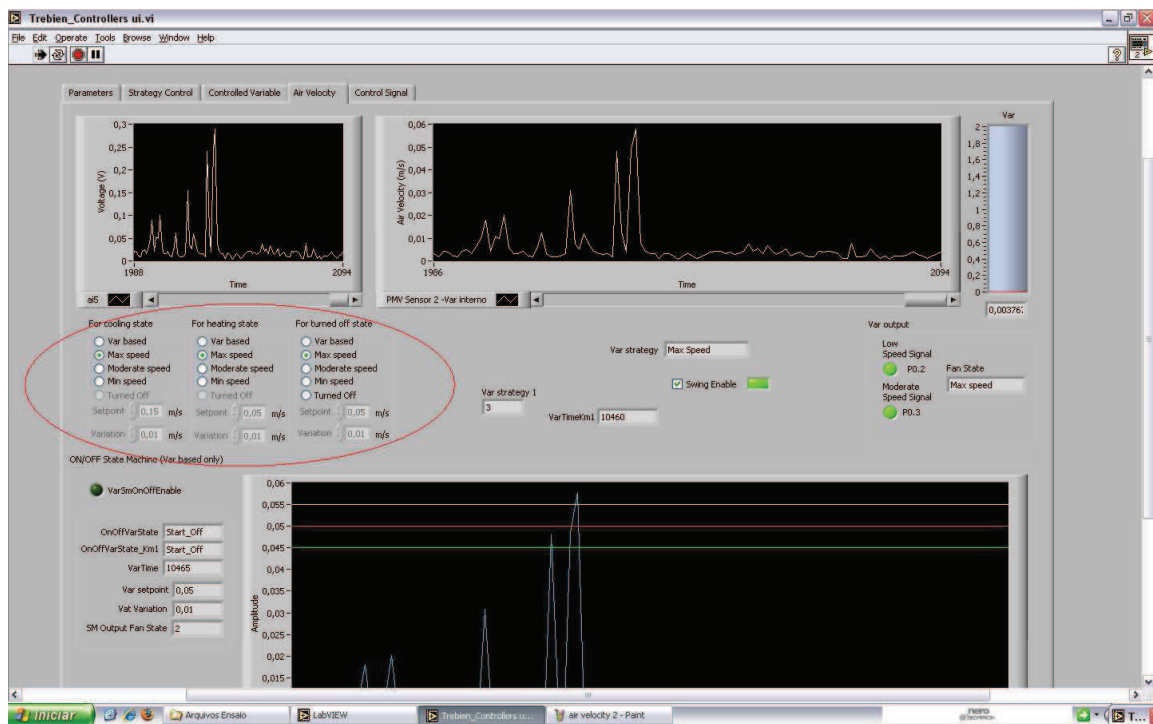


Figura A.14: SMCC - Configuração do ventilador do condicionador de ar

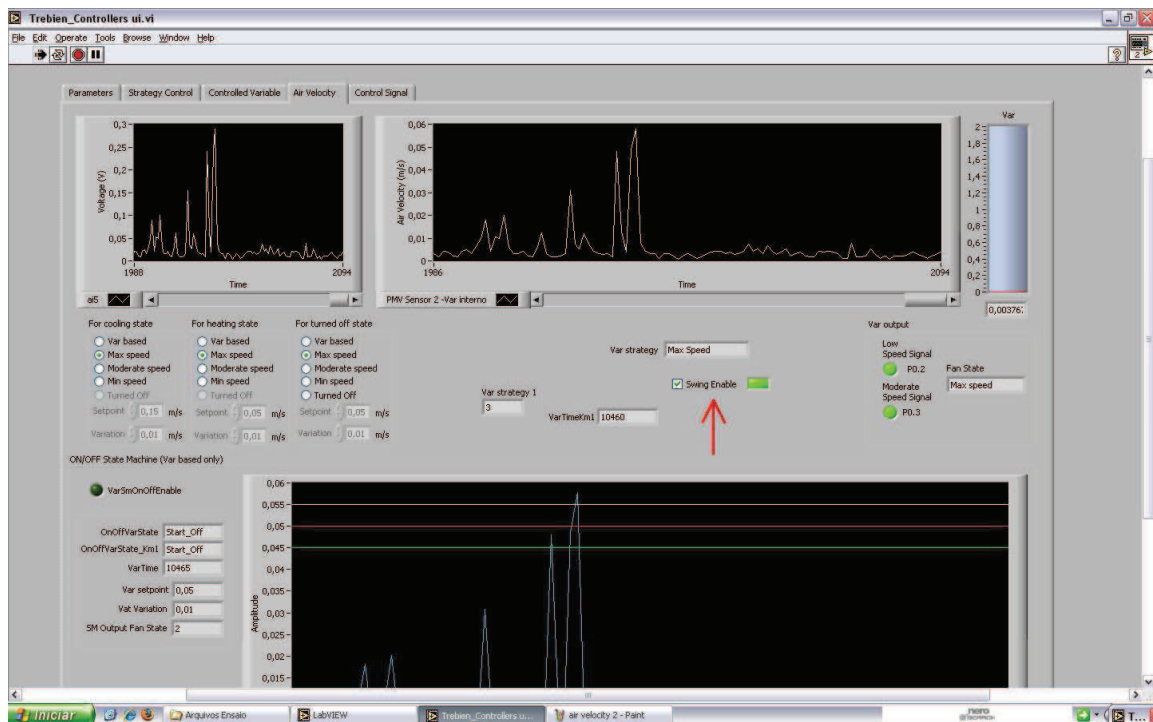


Figura A.15: SMCC - Configuração da função swing para o ventilador do condicionador de ar

A.3.5 Sinal de Controle

Conforme descrito na seção A.2, existem sinais de controle que devem ser conectados na placa de aquisição e no condicionador de ar. A aba "Control Signal" (ver Figura A.17)

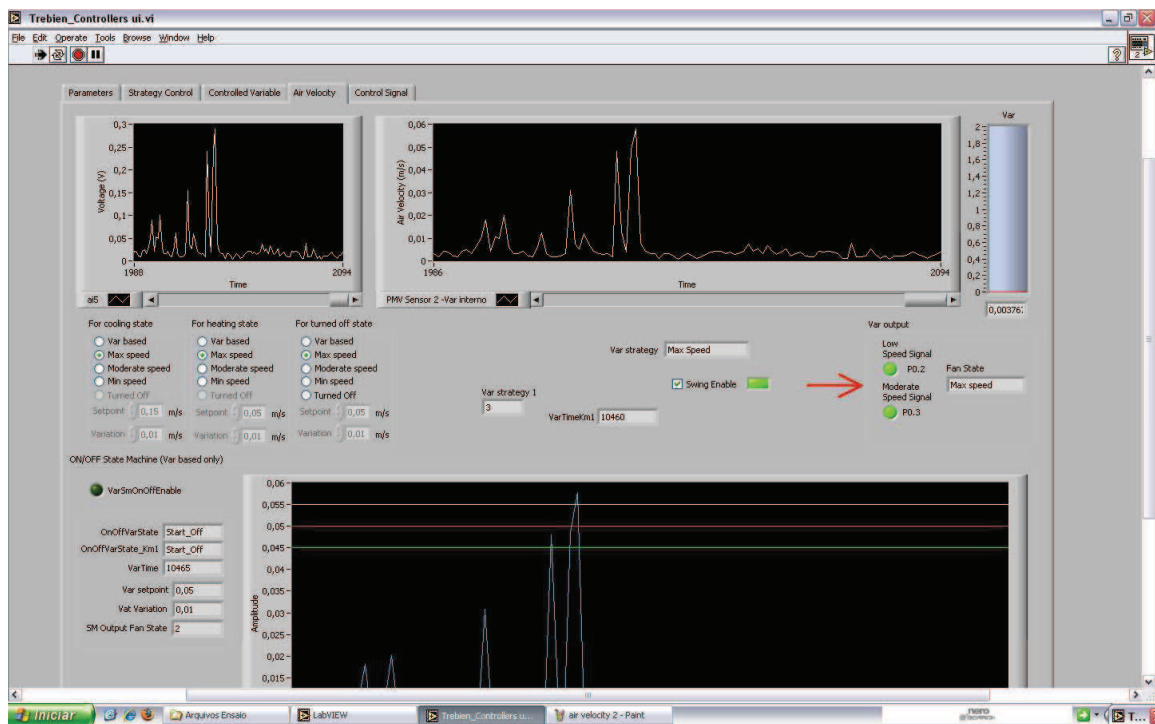


Figura A.16: SMCC - Leds que indicam a velocidade do ventilador do condicionador de ar

permite o monitoramento destes sinais.

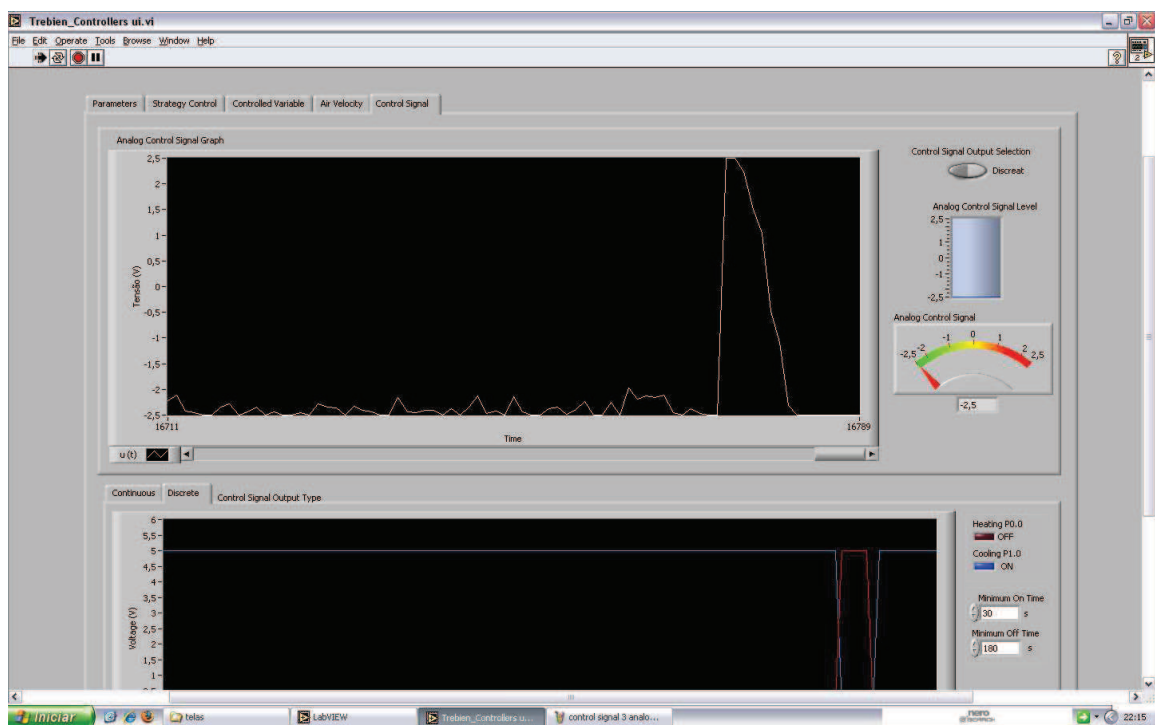


Figura A.17: SMCC - Interface para monitoramento do sinal de controle

O gráfico destacado na Figura A.18 permite monitorar o sinal de controle contínuo,

ou seja, quando não foi escolhido o controlador "ON\OFF" na aba "Strategy Control". Para estes casos, os indicadores e display digital destacados na Figura A.19, permitem monitorar o valor instantâneo do sinal de controle contínuo.

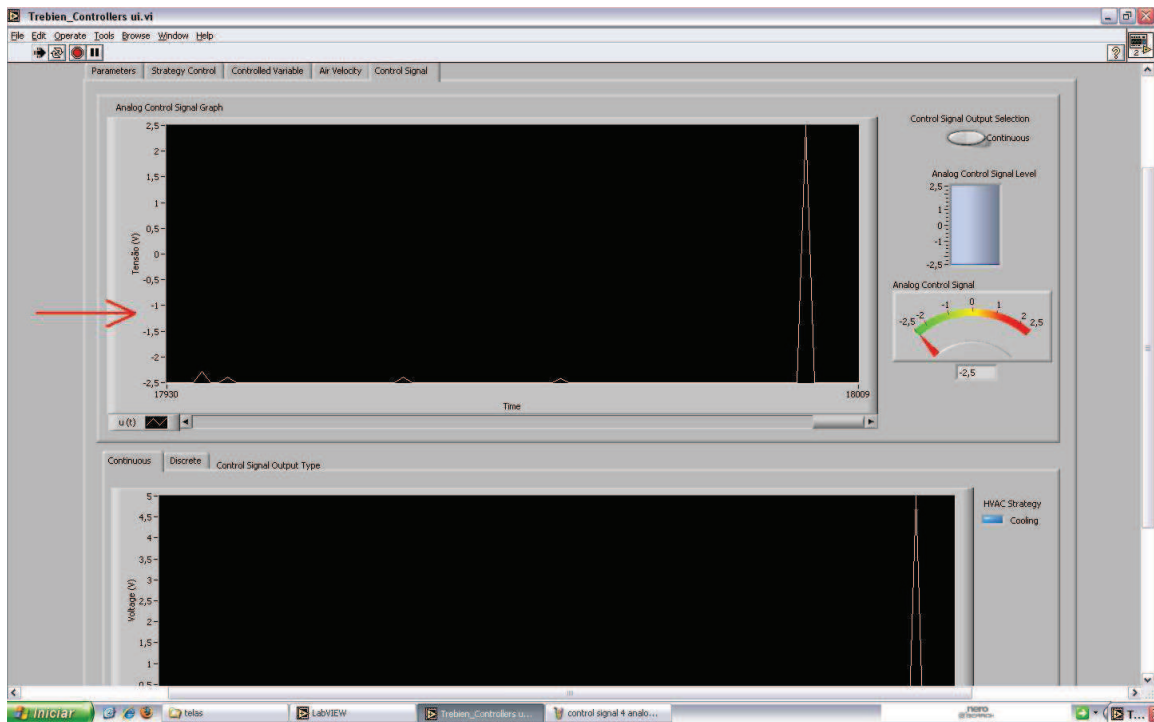


Figura A.18: SMCC - Gráfico para monitoramento do sinal de controle contínuo

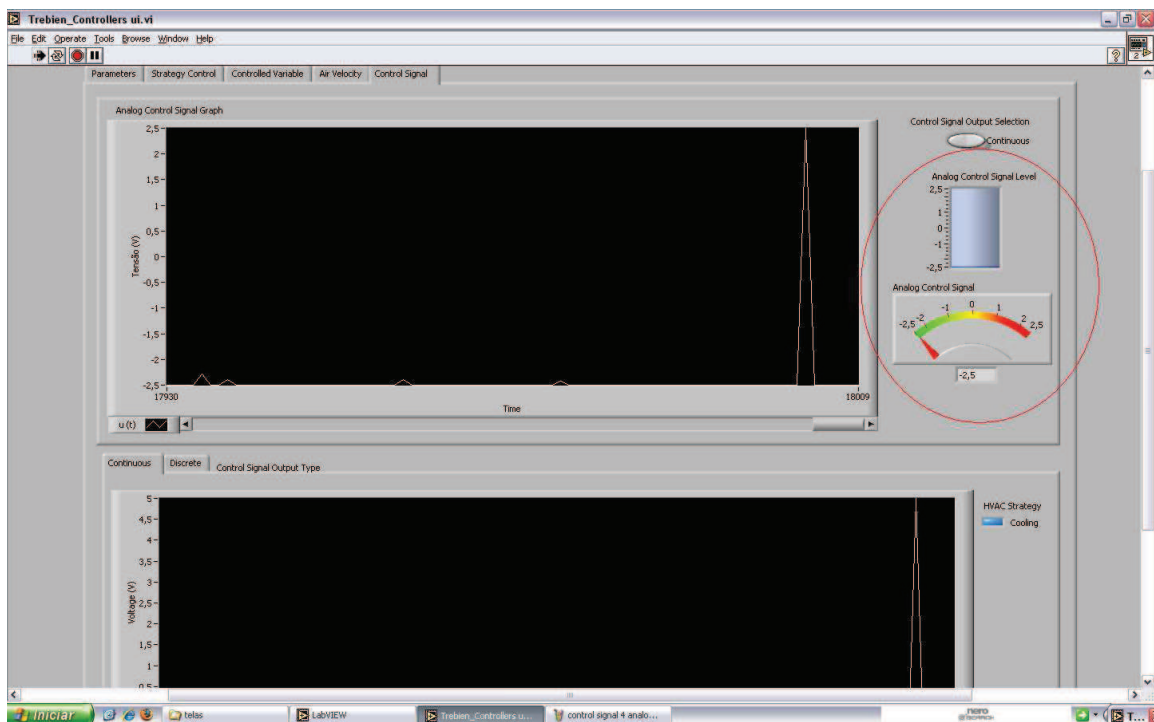


Figura A.19: SMCC - Indicadores e display digital para monitoramento do sinal de controle contínuo

Para os casos onde a saída do controlador é um sinal contínuo e, ainda, o compressor permite um controle contínuo de sua capacidade, um sinal contínuo de tensão é aplicado no pino A00, conforme descrito na Tabela A.1. Neste caso, a aba "Continuous" é habilitada e o gráfico, mostrado na Figura A.20, permite monitorar a tensão aplicada no compressor.

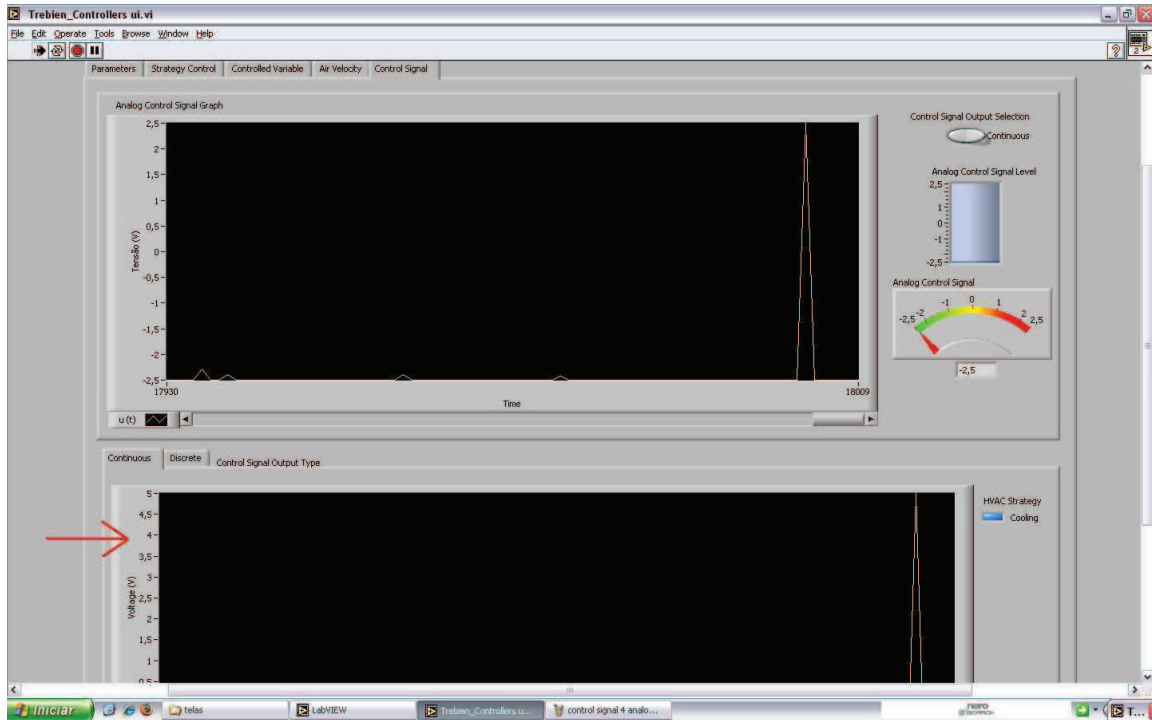


Figura A.20: SMCC - Gráfico da tensão contínua à ser aplicada em um compressor variável (sinal de controle contínuo)

Caso o compressor não permita um controle variável de sua capacidade e a saída do controlador selecionado seja contínuo, deve-se habilitar o dispositivo de conversão de um sinal de controle contínuo em discreto, conforme mostrado na Figura A.21. Neste caso o gráfico da Figura A.18 apresenta o sinal de controle contínuo e o gráfico da Figura A.22 apresenta o sinal discreto à ser aplicado no compressor "ON\OFF", pois a aba "Discrete" é habilitada. Para o caso do controlador "ON\OFF", o sinal de controle contínuo apresentado no gráfico da Figura A.18 deve ser ignorado e a aba "Discrete" é automaticamente selecionada, pois não existe a opção de sinal contínuo para este controlador. Um exemplo de uma técnica que faz a conversão de um sinal de controle contínuo em um pulso de sinais "ON\OFF" é o PMAC, descrita em (Salsbury, 2002).

Na aba "Continuous", além do gráfico que mostra o histórico da tensão analógica que representa o sinal de controle contínuo (Figura A.20), existe um led (ver Figura A.23) que indica se o sinal de controle faz com que o compressor esteja no modo resfriamento (aceso na cor azul) ou aquecimento (aceso na cor vermelha).

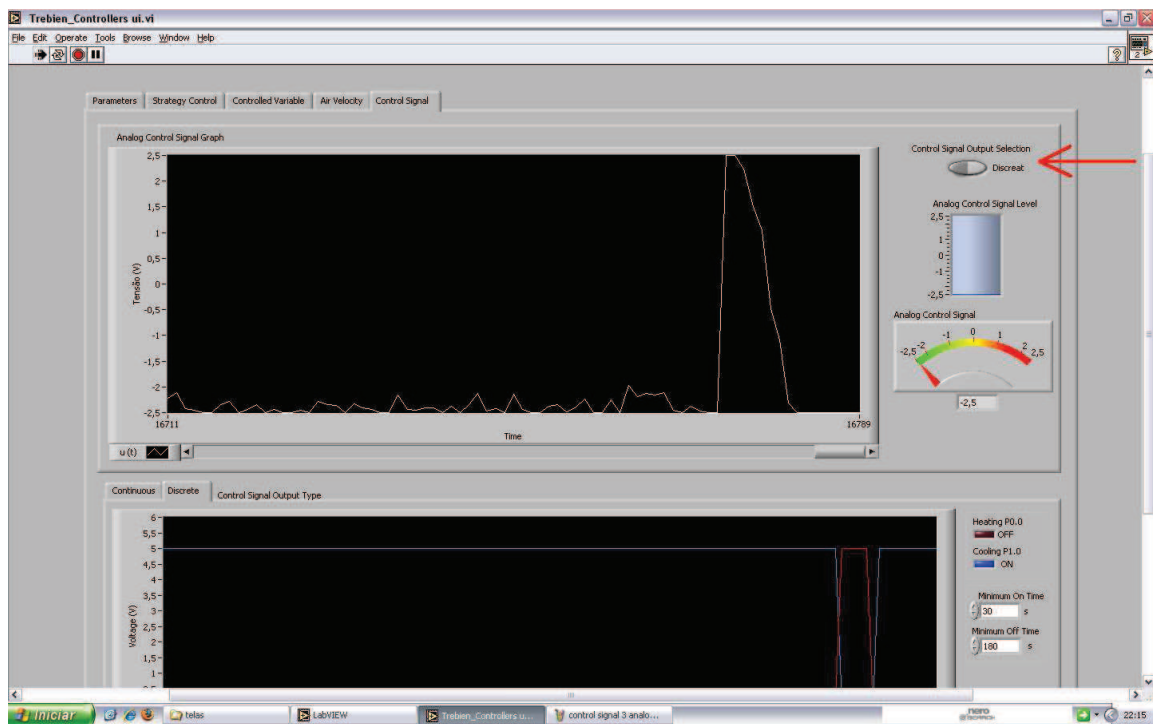


Figura A.21: SMCC - Botão para habilitar a conversão de um sinal de controle analógico em um sinal de controle digital

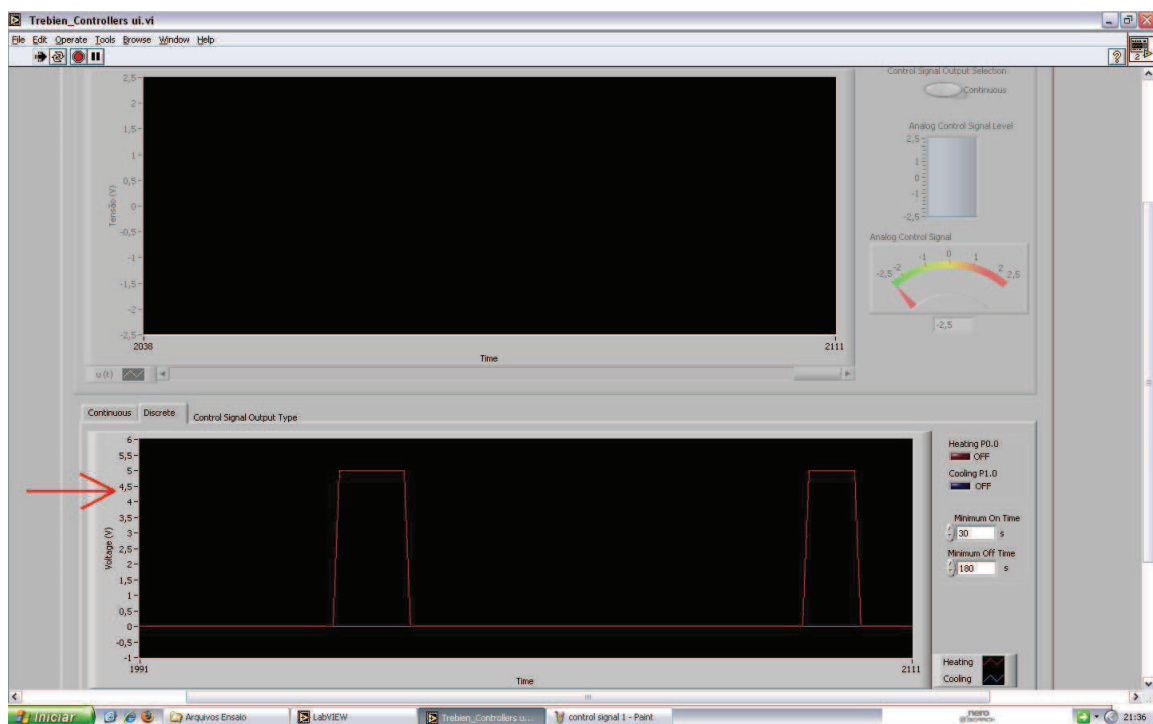


Figura A.22: SMCC - Gráfico da tensão digital à ser aplicada em um compressor "ON\OFF" (sinal de controle discreto)

Na aba "Discrete", além do gráfico que mostra o histórico do sinal discreto de controle, existe um led que indica se o compressor está ligado para o modo resfriamento

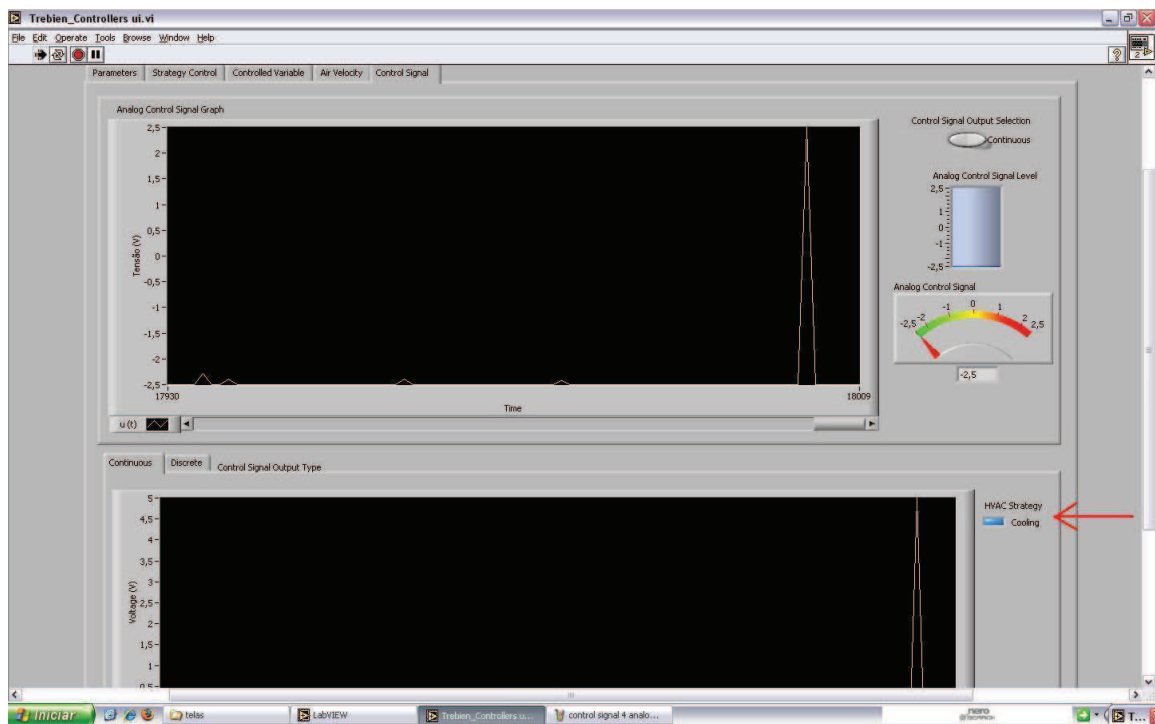


Figura A.23: SMCC - Led que indica se o compressor variável está no ciclo normal (resfriamento) ou reverso (aquecimento)

(Cooling P0.1) e um led que indica se o compressor está ligado no modo aquecimento ("Heating P0.0"), como visto na Figura A.24. Caso o compressor esteja desligado, os dois leds permanecem apagados. Também existem dois campos para que o usuário indique o tempo mínimo que o compressor deve permanecer ligado e desligado, de acordo com sua especificação técnica (ver Figura A.24).

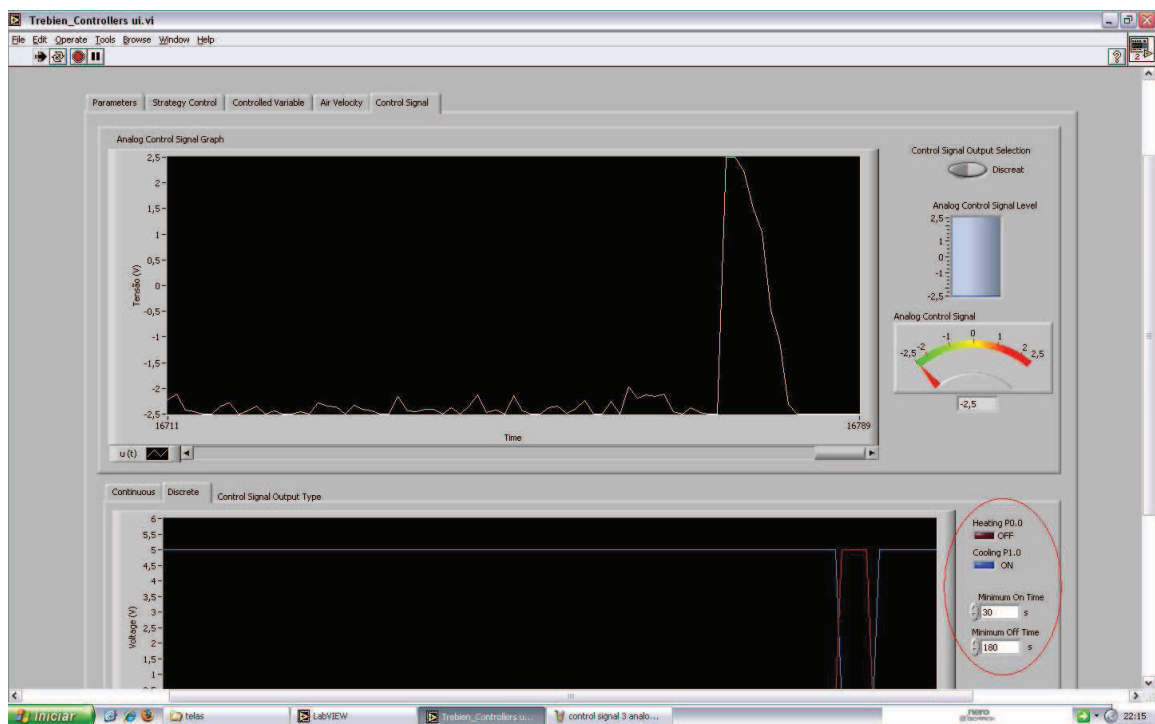


Figura A.24: SMCC - Leds que indicam se o compressor "ON\OFF" está funcionando no ciclo normal (resfriamento) ou no ciclo reverso (aquecimento)

APPENDIX B – Análise de Sensibilidade do Índice PMV e Regiões de Conforto Térmico Visando o Aperfeiçoamento de Controladores para Sistemas de Climatização

Artigo publicado na edição especial sobre conforto em edificações, da Revista Ambiente Construído (Trebien *et al.*, 2007).

Sensibilidade do índice PMV e regiões de conforto visando ao aperfeiçoamento de climatizadores

Sensitivity of the PMV index and comfort regions, aiming to improve HVAC systems

Rodrigo Trebien
Nathan Mendes
Gustavo H. C. Oliveira

Resumo

Os sistemas de controle de equipamentos de climatização, com base em índices de conforto térmico, em contraste com abordagens que consideram apenas temperatura e umidade, proporcionam vantagens como melhoria da qualidade térmica dos ambientes. Entre os índices para conforto térmico, a abordagem de Fanger (PMV) tem grande destaque. Porém, a obtenção desse índice em equipamentos reais é bastante problemática, em função da dificuldade de sensoriamento da temperatura radiante média e de determinação de fatores individuais, tais como a taxa de metabolismo humano e a resistência térmica das vestimentas dos ocupantes. Diante dessas dificuldades, ajustes e adaptações devem ser realizados e, conseqüentemente, existem erros devido a esses três parâmetros. Este trabalho propõe uma análise de sensibilidade do PMV com relação às três variáveis citadas, através de simulações. Para cada análise, é investigado o comportamento do índice para diferentes valores de temperatura, velocidade e umidade relativa do ar, e também para diferentes valores do parâmetro em questão. Também é importante a obtenção de uma informação referente ao peso que cada um desses parâmetros possui no modelo, independentemente de unidades e valores analisados. Neste sentido, foi realizada uma análise de sensibilidade baseada no método estatístico de Monte Carlo, não somente dessas três variáveis, mas também dos seis parâmetros do modelo. Como resultado, obtém-se um vetor de sensibilidade cujos valores são adimensionais e independentes de faixas de operação da variável analisada e dos demais parâmetros, obtidos considerando-se todas as possíveis combinações. Analisa-se também a elaboração de regiões de conforto adaptadas, para que estas sejam determinadas considerando-se fatores individuais.

Palavras-chave: Conforto térmico. Regiões de conforto. Análise de sensibilidade. Índice PMV.

Abstract

The HVAC control systems based on thermal comfort indices, in contrast with approaches that consider only temperature and humidity, provide advantages such as the improvement of the thermal quality of the built environment. Among several thermal comfort indices, the Fanger's model (PMV) is of paramount importance. However, the attainment of this index in real equipment is considerably difficult, due to the difficulty of measuring the mean radiant temperature, and determining individual parameters such as the human metabolic rate and the thermal resistance of human clothing. Due to those difficulties, adjustments and adaptations must be carried out and, consequently, there are errors related to these three parameters. This article proposes a sensitivity analysis of PMV, based on those three variables, through simulation. For each analysis, the behaviour of the model is analysed for different values of temperature, air velocity and relative humidity, and also for different values of the analyzed parameter. It is also important to obtain the relative importance of each parameter of Fanger's model, independently of units and analyzed values. Based on the Monte Carlo statistical method, a sensitivity analysis has been conducted, not only for the three cited variables, but also for all six Fanger's model parameters. As a result, a sensitivity vector is presented, whose values are dimensionless and independent of the variables and parameters, considering all possible combinations. Moreover, new comfort regions are presented, considering also individual factors.

Keywords: Thermal comfort. Comfort region. Sensitivity analysis. PMV index.

Rodrigo Trebien
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica do
Paraná
Rua Imaculada Conceição, 1155
Curitiba – PR – Brasil
CEP 80215-901
Tel.: (41) 8803-3217
E-mail: rtrebien@yahoo.com.br

Nathan Mendes
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica do
Paraná
Tel.: (41) 3271-1322
Fax: (41) 3271-1691
E-mail: nathan.mendes@pucpr.br

Gustavo H. C. Oliveira
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção e Sistemas
Pontifícia Universidade Católica do
Paraná
Tel.: (41) 3271-1330
Fax (41) 3271-1333
E-mail: gustavo.oliveira@pucpr.br

Recebido em 02/02/07
Aceito em 10/09/07

Introdução

A criação de um ambiente com conforto térmico ainda é um importante parâmetro nos projetos de edificações. O estabelecimento de conforto térmico em edificações é a principal tarefa dos equipamentos de controle de sistemas de climatização. Como exemplo, se os ambientes de trabalho não oferecerem conforto térmico, o desempenho dos trabalhadores cairá drasticamente (INNOVA, 2005).

Conforto térmico é um conceito de difícil definição. Durante as últimas décadas, um grande número de índices de conforto térmico foi estabelecido, voltado à análise e projeto de sistemas de climatização (ASHRAE, 1993). Porém, o mais disseminado desses índices é o PMV (*Predicted Mean Vote*), proposto em Fanger (1970). Tal índice considera variáveis ambientais e fatores individuais e, quanto mais próximo de zero for o PMV, melhor será a sensação térmica dos ocupantes.

A equação de conforto térmico, derivada por Fanger, é complexa e tende a reproduzir com um bom grau de confiabilidade a sensação de conforto para a maioria das pessoas em ambientes. Para tanto, consideram-se como fatores ambientais a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a umidade e a velocidade do ar. Como fatores individuais, consideram-se o nível de atividade física e a resistência térmica da vestimenta dos ocupantes.

No entanto, apesar das vantagens que se obtêm ao utilizar essa modelagem de conforto, em detrimento de abordagens que incluam apenas temperatura ou ainda a umidade, existe uma dificuldade em se avaliar ou medir tal índice. Sensores para a medição de temperatura radiante média são, em relação a sensores de temperatura ou umidade, difíceis de ser obtidos ou inviáveis de ser incorporados em um sistema de controle de climatização. A temperatura radiante média pode ser estimada a partir da temperatura de um sensor do tipo globo, que deve estar presente no centro do ambiente em questão. Esse procedimento pode ser usado em sistemas experimentais, porém não tem a praticidade necessária para produtos comerciais e aplicações reais, além de prejudicar a qualidade estética dos ambientes. Mesmo que esse sensor estivesse presente no equipamento, na prática, considerando que as temperaturas das superfícies internas são diferentes, a sensação de conforto térmico, com relação à temperatura radiante média, seria diferente para cada posição desse ocupante no ambiente. Tal erro somente seria corrigido se o sensor fosse localizado exatamente na mesma posição do ocupante, a cada instante de tempo, e ainda se o formato do sensor fosse o mesmo do ocupante. Esse cenário é difícil de ser reproduzido, obrigando que algum ajuste sempre tenha que ser realizado. Portanto, a temperatura radiante média, no contexto

do cálculo do PMV, está entre os parâmetros mais difíceis de ser obtidos e está sujeito a grandes erros e incertezas. Uma contribuição a respeito de sensores para conforto térmico é dada em Kon (1994).

O índice de vestimentas em um sistema real é um parâmetro assumido constante ou determinado por um usuário. No entanto, é difícil que este tenha um conhecimento preciso do valor a ser atribuído a esse parâmetro. O usuário sabe a roupa que está usando, mas não conhece seu valor de resistência térmica. Uma melhor solução é fornecer um conjunto de opções com as quais, de acordo com aquela indicada pelo usuário, se alimenta o sistema de controle de condicionamento de ar com um valor correspondente. Um número finito de opções fornecidas para um usuário que pode vestir um número infinito de tipos de vestimentas faz com que um erro esteja presente no sistema. Erros também podem advir do fato de que diferentes integrantes de um ambiente podem vestir (ou certamente vestirão) roupas diferentes. Este último problema pode ser amenizado pelo fato de que, em geral, um ambiente desempenha determinado papel funcional (escritório, dormitório, sala de ginástica, etc.) e, portanto, as pessoas em seu interior tendem a vestir roupas parecidas no sentido da proteção térmica. Porém, apesar de parecidas, as roupas não são iguais, principalmente quando comparadas entre os ocupantes do sexo masculino e do feminino. Assim, algum nível de erro sempre estará presente e deve ser investigado.

O nível de atividade apresenta características semelhantes ao problema descrito para o parâmetro de vestimentas, com o agravante de que esse parâmetro tem uma variação maior de acordo com cada integrante presente no ambiente. Além da possibilidade de os integrantes do ambiente realizarem atividades diferentes em um mesmo momento (o que poderia ser amenizado, uma vez que, em geral, os ambientes têm uma função única), o nível de metabolismo corpóreo dos integrantes pode variar. Assim, pode-se afirmar que esse parâmetro não somente é de difícil obtenção devido à imprecisão (como ocorre com o nível de vestimenta), como é impossível de se obter de forma uniforme para um ambiente que possua mais de um ocupante.

Assim sendo, mesmo quando o índice PMV é determinado, não é possível ter certeza de quão fiel é o valor obtido em relação ao PMV real que o ambiente possui para determinado ocupante.

Nesse sentido, o presente trabalho possui como foco o problema da medição do PMV sob o ponto de vista de aspectos oriundos da dificuldade de obtenção da temperatura radiante média e de determinação dos índices de metabolismo e nível de vestimentas. Conhecendo essas dificuldades, para que se utilize a

estratégia de controle de climatização baseada em PMV, é fundamental conhecer o impacto que as adaptações e ajustes escolhidos causam na avaliação final do índice PMV. Esses resultados são relevantes no desenvolvimento de sensores para a avaliação de conforto térmico baseados em PMV, em particular sensores que trabalhem acoplados com equipamentos de controle de sistemas de climatização, em que um compromisso entre confiabilidade dos resultados e complexidade de montagem do sensor deve ser observado. Abordagens de controle do conforto térmico de ambientes são apresentadas em Freire (2006), Freire *et al.* (2005), Gouda, Danaher e Underwood (2001) e Hamdi e Lachiver (1999).

Assim sendo, é fundamental que se analise diretamente o efeito das incertezas na avaliação do conforto térmico. Em outras palavras, deve-se verificar a influência de variações dos três parâmetros citados da equação do PMV e descobrir como o índice se comporta com relação a essas variações. É possível, então, determinar derivadas do PMV em relação aos parâmetros avaliados. Como o foco da análise desses três parâmetros é a obtenção direta do impacto que os ajustes desses provocam no PMV, para a elaboração de sensores, os resultados obtidos (derivadas parciais) são expressos nas mesmas unidades de cada um dos parâmetros em questão e, para diferentes valores dos parâmetros analisados, dentro dos limites previstos. Também é importante que se apresentem resultados para diferentes valores de outros parâmetros não analisados, como temperatura, velocidade e umidade do ar. O objetivo é proporcionar maior entendimento em torno de assuntos como sensoriamento do conforto térmico e do PMV.

Além da análise dos três parâmetros do modelo que estão mais sujeitos aos erros, para um perfeito entendimento do modelo de Fanger, é importante também uma análise de sensibilidade dos parâmetros, para que se possa observar o peso que cada variável possui na equação do PMV. Dessa forma, pode-se comparar, de forma fácil e direta, quais parâmetros são mais importantes no modelo e para quais o modelo é menos sensível. Para que essa comparação seja possível, deve-se obter como resultado valores correspondentes ao peso de cada parâmetro independentemente da unidade e sem discriminar diferentes valores do parâmetro ou

diferentes faixas dos demais parâmetros não analisados. Apesar da obtenção de um peso único, esse valor deve ser obtido como resultado das influências de todas as combinações dos parâmetros do modelo. Essa análise de sensibilidade é complementar à análise dos parâmetros temperatura radiante média, taxa de metabolismo humano e resistência térmica das vestimentas, além de abranger os seis parâmetros do modelo.

Revisão Bibliográfica

Modelo de Fanger para Conforto Térmico

A medição perfeita do conforto térmico em um ambiente ainda é um problema em aberto. O índice PMV (*Predicted Mean Vote*), adotado pela ISO, utiliza uma escala de sete divisões para a avaliação da sensação térmica, como visto na Tabela 1. Para que o ambiente tenha um conforto térmico, a ISO recomenda que o PMV esteja em $0 \pm 0,5$. O percentual de pessoas que não se sentem confortáveis termicamente é chamado de índice PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*). A relação entre PPD e PMV pode ser vista na Tabela 1.

A sensação térmica é afetada por seis parâmetros. Os parâmetros ambientais são: temperatura do ar; temperatura radiante média; umidade; e velocidade do ar. Os parâmetros individuais são: atividade corpórea; e nível de vestimentas. O índice PMV é calculado levando-se em conta esses seis parâmetros, como mostrado na Equação 1.

$$PMV = \mathfrak{z}(T_{ar}, T_{rm}, \phi, V_{ar}, MET, CLO) \quad (1)$$

onde:

ϕ : Umidade relativa (-);

CLO: Resistência térmica da vestimenta (clo);

MET: Taxa de metabolismo humano (met);

T_{ar} : Temperatura do ar (°C);

T_{rm} : Temperatura radiante média (°C); e

V_{ar} : Velocidade do ar (m/s).

Para a obtenção do índice PMV, a Equação 1 é expandida, abrangendo outros parâmetros, relacionados aos seis citados anteriormente (Equação 2).

$$PMV = \{0,303 \times e^{(-0,036 \times M)} + 0,28\} \times \{(M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6,99 \times (M - W) - p_v]\} - 0,42 \times [(M - W) - 58,15] - [1,7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_v)] - [0,0014 \times M \times (34 - T_{ar})] - \{3,69 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{rm} + 273)^4]\} - [f_{cl} \times h_c \times (T_{cl} - T_{ar})] \quad (2)$$

SENSAÇÃO TÉRMICA	PMV	PPD (%)
Muito quente	+3	100
Quente	+2	75
Pouco quente	+1	25
Neutralidade	0	5
Pouco frio	-1	25
Frio	-2	75
Muito frio	-3	100

Tabela 1 –PMV e PPD para cada uma das sensações térmicas

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028 \times (M - V) - 0,155 \times CLO \times \{3,96 \times 10^{-8} \times [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{ra} + 273)^4] + f_{cl} \times h_c \times (T_{cl} - T_{ra})\} \quad (3)$$

$$h_c = 10,4 \sqrt{V_{ar}} \quad \text{--- para } V_{ar} < 2,6 \text{ m/s} \quad (4)$$

onde:

M: Metabolismo. 1 met = 58,15(Wm⁻²) (Wm⁻²);

W: Trabalho externo – igual a zero para a maioria das atividades (Wm⁻²);

f_{cl}: Razão da área do corpo completamente vestida com relação à área do corpo nu. Se CLO ≤ 0,5:

f_{cl} = (1 + 0,2CLO). Caso contrário: f_{cl} = (1,05 + 0,1CLO) (-);

p_v: Pressão parcial de vapor d'água (kPa);

h_c: Coeficiente de transferência de calor por convecção (Wm⁻²K⁻¹)

T_{cl}: Temperatura da superfície da vestimenta (°C)

Análise do PMV em Relação aos parâmetros T_{RM}, MET e CLO

Nesta seção é abordada a determinação das taxas de variação do PMV em relação aos três parâmetros discutidos na introdução, *i.e.*, T_{rm}, MET e CLO. Essas derivadas foram inspecionadas para três valores de temperatura do ar (17, 22 e 27 °C), dois de umidade relativa (30% e 80%) e de velocidade do ar (0 e 0,2 m/s). Ou seja, é realizada a combinação dessas faixas de operação, chegando-se a 12 combinações para cada uma das três análises de sensibilidade. Em cada combinação, os três parâmetros físicos são tratados como constantes para a geração de uma curva, e o parâmetro analisado (T_{rm}, MET ou CLO) é submetido a uma variação, dentro da faixa proposta.

A análise de sensibilidade de cada parâmetro tem como resultado um gráfico contendo as 12 curvas de variação do PMV com relação ao parâmetro analisado e a determinação da sua taxa de variação.

Em cada gráfico são encontradas 12 combinações de estilos de linhas (3 cores x 2 espessuras x 2 estilos) para as 12 combinações de faixas de operações (3 temperaturas x 2 umidades x 2 velocidades para o ar).

Comportamento do PMV em Relação à Temperatura Radiante Média

Conforme mencionado anteriormente, o parâmetro temperatura radiante média é difícil de ser determinado fora de condições de laboratório. Uma alternativa simples e sem custo é a seleção da temperatura radiante média como sendo igual à temperatura do ar. Caso a temperatura radiante média seja diferente, o índice PMV calculado será diferente daquele que está realmente ocorrendo no ambiente. Nesse sentido, é relevante determinar a taxa de variação do PMV com relação à diferença entre a temperatura radiante e a temperatura do ar. Essa taxa de variação é função das diferentes faixas de operação dos demais parâmetros físicos do ambiente, tais como temperatura, velocidade e umidade do ar.

O gráfico contendo curvas do valor do PMV em função da diferença entre a temperatura radiante média e a temperatura do ar, e para diferentes faixas de operação das condições ambientais, é apresentado na Figura 1.

A Figura 1 mostra que a taxa de variação do PMV em relação ao parâmetro analisado pode ser considerada praticamente constante, mesmo para condições ambientais diferentes (diferentes valores de T_{ar}, V_{ar} e Ø). Para T_{ar} = 18 °C, Ø = 0,3 e V_{ar} = 0,2 m/s, o PMV varia em uma unidade quando a T_{rm} é 8 °C acima da T_{ar}, enquanto o PMV decresce um pouco menos que uma unidade quando a T_{rm} é 8 °C abaixo da T_{ar}. Variações um pouco mais significativas aparecem quando a temperatura do ar é elevada. Mais detalhes podem ser visualizados na Tabela 2.

Na Tabela 2, verifica-se que realmente as derivadas têm valores muito próximos (entre 0,10 e 0,13), mesmo para diferentes valores de T_{ar} , V_{ar} e \varnothing , e para diferentes valores da diferença entre T_{rm} e T_{ar} . Portanto, considerando-se o pior caso, pode-se aproximar o valor da derivada do PMV com relação à diferença entre T_{rm} e T_{ar} como sendo 0,13. Verifica-se na Tabela 2 que não estão presentes os resultados que diferenciam os valores das derivadas para $\varnothing=0,3$ e $\varnothing=0,8$. O motivo é que esses valores diferentes para \varnothing não alteram o valor da derivada e essa discriminação foi retirada da tabela para facilitar a apresentação dos resultados.

Assim sendo, na hipótese de que no cálculo do PMV a temperatura radiante média é igual à temperatura do ar, pode-se considerar que, a cada 7,7 °C de diferença entre a temperatura radiante média real e a temperatura do ar, há um erro de uma unidade entre o PMV real e o PMV calculado. Nota-se também que erros positivos entre as temperaturas implicam erros positivos de PMV,

portanto o PMV real é maior que o calculado (e vice-versa).

Através deste resultado, pode-se concluir sobre a viabilidade de utilização da hipótese simplificadora na construção de um sensor de PMV para fins de sistemas de controle de conforto, muitas vezes necessária devido a restrições operacionais, que a temperatura radiante média é igual à temperatura do ar em ambientes onde os efeitos de troca de calor por radiação com o exterior têm reduzida importância na determinação da carga térmica. Nesse contexto, é desejável que o equipamento de controle determine o nível de potência do sistema de climatização a fim de que o PMV seja nulo. Considerando que valores de PMV na faixa de $\pm 0,5$ ainda são capazes de gerar conforto (ASHRAE, 1993), um equipamento de controle de conforto capaz de manter o PMV (medido no sensor) em zero efetivamente proporcionará conforto no ambiente térmico se a temperatura radiante média estiver em $\pm 3,9$ °C acima ou abaixo da temperatura do ar.

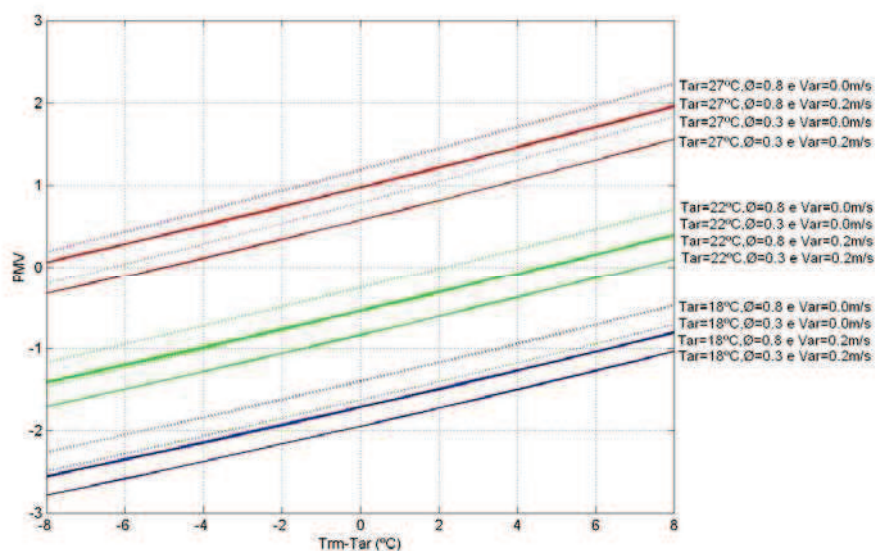


Figura 1 – Valor do PMV em função da diferença entre a temperatura radiante média e a temperatura do ar

Faixas de Valores		Derivadas do PMV em relação à diferença $T_{rm}-T_{ar}$								
T_{ar} (°C)	V_{ar} (m/s)	-8 °C	-6 °C	-4 °C	-2 °C	0 °C	2 °C	4 °C	6 °C	8 °C
18	0,0	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12
	0,2	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12
22	0,0	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	0,2	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
27	0,0	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	0,2	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13

Tabela 2 – Valores da derivada do PMV com relação à diferença $T_{rm}-T_{ar}$

Comportamento do PMV em Relação à Taxa de Metabolismo Humano (MET)

Como descrito anteriormente, o parâmetro MET tem por natureza uma imprecisão e incerteza alta quando aplicado a sistemas reais, e esses fatores são agravados para ambientes que possuam mais de um ocupante. Como algum nível de erro estará presente na obtenção desse parâmetro, é importante uma estimativa do impacto desse erro no valor final do PMV. As curvas de variação do PMV em relação ao MET podem ser vistas na Figura 2.

A Figura 2 indica que a derivada do PMV em relação ao MET não é constante e é maior para valores pequenos de MET. Porém, o gráfico mostra que, apesar de diferente para faixas de valores de MET, essa variação se mantém relativamente constante para as diferentes combinações de faixas de T_{ar} , V_{ar} e Φ . Mais detalhes podem ser vistos na Tabela 3.

Por meio dessa tabela, pode-se comprovar que a derivada é maior para valores pequenos de MET e que, para os mesmos valores de MET, as derivadas tendem a ser parecidas para as 12 curvas, com algumas pequenas variações para valores diferentes de Φ e V_{ar} . As diferentes faixas de operação do parâmetro T_{ar} provocam variações um pouco maiores na derivada do PMV com relação ao MET, com valores maiores da derivada para valores menores de T_{ar} . Ou seja, quando a temperatura do ar for menor, o PMV é mais sensível às mudanças no parâmetro MET do que para T_{ar} maiores, visto que as derivadas decrescem quando T_{ar} cresce.

Essas duas conclusões podem servir de direcionador dos projetos de controle de sistemas de climatização baseados no valor de PMV, nos quais o parâmetro MET deve ser atribuído pelo ocupante do ambiente. Visto que as derivadas parciais do PMV em relação à MET são maiores para valores baixos de MET, especialmente para valores entre 0,8 e 1,05, o PMV estimado terá erros maiores para diferenças no parâmetro MET que ocorram nessa faixa.

Um erro pode ocorrer quando um usuário escolhe uma opção para taxa de metabolismo humano e esta alimenta o sistema com o valor de MET correspondente. Esse erro é causado pela discretização de valores para MET (fornecimento de um grupo de valores de MET na forma de opções de atividades ao invés de o usuário atribuir um valor contínuo para esse parâmetro). Por exemplo, se o ocupante estiver realizando uma atividade com MET=0,95 em um sistema que oferece opções como vistas na Tabela 4, ele

deverá escolher a opção com MET=0,8 ou MET=1,2, ocorrendo um erro para qualquer dessas opções. Quanto menos opções, maiores serão os erros. Pode-se diminuir esse erro fazendo com que haja um maior número de escolhas para atividades com baixo MET do que para valores altos de MET.

Por exemplo, seja um sistema de controle baseado em PMV com um número finito de opções para seleção do MET. Um maior número de opções eleva a complexidade e o custo do sistema, porém um menor número de opções eleva os valores dos erros. Definiu-se, então, um sistema com oito opções para o usuário, que são convertidas em oito valores para o parâmetro MET. Inicialmente, escolhem-se seis opções, como visto na Tabela 4, com intervalos de aproximadamente 0,4 met entre as atividades. O critério usado para a escolha desses seis valores é que se atenda às principais atividades esperadas para um ambiente interno (valores entre 0,8 e 3,0 para MET). Porém, existem outras duas opções. Com as seis opções definidas, após a análise de sensibilidade para o parâmetro MET e a definição que as maiores derivadas encontram-se para valores pequenos de MET, sabe-se que o maior erro ocorreria caso a T_{ar} fosse mais baixa (ex.: 18 °C) e, principalmente, se o usuário estivesse realizando uma atividade com valor de MET entre 0,8 e 1,2. Considerando-se esses fatores, esse pior caso ocorre, por exemplo, quando o ocupante estiver realizando uma atividade que corresponda a um MET de 0,95. Caso o ocupante escolha a opção “Atividade em Escritório (sentado)” (1,2 met), por não encontrar a opção correta, os erros relativo e absoluto para a avaliação do PMV seriam iguais a 52,84% e 1,02.

Caso o ocupante do ambiente escolha a opção “Dormindo”, novamente por não encontrar a opção correta, os erros absoluto e relativo do PMV seriam -1,06 e -54,98%, respectivamente.

Portanto, os erros para o PMV, devido à imprecisão na determinação do parâmetro MET, são maiores que o permitido para o índice, que é de $\pm 0,5$, e tornam o sistema, com esse conjunto de opções, inviável.

Com a adição das duas opções para MET, justamente na faixa de valores que apresentam a maior derivada, poder-se-ia definir, por exemplo, opções para a taxa de metabolismo humano correspondentes a 0,9 met e 1,0 met. Nesse caso, para o mesmo ocupante com uma taxa de metabolismo igual a 0,95, caso escolha a opção referente a 1,0 met, os erros absoluto e relativo seriam de 0,32 e 16,32%, respectivamente. Caso o ocupante escolha a opção que corresponde a

MET=0,9, os erros absoluto e relativo seriam -0,36 e -18,36%. Poderiam também ser escolhidos, para as duas novas opções, os valores 1,0 e 1,4, contemplando também a faixa entre 1,2 e 1,6, que ainda apresenta uma derivada do PMV com relação ao MET elevada.

Esses resultados indicam que um sistema de medição de PMV baseado na seleção de valores discretos de MET tende a ser mais preciso se essa

discretização for feita com mais valores em níveis baixos de MET.

Como os erros causados por imprecisões e incertezas na obtenção do parâmetro MET sempre estarão presentes em sistemas reais, o uso da análise de sensibilidade proporciona melhorias nos projetos dos sistemas para que tais erros, se não eliminados, possam ser reduzidos e façam com que o uso do PMV na estratégia de controle de sistemas de climatização seja viável.

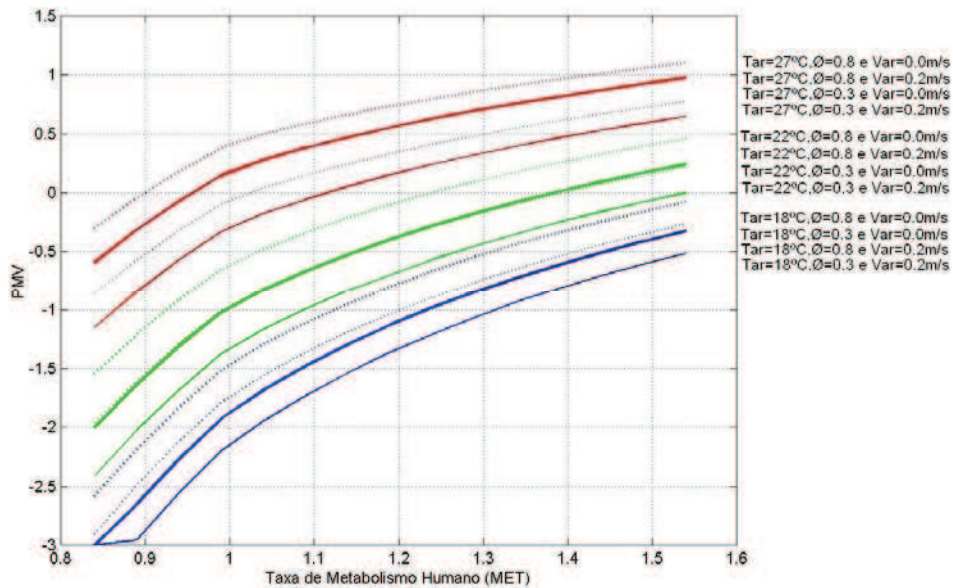


Figura 2 – Valor do PMV em função da taxa metabólica

Faixas de Valores			Derivadas em sete valores para MET						
T _{ar} (°C)	Ø	V _{ar} (m/s)	0,90 (met)	1,00 (met)	1,10 (met)	1,20 (met)	1,30 (met)	1,40 (met)	1,50 (met)
18	0,3	0,0	7,67	5,28	3,59	2,91	2,41	2,02	1,74
		0,2	8,27	5,77	3,98	3,24	2,67	2,23	1,91
	0,8	0,0	7,35	5,02	3,38	2,74	2,27	1,91	1,64
		0,2	7,96	5,51	3,77	3,06	2,53	2,12	1,82
22	0,3	0,0	6,55	4,37	2,85	2,32	1,92	1,63	1,42
		0,2	7,11	4,82	3,22	2,62	2,17	1,83	1,58
	0,8	0,0	6,15	4,04	2,58	2,10	1,75	1,49	1,30
		0,2	6,71	4,49	2,95	2,40	1,99	1,68	1,47
27	0,3	0,0	5,26	3,32	2,00	1,63	1,36	1,17	1,04
		0,2	5,65	3,63	2,26	1,83	1,53	1,31	1,16
	0,8	0,0	4,71	2,87	1,63	1,33	1,12	0,98	0,90
		0,2	5,10	3,19	1,89	1,54	1,29	1,12	1,01

Tabela 3 – Valores da derivada do PMV em relação à Taxa de Metabolismo Humano (MET)

Descrição da Atividade	Valor de MET
Dormindo	0,8
Atividade em escritório (sentado)	1,2
Aula ou a apresentação (em pé)	1,6
Trabalho manual	2,0
Trabalho manual pesado	2,4
Trabalho doméstico leve	2,9

Tabela 4 – Valores de MET

Comportamento do PMV com Relação à Resistência Térmica da Vestimenta (CLO)

O parâmetro relacionado com a resistência térmica da vestimenta (CLO) tem por natureza uma imprecisão e incerteza quando aplicado em sistemas reais, e esses fatores são agravados para ambientes que possuem mais de um ocupante. Como algum nível de erro estará presente na determinação desse parâmetro, é importante a determinação do impacto desse erro no valor final do PMV. A Figura 3 apresenta a sensibilidade do PMV em relação ao parâmetro CLO.

A Figura 3 indica que a derivada do PMV em relação ao parâmetro CLO (ou em relação ao erro entre o CLO real e aquele indicado pelo usuário do sistema) não varia tanto como em relação ao MET. Porém, nota-se que a derivada não é exatamente constante e que pode variar com relação às faixas de operação de T_{ar} , ϕ e V_{ar} . As derivadas da Figura 3 são apresentadas na Figura 4.

Através da Figura 3 e da Figura 4, nota-se que as derivadas do PMV em relação ao CLO crescem com a diminuição do CLO. Esse fato pode auxiliar em projetos de sistemas que se baseiam na determinação do PMV, da mesma forma que foi descrito para a análise do parâmetro MET. Considerando-se essa informação nos projetos, pode-se fornecer para o usuário do sistema mais opções de vestimentas que correspondam a valores baixos de CLO, e assim a redução de erros na obtenção do parâmetro CLO será mais significativa do que adicionar mais opções correspondentes a valores elevados de CLO. A idéia de valores do parâmetro CLO para alguns tipos de vestimentas pode ser obtida com a Tabela 5.

A segunda conclusão é que as derivadas tendem a ser um pouco maiores para V_{ar} maiores, e bem maiores para T_{ar} menores. Isso indica que a equação de Fanger para o PMV é mais sensível às mudanças no nível de vestimentas para temperaturas baixas e para velocidades do ar maiores. Esse fato é consistente com o senso comum, pois, por exemplo, quanto maior o nível de vestimenta de uma pessoa, menos o escoamento de ar atua em seu corpo e, portanto, menos influencia em seu conforto térmico.

As variações na umidade, apesar de terem uma influência no valor do PMV (mesmo que pequenas), como visto na Figura 3, não tiveram influência perceptível nos valores das derivadas do PMV em relação ao CLO. Esse fato pode ser visto pela Figura 4, onde as diferentes faixas de operação de umidade estão sobrepostas.

Como para cada curva da Figura 4, T_{ar} , V_{ar} e ϕ são constantes e o único parâmetro que varia é CLO, o valor positivo da derivada parcial indica que o PMV cresce com o CLO, o que é consistente com a formulação do PMV. Portanto, a terceira conclusão é que o sinal positivo da derivada indica que o PMV calculado para o sistema, com a limitação de sua obtenção, é maior que o PMV real do ambiente, caso o CLO real seja menor que o CLO indicado pelo usuário (ou pelo valor de CLO traduzido a partir da opção indicada pelo usuário). Portanto, o PMV possui um valor maior quanto maior é o nível de vestimenta do ocupante do ambiente, o que é compatível com a teoria do PMV.

A quarta conclusão é que, apesar de diferentes valores para a taxa de variação do PMV em relação ao parâmetro CLO, estes não são elevados, indicando que erros no parâmetro CLO ocasionam erros médios na determinação do PMV. No gráfico da Figura 4, o maior valor encontrado para a derivada (entre os valores obtidos neste experimento) é de 3,39.

Esse fato é importante para a validação do uso do PMV para o controle de sistemas HVAC, pois indica que, se um erro de $\pm 0,5$ em torno do $PMV=0$ é permitido para o PMV, pode-se errar, na pior das hipóteses, no parâmetro CLO em 0,16. Mas essa situação ocorre em faixas de operação não usuais para ambientes fechados, como baixa temperatura e alta velocidade do ar, e, ainda, para uma pessoa presente nesse cenário com um baixo nível de vestimenta. Para os demais casos, mais adequados com a realidade, as derivadas estão entre 1,16 e 2,5, o que permite um erro de 0,43 e 0,2, respectivamente, na determinação do parâmetro CLO.

Resultados baseados no modelo de Fanger (Figuras 1, 2 e 3) mostraram que uma variação em T_{ar} tem uma influência muito maior que aquelas provocadas

por variações nos outros dois parâmetros (V_{ar} e Θ). Assim, as curvas com a mesma faixa de T_{ar} se encontram próximas.

Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de Fanger através do método estatístico de Monte Carlo

Uma vez que há um modelo matemático que expressa o comportamento de um sistema, pode-se utilizar esse modelo como uma espécie de “bancada numérica” capaz de permitir, dentro da faixa em que a validação foi feita, ensaiá-lo nas mais diversas situações, de maneira rápida, econômica e segura.

Nesta seção, faz-se uso dessa possibilidade para realizar a análise de sensibilidade dos seis parâmetros do modelo de Fanger, utilizando-se o método estatístico de Monte Carlo para a obtenção do Vetor de Sensibilidade Adimensional. Este vetor apresenta valores comparativos do peso que cada parâmetro possui no modelo de Fanger, independentemente de unidades, faixas de operação do parâmetro analisado e dos parâmetros não analisados. O peso é determinado, sim, analisando-se a combinação de todos os possíveis valores para os parâmetros.

Metodologia

Denomina-se, genericamente, de método Monte Carlo qualquer procedimento que envolva processos de amostragem, por meio de números aleatórios, para se chegar a soluções aproximadas de um problema físico ou matemático. O processo utilizado aqui para se determinar a sensibilidade do índice PMV (variável dependente) em relação às seis variáveis independentes baseia-se nesse método, que já foi utilizado com sucesso por Duarte (1994). Com ele, pretende-se verificar a quais variáveis independentes do sistema o modelo de Fanger é mais sensível.

O primeiro passo da análise é a obtenção dos limites de cada parâmetro p_j , para os quais o modelo é válido. Em Ashrae (2006), os limites para o parâmetro umidade, para que um desconforto térmico não ocorra, são discutidos. Esses limites foram adotados nesta análise limitada a valores de velocidade de ar de 0,2 m/s, o que é consistente com padrões estipulados pela *ASHRAE STANDARD 55* (1981). Esses valores e aqueles referentes aos demais parâmetros podem ser verificados na Tabela 6. Com relação aos limites para a diferença entre T_{rm} e T_{ar} , adotou-se o maior valor aceitável para que haja conforto em um sistema que mantenha o PMV em 0, *i.e.*, ($|PMV| > 0,5$) e que considere T_{rm} igual a T_{ar} .

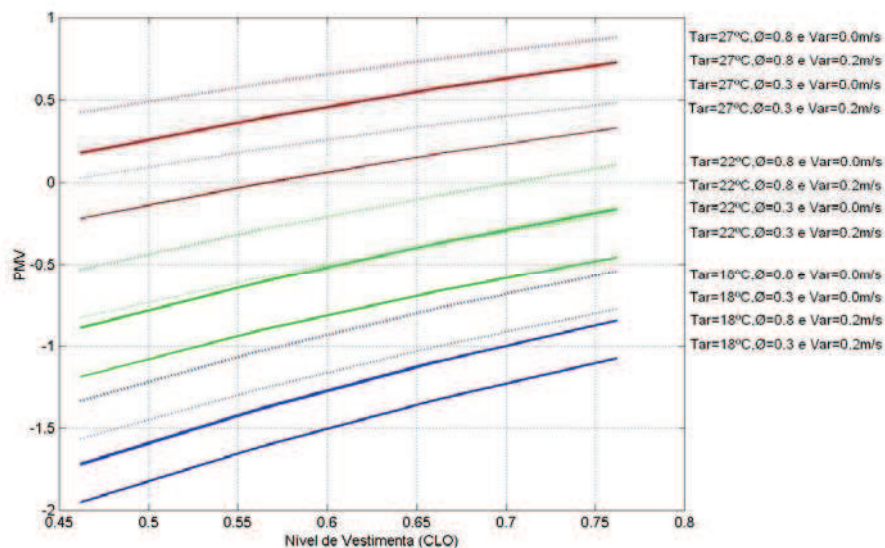


Figura 3 – Valor do PMV em função do parâmetro CLO

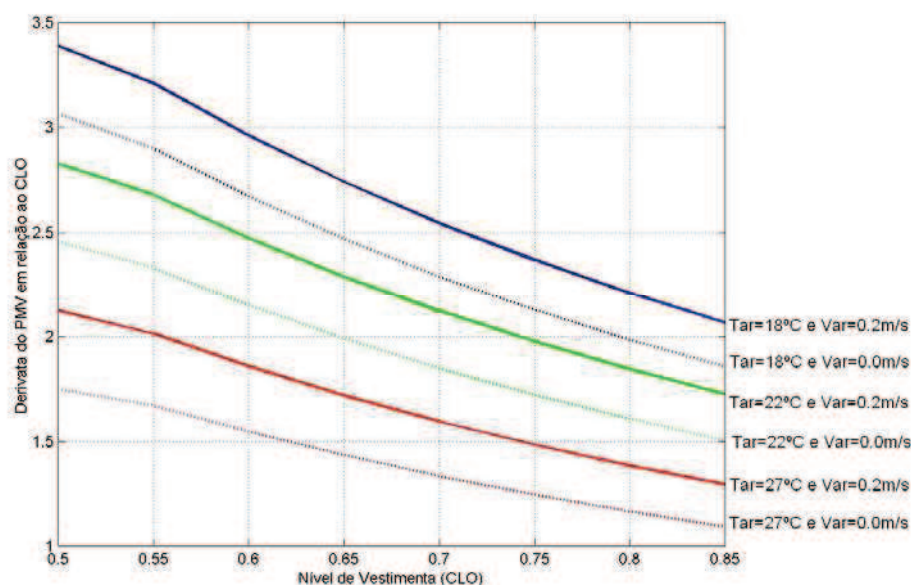


Figura 4 – Derivada do PMV em função do parâmetro CLO para diferentes valores de T_{ar} , \varnothing e V_{ar}

Descrição da Vestimenta	Valor do CLO
Bermuda	0,15
Saia curta + blusa	0,50
Vestido curto	0,50
Macacão de mecânico	0,80
Terno + gravata	1,00
Casaco longo de lã	1,20

Tabela 5 – Valores de CLO

Parâmetro	Limite Inferior	Limite Superior
T_{ar}	18,0 °C	30,0 °C
$T_{rm}-T_{ar}$	-4,0 °C	4,0 °C
\varnothing	30,0%	70,0%
V_{ar}	0,00 m/s	0,20 m/s
MET	0,80 met	3,0 met
CLO	0,30 clo	1,15 clo

Tabela 6 – Limites de cada parâmetro do modelo de Fanger

Com os limites de cada parâmetro definidos, o segundo passo é obter uma matriz de valores aleatórios (v_{ij}). Para essa análise em particular, a matriz possui seis colunas, referentes aos seis parâmetros do modelo de Fanger. Portanto, o índice j varia de 1 a 6. Cada linha corresponde a um conjunto particular de valores para o modelo, atribuídos a cada parâmetro (cada coluna da matriz). A cada nova linha, uma nova combinação dos parâmetros do modelo é obtida, pois todos os parâmetros são alterados. A busca desses valores aleatórios pode ser obtida, com uma distribuição

normal ou uniforme, respeitando-se os limites definidos. Dessa forma, atende-se a uma das motivações dessa análise, que é a possibilidade de comparar a sensibilidade do PMV com relação aos seis parâmetros, considerando-se todas as possíveis combinações desses parâmetros. Sabe-se que é impossível obter todas as combinações, mas pode-se chegar a uma aproximação dessa situação com resultados excelentes. Quanto maior o número de linhas dessa matriz de números aleatórios, maior é a combinação de valores realizada para a determinação da sensibilidade de cada parâmetro.

Portanto, escolheu-se um número elevado de linhas (1.500), fazendo com que o índice i variasse de 1 a 1.500. Para a análise do T_{rm} , serão gerados valores aleatórios para esse parâmetro, de modo que a diferença entre T_{rm} e T_{ar} não passe dos limites vistos na Tabela 6. Dessa forma, evitam-se situações não reais, como T_{ar} igual a 30,0 °C ou T_{rm} igual a 10,0 °C. Mas essa consideração é adotada apenas para a geração de números aleatórios. Esse valor gerado ($T_{rm}-T_{ar}$) é somado a T_{ar} nessa combinação para que se chegue ao valor presente na coluna de T_{rm} . Portanto, para a matriz v_{ij} gerada na coluna referente ao parâmetro T_{rm} , têm-se valores para T_{rm} , e não para $T_{rm}-T_{ar}$.

O terceiro passo é a obtenção dos incrementos que cada valor aleatório irá possuir, para que as derivadas parciais possam ser determinadas. Deve-se obter uma segunda matriz, com o mesmo número de linhas e colunas que a matriz de números aleatórios (1.500x6), pois cada posição dessa matriz corresponde ao incremento que cada um dos valores da matriz de números aleatórios deve possuir. A determinação desse incremento deve ser criteriosa, pois ele deve ser tão pequeno quanto possível (pela teoria da derivada, o incremento deve tender a zero), embora haja limitações devido ao truncamento numérico. Foi utilizada a regra de Brown e Dennis (*apud* DUARTE, 1994), onde $PMV(i)$ é o valor do PMV para os parâmetros da linha i (Equação 5).

$$\Delta v_{ij} = \min \{ \|PMV(i)\|; \delta_j \}, \quad (5)$$

onde:

$$\delta_j = \begin{cases} 10^{-9} & se \|v_{ij}\| \leq 10^{-6} \\ \|v_{ij}\| \times 10^{-3} & se \|v_{ij}\| > 10^{-6} \end{cases}$$

O quarto passo é a obtenção de uma matriz com as derivadas parciais do PMV com relação aos seis parâmetros, para todas as linhas das matrizes v_{ij} e Δ_{ij} . Essa nova matriz tem o mesmo número de linhas e colunas das matrizes obtidas anteriormente, pois ela indica, para cada linha, as derivadas parciais do PMV com relação a cada parâmetro (cada coluna). O cálculo de cada derivada parcial é realizado segundo a Equação 6. O PMV ($i + \Delta_{ij}$) é o PMV calculado com os valores da linha i , com exceção do parâmetro j , que é incrementado com o valor Δ_{ij} .

$$S_{ij} = \frac{\partial PMV}{\partial v_{ij}} = \frac{PMV(i + \Delta_{ij}) - PMV(i)}{\Delta_{ij}} \quad (6)$$

Como mencionado, o objetivo é obter uma análise de sensibilidade independente de unidades ou grandeza. Por esse motivo, o quinto passo é a adimensionalização da matriz de derivadas parciais (S_{ij}), mediante a Equação 7, obtendo-se a matriz SA_{ij} .

$$SA_{ij} = S_{ij} \times \frac{v_{ij}}{PMV(i)} = \frac{\partial PMV}{\partial v_{ij}} \times \frac{v_{ij}}{PMV(i)} \quad (7)$$

A matriz SA_{ij} possui valores das derivadas parciais dos seis parâmetros do modelo de Fanger, de forma adimensional, para as i diferentes combinações desses parâmetros. O último objetivo dessa análise é que os valores de sensibilidade, apesar de considerar as diferentes combinações dos seis parâmetros do modelo de Fanger, sejam apresentados de forma independente dessas combinações ou de faixas de valores específicas. Ou seja, que se obtenha um único “peso” para cada um dos seis parâmetros. Esse requisito é obtido no sexto e último passo do método, somando-se as i linhas de cada um dos j parâmetros da matriz SA_{ij} e obtendo-se o vetor sensibilidade, conforme a Equação 8.

$$Sensibilidade_j = \sum_i SA_{ij} \quad (8)$$

Como visto, a matriz S possui, em cada uma de suas posições, derivadas parciais dependentes das unidades de cada parâmetro. A matriz SA possui valores adimensionais. Já o vetor de sensibilidade possui valores que não podem ser classificados como derivadas, pois foi obtido somando-se as linhas da matriz S . Como SA_{ij} representa derivadas, ao se somarem duas linhas, seria obtida a influência da derivada dessas duas linhas, e não a soma das derivadas. Portanto, a correta análise do vetor de sensibilidade não deve ser feita pelo valor individual de cada uma de suas colunas, mas sim pela comparação dos valores de suas colunas. Cada um de seus valores representa o peso que o parâmetro possui no modelo de Fanger com relação aos demais parâmetros (demais valores das outras colunas). Como os valores do vetor sensibilidade tendem a ser muito grandes, se um número elevado de linhas for utilizado, deve-se ter números elevados, mesmo para um parâmetro de peso pequeno no modelo, em comparação com os demais parâmetros. Para evitar essa falsa impressão, será dividido todo o vetor pelo menor valor do vetor. Dessa forma, o menor peso do vetor será 1,0, e os demais valores representam quantas vezes esses parâmetros são mais influentes no modelo, comparando com esse menor peso.

O segundo passo da metodologia, referente à obtenção da matriz valores aleatórios, indica que esses valores podem ser obtidos a partir de uma distribuição normal ou uniforme. Serão realizadas duas análises, uma utilizando-se a distribuição normal e outra, uma distribuição uniforme, obtendo-se dois vetores de sensibilidade, o que possibilita a comparação dos resultados. A distribuição uniforme tem como limites de cada parâmetro os valores da Tabela 6. A distribuição

normal tem como centro da curva o valor médio dos limites de cada parâmetro (Tabela 6) e o desvio padrão assumido como um terço da diferença entre os limites de cada parâmetro e o centro da curva. Dessa forma, espera-se que 99% dos valores estejam presentes nos limites vistos na Tabela 6.

Resultados

De acordo com a metodologia, realizaram-se os seis passos do método estatístico de Monte Carlo, para análise de sensibilidade do modelo de Fanger. Os coeficientes de sensibilidade, obtidos através do vetor de sensibilidade, para distribuição normal e uniforme, podem ser vistos na Tabela 7.

Nos dois experimentos, verifica-se que o parâmetro com maior peso no modelo de Fanger é T_{ar} , seguido de MET e T_{rm} . Pequenas mudanças nesses valores provocam grandes mudanças no PMV. Nos dois casos, os parâmetros que denotaram menor influência são ϕ e V_{ar} , sendo este último o parâmetro que possui o menor peso no modelo para a faixa analisada. Verifica-se que, apesar dos valores diferentes, para as duas distribuições, a relação de pesos entre os parâmetros é semelhante.

Esses resultados indicam a importância da análise individual realizada para os parâmetros T_{rm} , MET e CLO, pois, além da incerteza na obtenção desses parâmetros, eles possuem um grande peso no modelo. Uma variação pequena nesses parâmetros provoca uma grande mudança no PMV. Então, é importante considerar as informações obtidas no estudo das derivadas parciais desses três parâmetros, como os limites de erros aceitáveis, para que o PMV se mantenha dentro da faixa de conforto, e para quais faixas desses parâmetros o modelo é mais sensível.

Por outro lado, verifica-se que o modelo de Fanger é pouco sensível a V_{ar} . Apesar de não serem necessárias grandes adaptações para a obtenção desse parâmetro (como ocorre para os três parâmetros analisados individualmente), o sensor da V_{ar} pode ser caro. Considerando esse custo e com a informação obtida nessa análise de sensibilidade, pode-se *a priori* simplesmente eliminar o sensoriamento desse parâmetro. Porém, o senso comum é conflitante com o resultado obtido quanto ao peso extremamente pequeno que o parâmetro V_{ar} possui no modelo de Fanger. Esse fato é ainda mais intensificado em países tropicais, onde o uso de um ventilador, que ocasiona um aumento em V_{ar} , pode alterar significativamente a sensação de conforto térmico. Mas em uma análise mais aprofundada, verifica-se que não há conflito entre o sentimento comum e os resultados obtidos.

O que ocorre é que, apesar de muito pequeno o peso para o parâmetro V_{ar} para a faixa analisada, a mudança nesse parâmetro, ao se utilizar um ventilador, é muito grande. Deve-se ainda considerar que a intensidade dessa sensação se deve, principalmente, às experiências para o indivíduo que está presente diretamente no fluxo do ar, onde a mudança do parâmetro V_{ar} é mais acentuada (podendo variar bruscamente).

Contudo, sistemas de climatização devem ser projetados de forma que o escoamento de ar não promova velocidades acima de 0,25 m/s no verão ou de 0,15 m/s no inverno, independentemente dos gradientes espaciais de velocidade presentes no ambiente (ASHRAE, 1981). Essas constatações são também discutidas por Bin e Sekhar (2006), que executaram simulações da dinâmica dos fluidos em ambientes climatizados.

Portanto, para esse cenário, mesmo que o sensoriamento da V_{ar} seja realizado, o controle do PMV não necessariamente usaria essa velocidade máxima, e sim aquela presente no(s) local(ais) monitorado(s). A T_{ar} , ao contrário, possui o maior peso no modelo e, portanto, é capaz de alterar significativamente o índice para pequenas alterações nesse parâmetro. Mas, em geral, esse parâmetro sofre mudanças muito pequenas em seu valor em um curto espaço de tempo, contrariamente ao que ocorre com V_{ar} .

Vale ressaltar ainda que o uso de sistemas de condicionamento de ar provoca uma grande variação espacial não só da velocidade do ar, como também da umidade e, principalmente, da temperatura, que é o parâmetro predominante do modelo de Fanger.

A região de conforto

As cartas psicrométricas são ferramentas muito aplicadas para projetos de climatização, especialmente quando os equipamentos utilizam uma estratégia de controle que considera a região de conforto presente nessas cartas. Porém, essas regiões de conforto são determinadas analisando-se apenas parâmetros físicos do ambiente que determinam o estado termodinâmico do ar. Esse fato é conflitante com a proposição de Fanger para conforto térmico, por não abordar fatores individuais, como taxa de metabolismo humano e resistência térmica da vestimenta dos ocupantes do ambiente (ASHRAE, 1993). Pelas análises de sensibilidade desses dois parâmetros, verificou-se que o PMV poderá assumir valores totalmente diferentes para diferentes valores desses parâmetros individuais. Como consequência, é mais adequado determinar uma região de conforto térmico em função da temperatura e da umidade,

considerando-se adicionalmente parâmetros individuais.

Portanto, regiões de conforto que consideram fatores individuais, como taxa de atividade corpórea e nível de resistência térmica da vestimenta, serão propostas em gráficos temperatura/umidade, os quais podem ser superpostos em cartas psicrométricas. Ou seja, a região de conforto é definida para os pontos cujo conjunto de parâmetros combinados resulte em um $PMV = 0 \pm 0,5$. Adota-se o valor constante 0,01 m/s para a velocidade do ar, que é um valor compatível com ambientes internos sujeitos a um sistema de controle.

A T_{m} será considerada igual a T_{ar} devido à viabilidade dessa simplificação mostrada na análise realizada no capítulo Comportamento do PMV em Relação à Temperatura Radiante Média. Escolheu-se um escritório como cenário para as análises, ou seja, supondo que seja necessária uma estratégia de controle que garanta conforto para esse local. Portanto, são realizadas regiões de conforto para atividades físicas e níveis de vestimentas que se espera encontrar nessa situação. A obtenção de cada região é determinada realizando-se a combinação de valores da T_{ar} e ϕ . Vale lembrar que a variação realizada para a temperatura do ar provoca, para efeito de cálculo do PMV, uma variação na temperatura radiante média.

Quanto às faixas de valores dos parâmetros, restringiu-se ϕ entre 30% e 70%, pois valores de umidade relativa fora dessa faixa provocam desconforto térmico (ASHRAE, 2006). Utilizando essa metodologia, serão realizadas duas análises.

A primeira análise tem como objetivo a obtenção de duas diferentes regiões de conforto para um mesmo nível de atividade física e, portanto, esse parâmetro é mantido constante. O valor da taxa metabólica para atividade em escritório é igual a 1,2 met. Em um escritório, podem estar presentes ocupantes com diferentes tipos de vestimentas. Os casos extremos que se espera encontrar, nesse cenário, são vestimentas com resistência térmica = 0,5 clo e 1,0 clo, que correspondem a tipos de vestimentas vistas na Tabela 5. O gráfico temperatura/umidade proposto, com as duas regiões obtidas nessa análise, pode ser visto na Figura 5.

A segunda análise é realizada para determinado nível de vestimenta constante. O nível escolhido foi 1,0 clo, compatível com um escritório, como visto na Tabela 5. Para este caso são determinadas duas regiões de conforto, para duas diferentes atividades físicas que se esperam encontrar em um escritório. São elas “Atividade em escritório (sentado)” e “Apresentação (em pé)”, que possuem valores de taxa metabólica iguais a 1,2 e 1,6 respectivamente (Tabela 4). O resultado desta análise pode ser verificado na Figura 6.

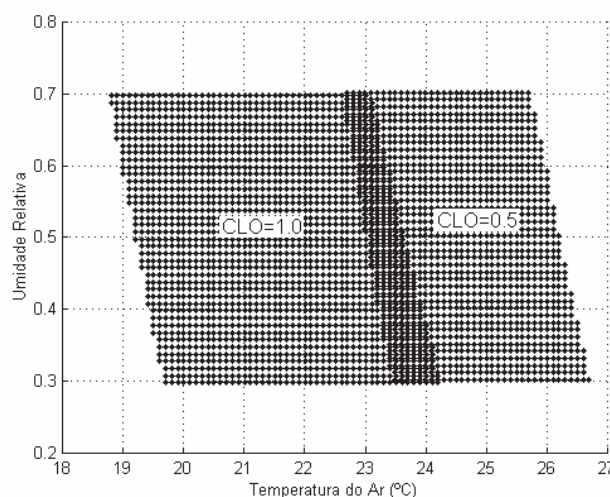


Figura 5 – Regiões de conforto para uma taxa de metabolismo humana (MET)=1,2

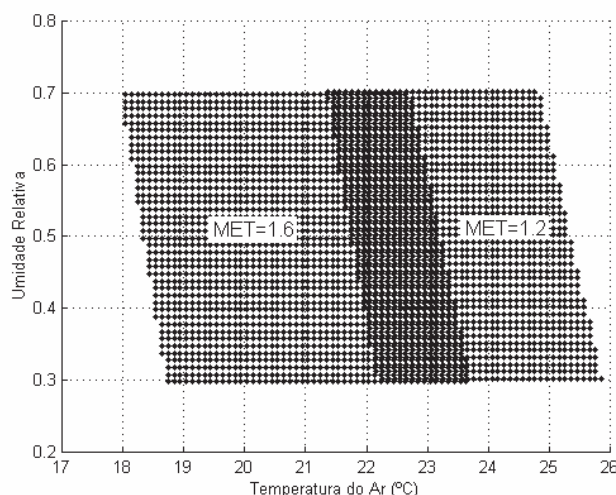


Figura 6 – Regiões de conforto para vestimentas com resistência térmica de 1,0 clo

	Parâmetros					
Distribuição	T _{ar}	T _{rm}	Ø	V _{ar}	MET	CLO
Normal	18,60	14,07	1,63	1,00	16,27	6,33
Distribuição	20,80	15,52	1,92	1,00	16,48	6,62

Tabela 7 – Coeficientes de sensibilidade

Nos dois gráficos temperatura/umidade verifica-se que, para a determinação das regiões de conforto, um valor maior de umidade proporciona conforto térmico para valores menores de temperatura, como ocorre em gráficos temperatura/umidade convencionais. Porém, verifica-se que os limites de valores de umidade e temperatura do ar para essas regiões são totalmente dependentes do valor da resistência térmica das vestimentas (Figura 5) e da taxa de metabolismo humano (Figura 6). Esse fato pode ser verificado claramente na Figura 5, pois, para os parâmetros adotados como constantes (V_{ar} e MET), as regiões de conforto (Figura 6) para um nível de vestimenta de 0,5 clo ficaram consideravelmente deslocadas da região de conforto para um nível de vestimenta de 1,0 clo, pois a área de intersecção das duas regiões de conforto é pequena. O mesmo pode ser observado na Figura 6. Nesse caso, a região de conforto para uma taxa de metabolismo humano de 1,2 met ficou consideravelmente deslocada da região de conforto para uma taxa de metabolismo humano de 1,6 met. Então, o resultado obtido por um sistema de controle que atuasse na temperatura, por exemplo, e que não considera o nível de vestimenta não seria satisfatório, ou seja, poderia não proporcionar conforto térmico em várias situações compatíveis com esse ambiente.

As duas análises sobre região de conforto não somente comprovam a importância de se considerarem aspectos individuais, como proporcionam uma nova alternativa para sistemas que realizam controle sobre regiões de conforto. Nesse caso, se o equipamento fornecer apenas opções para atividades físicas e se “Atividade em escritório” (Tabela 4) for a escolhida, por exemplo, a região a ser considerada deve ser formada pela intersecção das regiões de conforto da Figura 5. Por outro lado, o equipamento poderia apenas fornecer opções de vestuário e, nesse caso, se a opção “Terno e gravata” fosse a escolhida, por exemplo, a região a ser considerada no controle seria formada pela intersecção das regiões de conforto da Figura 6. Em ambos os casos, cada opção do usuário poderia alimentar o controlador com uma região de conforto obtida pela intersecção de tipos de vestuários esperados para uma atividade escolhida, ou pela intersecção de regiões de conforto para atividades físicas compatíveis com a vestimenta escolhida, respectivamente, e é necessário apenas o sensoriamento da T_{ar} e de ϕ . Em ambos os casos, a estratégia de controle baseia-se em regiões de controle obtidas pelo modelo de Fanger.

Por fim, se os valores de vestimenta e atividade física fossem mais próximos do que aqueles

apresentados, seria possível obter uma nova região de conforto, dada pela intersecção das quatro regiões anteriores, indicando uma relação de temperatura e umidade relativa capazes de gerar conforto para ocupantes do ambiente “Escritório”. Nesse caso, não seria necessário que os indivíduos indicassem sua vestimenta ou atividade física, pois essa região de conforto seria restritiva o suficiente para promover um PMV entre -0,5 e 0,5 para todas as combinações de vestimentas e atividades esperadas em um escritório. A grande vantagem é que essa seria a forma mais simples e barata de se utilizar o PMV para controle de sistemas de climatização, pois apenas seria necessário monitorar T_{ar} e \emptyset .

Conclusões

O presente artigo analisou o modelo de Fanger, conhecido como PMV, sob três aspectos. O primeiro é relativo ao comportamento do índice PMV em função de imprecisões nos parâmetros T_{rm} , MET e CLO. O segundo utilizou o método estatístico de Monte Carlo para a realização de uma análise de sensibilidade sobre a importância dos parâmetros da equação do PMV. O terceiro utilizou o modelo de Fanger para elaboração de regiões de conforto, fazendo, com que estas considerem também fatores individuais.

As análises de sensibilidade permitem um conhecimento objetivo da influência dos parâmetros analisados no PMV. Dentro das faixas de operação utilizadas nas análises, conclui-se que a taxa de variação do PMV com relação à temperatura radiante média é aproximadamente constante e igual a 0,13. Para a possível simplificação de que a temperatura radiante média seja igual à temperatura do ar, esta derivada provoca um erro de aproximadamente uma unidade no PMV a cada 7,7 °C de erro nesse ajuste. Conclui-se também que a taxa de variação do PMV com relação aos fatores individuais (CLO e MET) não é linear. Quanto menor a faixa de operação da temperatura do ar e, principalmente, quanto menor o valor desse parâmetro individual, maior é o valor da derivada. As informações obtidas nas análises de sensibilidade dos três parâmetros são importantes para a adoção do PMV como variável de controle, pois permite não somente avaliar a viabilidade de determinados ajustes – como para a temperatura radiante média igual à temperatura do ar – como servir de diretriz para projetos de sistemas de climatização, como, por exemplo, na distribuição de valores fornecidos para os fatores individuais, dando prioridade, ou detalhando, valores menores desses parâmetros.

A manutenção da unidade do parâmetro analisado é muito importante na análise dos três parâmetros,

realizada no capítulo Análise do PMV em Relação aos parâmetros T_{RM} , MET e CLO, pois, dessa forma, pôde-se ter, de forma direta, o impacto dos ajustes no parâmetro em questão. Por exemplo, concluiu-se que, para se manter o PMV na faixa de $\pm 0,5$, a T_{rm} deve estar em $\pm 3,9$ °C da T_{ar} . Com a manutenção das unidades, pode-se então diretamente investigar se o valor de 3,9 °C como limite da diferença entre o T_{rm} obtido e o real é viável para o ambiente a ser controlado. O mesmo ocorreu, por exemplo, para o parâmetro CLO, onde uma derivada parcial máxima de 3,4 foi encontrada para faixas compatíveis com um ambiente sujeito a um controle. De forma prática e direta, esses resultados são muito significativos, principalmente porque fornecem uma referência para cada caso particular de projeto de sistemas de climatização. Para alguns casos, pode ser mais difícil que a condição, que a diferença entre T_{ar} e T_{rm} , seja menor que 3,9 °C. Para outros casos, pode perfeitamente ser mais fácil atender a essa limitação, mas ser muito difícil garantir que um erro no parâmetro CLO esteja dentro do exigido para esse parâmetro. Porém, ao se propor uma análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de Fanger, é necessário obter resultados que comparem a sensibilidade do índice PMV com relação aos seus parâmetros, independentemente de quão difícil, ou não, é obter-se esse valor. Ou seja, deve-se fornecer uma comparação do comportamento do PMV com relação aos parâmetros independentemente de unidades, ou seja, de forma adimensional. Essa comparação pode ser realizada a partir dos resultados obtidos na análise de sensibilidade no capítulo Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de Fanger através do método estatístico de Monte Carlo. Resultados baseados no modelo de Fanger mostraram que uma variação em T_{ar} , MET e T_{rm} tem influência muito maior que aquelas provocadas por variações nos parâmetros V_{ar} e \emptyset . Esse fato está de acordo com os gráficos obtidos nas análises do T_{rm} , MET e CLO, onde as curvas com a mesma faixa de T_{ar} se encontram próximas, mesmo com diferentes valores para V_{ar} e \emptyset . Ressalta-se que V_{ar} foi o parâmetro que denotou a menor influência no PMV para os valores analisados, mas que este parâmetro está sujeito a grandes mudanças em seu valor, caso se atue diretamente nessa variável. Portanto, caso o sensoriamento de V_{ar} seja custoso ou de difícil realização, e devido ao baixo peso desse parâmetro no modelo, pode-se elaborar um controle baseado no conforto térmico sem que seja considerado V_{ar} ou, ainda, esse controle pode ser especificamente sobre o PMV (que considera V_{ar}), adotando-se uma constante para esse parâmetro. Porém, caso esse parâmetro esteja sujeito a grandes mudanças,

principalmente pelo uso de um ventilador, o sensoriamento dele pode ser fundamental, apesar da equação de Fanger ser pouco sensível a ele.

Com relação à análise das regiões de conforto, conclui-se que a consideração dos parâmetros individuais não somente é importante como é fundamental, porque a variação em apenas um dos fatores individuais, dentro de limites totalmente compatíveis com o contexto de um ambiente sujeito a um controle, desloca a região de conforto consideravelmente. Portanto, a estratégia de controle baseada em regiões de conforto que não considerem os fatores individuais, que são os casos largamente utilizados, está fadada a atuar sobre os sistemas de climatização de forma errada, provocando um desconforto nos ambientes que atuam, *i.e.*, ($|PMV| > 0,5$). Esse fato reforça a idéia que uma estratégia de controle baseada em PMV, tanto diretamente sobre o índice (uso de um sensor de PMV) quanto utilizando regiões de conforto obtidas considerando-se o PMV, tende a obter melhores resultados que as estratégias que consideram simplesmente temperatura e umidade ou em gráficos temperatura/umidade convencionais para a definição de região de conforto.

Para trabalhos futuros, recomenda-se uma extensão dessa análise para uma faixa maior de velocidade de ar.

Referências

- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). Refrigerating and air conditioning engineers. American Society of Heating. Atlanta, 1993.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). Investigation of thermal comfort at high humidities. Building Science: UC Berkeley. Disponível em: <<http://arch.ced.berkeley.edu/resources/bldgsci/research/thermalcomf.htm>>. Acesso em: 27 out. 2006.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). Standard 55-1981. Thermal Environment Conditions for Human Occupancy, 1981.
- BIN, Y.; SEKHAR, S. C. Three-dimensional numerical simulation of a hybrid fresh air and recirculated air diffuser for decoupled ventilation strategy. *Building and Environment*, v. 42, n. 5, p. 1975-1982, 2006.
- DUARTE, M. V. Ajuste de modelos dinâmicos de estruturas com não linearidades concentradas. 1994, 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.
- FANGER, P.O. Thermal comfort. New York: McGraw-Hill, 1970.
- FREIRE, R.Z. Técnicas avançadas de controle aplicadas a sistemas de climatização visando conforto térmico. Curitiba, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - PPGEPS/CCET/PUCPR, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.
- FREIRE, R. Z.; OLIVEIRA, G. H. C.; MENDES, N. Thermal comfort based predictive controllers for building heating systems, In: IFAC WORLD CONGRESS, 16., 2005, Prague. Proceedings... Prague, Czech Republic: IFAC, 2005.
- GOUDA, M. M.; DANAHER, S.; UNDERWOOD, C. P. Thermal comfort based fuzzy logic controller. *Building Services Engineering Research and Technology*, v. 22, n. 4, p. 237-254, 2001.
- HAMDI, M.; LACHIVER, G. A fuzzy control system based on the human sensation of thermal comfort. In: IEEE CONF. ON FUZZY SYSTEMS, 1., 1999, USA. Proceedings... USA: IEEE, 1999. p. 487-492.
- INNOVA AIR TECH INSTRUMENTS A/S (INNOVA). Thermal comfort theory. Copenhagen, 2005.
- KON, A. Thermal comfort sensor. In: IEEE INSTRUM. MEAS. TECH. CONF, 16., 1994, New York. Proceedings... New York: IEEE, 1994. p. 454-546.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP (Ref. 2460/05) e ao CNPq, do Ministério de Ciência e Tecnologia, pelo suporte financeiro.