

# Modelação de um Sistema de AVAC, em Software *LabVIEW*

**Marco Alexandre Teixeira Almeida**



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Eléctricos de Energia

**2014**



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -  
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Marco Alexandre Teixeira Almeida, Nº 1050383, 1050383@isep.ipp.pt

Orientação científica: Professora Doutora Olga dos Remédios Sobral Castro,  
orc@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2014**



“As dificuldades devem ser usadas para crescer,  
não para desencorajar.”

*William Ellery Channing*



# Agradecimentos

Ao longo da vida delineamos metas, cuja concretização permite-nos crescer tanto a nível pessoal como profissional. É neste âmbito que surge a necessidade da realização deste objetivo específico: a Tese de Mestrado.

Para tudo o que é importante e significativo, o caminho a percorrer, também, requer esforço, determinação, estabelecimento de prioridades e cedências. Assim sendo, este capítulo carece de atenção de minha parte, pois constitui uma oportunidade para agradecer aos que contribuíram para a finalização deste projeto pessoal.

Em primeiro lugar, quero agradecer à minha esposa pelo apoio dado, pelo incentivo e pela ajuda. Agradeço-lhe, também, a paciência que teve durante a minha ausência na elaboração deste trabalho. Foram horas, dias e semanas inteiras que necessitei de me ausentar da família para que este trabalho levasse um caminho por forma a chegar a bom porto.

Quero agradecer aos meus sogros pela energia positiva transmitida nos momentos de maior pressão deste trabalho e, quero principalmente, agradecer à minha mãe e à minha irmã. Sem elas não seria possível terminar este trabalho. Elas que fizeram de baby-sitter do meu David quando eu mais precisei, devido à ausência da minha esposa por motivos profissionais.

Não posso deixar de agradecer à Doutora Olga Castro por me ter recebido no seu Laboratório e ter aceite a orientação desta tese de mestrado sobre AVAC. Quero deixar, também, o meu muito obrigado ao Eng.º Joaquim Monteiro, assistente da Doutora Olga Castro, que me acompanhou e ajudou durante as medições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Expresso agradecimento à empresa Easycontrol, na pessoa do Eng.º Evaristo por se ter disponibilizado em deslocar às instalações do ISEP a fim de, fornecer informações importantes sobre o funcionamento do controlo da UTA.

Por fim, agradeço a todos que, indiretamente, contribuíram na ajuda da elaboração deste trabalho.

Este trabalho não é apenas fruto do meu esforço, também é do vosso.



## Resumo

Na União Europeia, a energia utilizada nos edifícios é responsável por uma grande parte do consumo total, cerca de 40%, de toda a energia produzida, contribuindo em grande escala para as emissões de gases de efeito de estufa, como o CO<sub>2</sub>. [ADENE, 2014]. A minimização deste consumo, durante o período de ciclo de vida de um edifício, é um grande desafio associado ao ambiente e à economia.

Na atualidade assistimos, cada vez mais, ao emergir de novas tecnologias. Faz parte dessa realidade, o crescimento e o desenvolvimento das UTA's, que surgem como resposta do ser humano pela busca de otimização da sua zona de conforto, da qualidade de ar interior e da eficiência energética. Assim, para que não se sacrifique o conforto térmico, há que conciliar a qualidade de ar interior com a energia dispensada para climatizar os espaços.

Para ajudar à minimização de CO<sub>2</sub> em conjunto com uma eficiência energética e conforto térmico, traduzindo-se numa melhor qualidade de ar no interior de espaços climatizados, surge o objetivo de implementar uma aplicação através do *software LabVIEW* para prever uma experiência real. Como solução, recorreu-se a modelos matemáticos que traduzissem os vários balanços térmicos, balanços de massa e de CO<sub>2</sub>. As principais conclusões deste trabalho foram: validação do comportamento do modelo matemático da temperatura; validação do comportamento do modelo matemático de CO<sub>2</sub>; humidade relativa com 25% de registos válidos.

Palavras-chave:

AVAC, UTA, SATEC, Temperatura, Humidade, CO<sub>2</sub>, BAG, BAQ, *LabVIEW*.



## *Abstract*

On the European Union, the energy used in buildings is responsible for a big portion of total consumption of all energy produced, about 40%, contributing on a large scale for greenhouses gases emissions, such as CO<sub>2</sub> [ADENE, 2014]. Minimizing this consumption during a building life cycle is a major challenge, associated with the environment and the economy.

Nowadays, we have been increasingly witnessing the rise of new technologies. The growth and development of AHU's is a part of our reality, as a response to the human beings demands in their quest for optimizing their comfort zone, indoor air quality and energy efficiency. Thus, in order to not sacrifice the thermal comfort, is necessary to accommodate indoor air quality with energy given to acclimatize zones.

In order to minimize CO<sub>2</sub>, in combination with energy efficiency and thermal comfort, resulting in a better quality of indoor air-conditioned zones, the main goal is implement an application using *LabVIEW* software to predict a real experience. As a solution, we used a mathematical model to translate the various heat balances, mass balances and CO<sub>2</sub>. The main conclusions of this work were: mathematical model validation of temperature; validation of CO<sub>2</sub> mathematical model; relative humidity has 25% valid records.

### *Key Words:*

HVAC, AHU, SATEC, Temperature, Humidity, CO<sub>2</sub>, Cooling Coil, Heating Coil, *LabVIEW*.



# Índice

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2.MOTIVAÇÃO E OBJETIVO SOBRE O PRESENTE TRABALHO .....	8
1.3.ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	9
<b>2. MODELAÇÃO MATEMÁTICA DO SISTEMA DE AVAC .....</b>	<b>11</b>
2.1.COMPONENTES DA UTA .....	13
2.2.VERIFICAÇÕES E MEDIÇÕES .....	13
2.3.MODELAÇÃO.....	20
2.3.1 MODELAÇÃO DA SALA.....	21
2.3.2 MODELAÇÃO DA UTA.....	23
2.3.2.1 MODELAÇÃO DA CAIXA DE MISTURA DE AR.....	23
2.3.2.2 MODELAÇÃO DA BATERIA DE ÁGUA GELADA.....	25
2.3.2.3 MODELAÇÃO DA BATERIA DE ÁGUA QUENTE .....	30
2.3.2.4 MODELAÇÃO DO HUMIDIFICADOR .....	31
2.3.2.5 MODELAÇÃO DAS CONDUTAS DE INSUFLAÇÃO E DE EXTRAÇÃO .....	33
2.3.2.6 MODELAÇÃO DO CO <sub>2</sub> .....	37
<b>3. IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAÇÃO NO SIMULADOR <i>LABVIEW</i> .....</b>	<b>41</b>
3.1.IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAÇÃO .....	42
3.1.1 NA SALA SATEC .....	42
3.1.2 NA CAIXA DE MISTURA .....	47
3.1.3 NA BATERIA DE ÁGUA GELADA.....	49
3.1.4 NA BATERIA DE ÁGUA QUENTE .....	54
3.1.5 NO HUMIDIFICADOR.....	55
3.1.6 NAS CONDUTA DE INSUFLAÇÃO E CONDUTA DE RETORNO.....	57
3.1.7 PARA O CO <sub>2</sub> .....	59
3.1.8 CONTROLO PROPORCIONAL INTEGRAL E DERIVATIVO - PID.....	60
3.1.8.1 APLICAÇÃO DO PID PARA CONTROLO DE TEMPERATURA.....	62
3.1.9 MOTORES DOS VENTILADORES .....	64
3.1.10 <i>GRAPHIC USER INTERFACE</i> DA MODELAÇÃO DO SISTEMA DE AVAC ...	68
<b>4. ENSAIOS, SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>	<b>70</b>
4.1.REALIZAÇÃO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS .....	70

4.2.SIMULAÇÕES NA APLICAÇÃO .....	73
4.3.ANÁLISE DE RESULTADOS .....	74
<b>5. IMPLEMENTAÇÃO DE FUNCIONALIDADES NO SIMULADOR.....</b>	<b>83</b>
5.1.INSERÇÃO DE MÓDULO DE CONTROLO DE <i>FREE-COOLING</i> .....	84
5.2.INSERÇÃO DE MÓDULO DE CONTROLO DE CO <sub>2</sub> .....	86
5.3.INSERÇÃO DE MÓDULO DE CONTROLO DE DESUMIDIFICAÇÃO.....	87
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>89</b>
6.1.RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	90
<b>7. REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS .....</b>	<b>91</b>
<b>8. ANEXOS.....</b>	<b>94</b>
8.1.ANEXO A.....	94
8.2.ANEXO B .....	97
8.3.ANEXO C.....	99
8.4.ANEXO D .....	114
8.5.ANEXO E .....	115
<b>9. MANUAL DE UTILIZADOR DO SIMULADOR .....</b>	<b>116</b>
9.1.REQUISITOS MÍNIMOS DO SISTEMA INFORMÁTICO .....	116
9.2.ABERTURA DO SIMULADOR NO WINDOWS 8/8.1 .....	117
9.3.INPUTS NO GRAPHIC USER INTERFACE .....	118
9.4.OUTPUTS NO GRAPHIC USER INTERFACE .....	120
9.5.ERROS DE COMPILAÇÃO.....	122



# Índice de figuras

FIGURA 1.	RELAÇÃO ENTRE O PPD E O PMV .....	4
FIGURA 2.	FOTOGRAFIA DA UTA.....	12
FIGURA 3.	GEOMETRIA INTERNA DA SATEC [MONTEIRO, 2013] .....	12
FIGURA 4.	INTERLIGAÇÃO ENTRE O CHILLER/CALDEIRA E AS BATERIAS DA UTA.....	14
FIGURA 5.	ATUADOR E VÁLVULA DE TRÊS VIAS.....	15
FIGURA 6.	CONTADOR DE ENTALPIA SCHLUMBERGER THERMIFLU .....	15
FIGURA 7.	KIMO AMI301 COM ACESSÓRIO DE FIO QUENTE.....	16
FIGURA 8.	SONDA TEMPERATURA SATCHWELL DDU1803 .....	16
FIGURA 9.	BATERIA DE ÁGUA GELADA À ESQUERDA E DE ÁGUA QUENTE À DIREITA ...	18
FIGURA 10.	SEQUÊNCIA DE ETAPAS A PERCORRER.....	20
FIGURA 11.	DIAGRAMAS DE BLOCOS DA TEMPERATURA DA EQUAÇÃO 14 .....	22
FIGURA 12.	DIAGRAMAS DE BLOCOS DO RÁCIO DE HUMIDADE DA EQUAÇÃO 14.....	22
FIGURA 13.	MISTURA DE DUAS CORRENTES DE AR HÚMIDO [ASHRAE, 2009].....	24
FIGURA 14.	DB PARA A TEMPERATURA DA EQUAÇÃO 17.....	25
FIGURA 15.	DB PARA A HUMIDADE DA EQUAÇÃO 17.....	25
FIGURA 16.	BATERIA DE ÁGUA DE UMA UTA .....	26
FIGURA 17.	ALGUNS PADRÕES DOS CIRCUITOS DOS TUBOS DE COBRE .....	26
FIGURA 18.	DIAGRAMA DE BLOCOS DA EQUAÇÃO 20 .....	28
FIGURA 19.	TIPOS DE HUMIDIFICADORES: A - ADIABÁTICO; B - ISOTÉRMICO; C - PULVERIZADOR .....	31
FIGURA 20.	DIAGRAMAS DE BLOCOS DA TEMPERATURA DA EQUAÇÃO 27 .....	33
FIGURA 21.	DIAGRAMAS DE BLOCOS DO RÁCIO DE HUMIDADE DA EQUAÇÃO 27.....	33
FIGURA 22.	TROÇO DE CONDUTA METÁLICA DE 300MM.....	34
FIGURA 23.	REGIME TURBULENTO E LAMINAR, SEGUNDO O NÚMERO DE REYNOLDS....	35
FIGURA 24.	EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> DA UE EM 2012/2013 (ESTIMADO EM 2013) [EUROSTAT, 2014] .....	38
FIGURA 25.	DIAGRAMA DE BLOCOS PARA A MODELAÇÃO DO NÍVEL DE CO <sub>2</sub> NA SALA....	39
FIGURA 26.	JANELAS DO LABVIEW: GUI, À ESQUERDA E VI, À DIREITA.....	42
FIGURA 27.	ESQUEMÁTICO DA SATEC COM OS GANHOS E PERDAS DE ENERGIA.....	43
FIGURA 28.	INSUFLAÇÃO E EXTRAÇÃO DO AR DA SATEC [MONTEIRO, 2013] .....	44
FIGURA 29.	DIAGRAMA DE BLOCOS DA MODELAÇÃO DA TEMPERATURA DA SALA.....	45
FIGURA 30.	COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DAS TEMPERATURAS TO E TS. EM A) SE FOR VERDADEIRA; EM B) SE FOR FALSA.....	45

FIGURA 31. TRATAMENTO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA PARA O DB DA MODELAÇÃO DA SALA .....	46
FIGURA 32. DIAGRAMA DE BLOCOS DA MODELAÇÃO DO RÁCIO DE HUMIDADE DA SALA .....	47
FIGURA 33. MODELAÇÃO EM LABVIEW DA TEMPERATURA E RÁCIO DE HUMIDADE NA CAIXA DE MISTURA DE AR.....	48
FIGURA 34. EXEMPLO DO FUNCIONAMENTO DA BATERIA DE ÁGUA GELADA NO DIAGRAMA PSICROMÉTRICO .....	51
FIGURA 35. DIAGRAMA DE BLOCOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SAÍDA DE AR DA BATERIA CONSOANTE A VARIAÇÃO DA V3V.....	52
FIGURA 36. CONDIÇÃO PARA IMPOSIÇÃO DE LIMITES MÍNIMOS E MÁXIMOS NA SAÍDA DO AR DA BATERIA DE ÁGUA GELADA.....	52
FIGURA 37. DIAGRAMA DE BLOCOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SAÍDA DE ÁGUA DA BATERIA CONSOANTE A VARIAÇÃO DA V3V.....	53
FIGURA 38. DIAGRAMA DE BLOCOS DA MODELAÇÃO DA BATERIA DE ÁGUA GELADA....	53
FIGURA 39. EXEMPLO DO FUNCIONAMENTO DA BATERIA DE ÁGUA QUENTE NO DIAGRAMA PSICROMÉTRICO .....	54
FIGURA 40. DIAGRAMA DE BLOCOS PARA A TEMPERATURA À SAÍDA DO HUMIDIFICADOR .....	55
FIGURA 41. DIAGRAMA DE BLOCOS PARA O RÁCIO DE HUMIDADE PRODUZIDA PELO HUMIDIFICADOR .....	56
FIGURA 42. COMPARAÇÃO ENTRE $P_{ws}$ E $P_w$ PARA DECISÃO DA SAÍDA $h(s)$ .....	57
FIGURA 43. CAIXA DE FÓRMULAS EM LABVIEW PARA OS CÁLCULOS PARA AS PERDAS OU GANHOS .....	59
FIGURA 44. CAIXA DE FÓRMULAS PARA O CÁLCULO DE $hi$ .....	59
FIGURA 45. MODELAÇÃO DE CONCENTRAÇÕES DE CO <sub>2</sub> NA SALA.....	60
FIGURA 46. DIAGRAMA DE BLOCOS DO PID .....	61
FIGURA 47. MÓDULO DO PID DE TEMPERATURA DO SISTEMA, EM LABVIEW .....	63
FIGURA 48. MOTOR E TURBINA DO VENTILADOR.....	65
FIGURA 49. CÁLCULO DA CORRENTE ELÉTRICA DE AMBOS OS VENTILADORES .....	68
FIGURA 50. GUI DO SIMULADOR.....	69
FIGURA 51. ANEMÓMETRO .....	71
FIGURA 52. TESTO 435 + SONDA NTC.....	72
FIGURA 53. KIMO AQ200.....	72
FIGURA 54. KIMO KH110 DATALOGGER + SENSOR CO <sub>2</sub> GE T8041.....	72
FIGURA 55. FLUXO DE ARRASTAMENTO DE AR DENTRO DE UM ESPAÇO .....	76
FIGURA 56. COMPONENTES PARA APROVEITAMENTO DE CALOR: RODA TÉRMICA (À ESQUERDA); PLACA DE FLUXO CRUZADO (À DIREITA).....	83

FIGURA 57. VI DO MÓDULO DE FC.....	85
FIGURA 58. VI DO MÓDULO DE CO <sub>2</sub> .....	86
FIGURA 59. SINAIS PARA O REGISTO DE AR NOVO .....	86
FIGURA 60. SINAIS PARA A V3V DE ÁGUA GELADA .....	88
FIGURA 61. DIMENSIONAMENTO DA UTA.....	114
FIGURA 62. LOCALIZAÇÃO DO LABVIEW EM C .....	117
FIGURA 63. ABERTURA DO FICHEIRO DO SIMULADOR.....	118
FIGURA 64. GUI DO SIMULADOR COM MARCADORES DOS <i>INPUTS</i> .....	120
FIGURA 65. GUI DO SIMULADOR COM MARCADORES DOS <i>OUTPUTS</i> .....	122
FIGURA 66. ERRO DE COMPILAÇÃO DEVOLVIDO PELO <i>LABVIEW</i> .....	123
FIGURA 67. ERRO DE COMPILAÇÃO DEVIDO À AUSÊNCIA DO TEMPO DE SIMULAÇÃO .	124



## Índice de tabelas

TABELA 1	ESCALA DE SENSAÇÃO TÉRMICA.....	4
TABELA 2	GERAÇÃO DE CALOR TÍPICO DO METABOLISMO DO SER HUMANO PARA VÁRIAS ATIVIDADES [ASHRAE, 2001].....	6
TABELA 3	PARÂMETROS DE REGRESSÃO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO AR, K (W/M. K) [MATOS, 1998].....	37
TABELA 4	CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR [EN 13779, 2007].....	38
TABELA 5	CONSUMO DE O <sub>2</sub> INSPIRADO EM FUNÇÃO DA ATIVIDADE.....	40
TABELA 6	MEDIÇÕES DE CAUDAIS E PERDAS DE CARGA.....	65
TABELA 7	DADOS DE CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DOS VENTILADORES.....	67
TABELA 8	POSIÇÃO, EM ALTURA, DAS SONDAS DE CO <sub>2</sub> [MONTEIRO, 2013].....	73
TABELA 9	ERROS DA Sonda E DESVIO DE REGISTOS NA TEMPERATURA.....	77
TABELA 10	ERROS DA Sonda E DESVIO DE REGISTOS NA HUMIDADE RELATIVA.....	78
TABELA 11	ERROS DA Sonda E DESVIO DE REGISTOS NO DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> ).. .....	78
TABELA 12	DADOS RECOLHIDOS NO ENSAIO DA BATERIA DE ÁGUA GELADA.....	94
TABELA 13	DADOS RECOLHIDOS NO ENSAIO DA BATERIA DE ÁGUA QUENTE.....	95
TABELA 14	DADOS RECOLHIDOS DO CAUDAL DE AR NOS ENSAIOS DAS BATERIAS DE ÁGUA.....	96
TABELA 15	LEITURAS DE TRANSMISSÃO TÉRMICA - U - DAS PAREDES DA SATEC.....	97
TABELA 16	DADOS ESTATÍSTICOS DAS LEITURAS DE U.....	98
TABELA 17	REGISTOS DO ENSAIO EFETUADO EM 11 DE JUNHO DE 2014 COM SETPOINT EM 18°C.....	99
TABELA 18	MÉDIA DAS SONDAS DE CO <sub>2</sub> PARA O PRIMEIRO E ÚLTIMO REGISTO, DO ENSAIO 1.....	100
TABELA 19	REGISTOS DO ENSAIO EFETUADO EM 11 DE JUNHO DE 2014 COM SETPOINT EM 25°C.....	100
TABELA 20	MÉDIA DAS SONDAS DE CO <sub>2</sub> PARA O PRIMEIRO E ÚLTIMO REGISTO, DO ENSAIO 2.....	101
TABELA 21	REGISTOS DO ENSAIO EFETUADO EM 13 DE JUNHO DE 2014 COM SETPOINT EM 18°C.....	101
TABELA 22	MÉDIA DAS SONDAS DE CO <sub>2</sub> PARA O PRIMEIRO E ÚLTIMO REGISTO, DO ENSAIO 3.....	103
TABELA 23	REGISTOS DO ENSAIO EFETUADO EM 13 DE JUNHO DE 2014 COM SETPOINT EM 25°C.....	103

TABELA 24	MÉDIA DAS SONDAS DE CO <sub>2</sub> PARA O PRIMEIRO E ÚLTIMO REGISTO, DO ENSAIO 4.....	105
TABELA 25	REGISTOS DO ENSAIO EFETUADO EM 26 DE JUNHO DE 2014 COM SETPOINT EM 20°C.....	105
TABELA 26	MÉDIA DAS SONDAS DE CO <sub>2</sub> PARA O PRIMEIRO E ÚLTIMO REGISTO, DO ENSAIO 5.....	107
TABELA 27	REGISTOS DO ENSAIO EFETUADO EM 26 DE JUNHO DE 2014 COM SETPOINT EM 30°C.....	108
TABELA 28	MÉDIA DAS SONDAS DE CO <sub>2</sub> PARA O PRIMEIRO E ÚLTIMO REGISTO, DO ENSAIO 6.....	109
TABELA 29	REGISTOS DO ENSAIO EFETUADO EM 27 DE JUNHO DE 2014 COM SETPOINT EM 20°C.....	110
TABELA 30	MÉDIA DAS SONDAS DE CO <sub>2</sub> PARA O PRIMEIRO E ÚLTIMO REGISTO, DO ENSAIO 7.....	111
TABELA 31	REGISTOS DO ENSAIO EFETUADO EM 27 DE JUNHO DE 2014 COM SETPOINT EM 30°C.....	112
TABELA 32	MÉDIA DAS SONDAS DE CO <sub>2</sub> PARA O PRIMEIRO E ÚLTIMO REGISTO, DO ENSAIO 8.....	113



# Índice de gráficos

GRÁFICO 1. ZONAS DE CONFORTO PARA O INVERNO (A VERMELHO) E PARA O VERÃO (A AZUL); ZONA COMUM A LARANJA [ASHRAE, 2001].....	3
GRÁFICO 2. RESPOSTA DO PID A UMA ENTRADA DE DEGRAU UNITÁRIO: <i>ref = 1</i> [MORGADO, 2007] .....	62
GRÁFICO 3. RELAÇÃO ENTRE AS SAÍDAS DO PID E A TEMPERATURA.....	64
GRÁFICO 4. CURVA CARATERÍSTICA (MEDIDA) DO VENTILADOR DE INSUFLAÇÃO .....	66
GRÁFICO 5. CURVA CARATERÍSTICA (MEDIDA) DO VENTILADOR DE EXTRAÇÃO .....	66
GRÁFICO 6. ENSAIO VS SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA DA SATEC.....	74
GRÁFICO 7. ENSAIO VS SIMULAÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA DA SATEC.....	74
GRÁFICO 8. ENSAIO VS SIMULAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> DA SATEC.....	75
GRÁFICO 9. VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DA SALA PARA O ENSAIO REAL E PARA A SIMULAÇÃO, COM SETPOINT DE 18°C.....	79
GRÁFICO 10. VARIAÇÃO DE HUMIDADE DA SALA PARA O ENSAIO REAL E PARA A SIMULAÇÃO .....	80
GRÁFICO 11. VARIAÇÃO DE CO <sub>2</sub> DA SALA PARA O ENSAIO REAL E PARA A SIMULAÇÃO .. .....	80
GRÁFICO 12. VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DA SALA PARA O ENSAIO REAL E PARA A SIMULAÇÃO, COM SETPOINT DE 25°C.....	81
GRÁFICO 13. VARIAÇÃO DE HUMIDADE DA SALA PARA O ENSAIO REAL E PARA A SIMULAÇÃO .....	81
GRÁFICO 14. VARIAÇÃO DE CO <sub>2</sub> DA SALA PARA O ENSAIO REAL E PARA A SIMULAÇÃO .. .....	82
GRÁFICO 15. PROCESSO DE FUNCIONAMENTO DO CONTROLO DE HUMIDADE.....	87



# Índice de equações

EQUAÇÃO 1 CÁLCULO DA ÁREA SUPERFICIAL DO CORPO HUMANO SEGUNDO DUBOIS [DUBOIS, 1916] .....	6
EQUAÇÃO 2 CÁLCULO DO RÁCIO DE HUMIDADE EXPIRADA [ASHRAE, 2009].....	7
EQUAÇÃO 3 TAXA DE VENTILAÇÃO PULMONAR [ASHRAE, 2009].....	7
EQUAÇÃO 4 TAXA DE VAPOR DE ÁGUA EXPIRADO [ASHRAE, 2009].....	7
EQUAÇÃO 5 DIFERENCIAL MÁXIMA DE TEMPERATURA (A - AR; W - ÁGUA) [YUNUS A, 2002]. .....	17
EQUAÇÃO 6 POTÊNCIA MÁXIMA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA [YUNUS A, 2002].....	17
EQUAÇÃO 7 POTÊNCIA ATUAL DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA (EQ. DA ESQUERDA PARA ÁGUA GELADA E EQ. DA DIREITA PARA ÁGUA QUENTE) [YUNUS A, 2002].....	17
EQUAÇÃO 8 EFICIÊNCIA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR [YUNUS A, 2002] .....	17
EQUAÇÃO 9 EXPRESSÃO DE CÁLCULO PARA CAPACIDADE TÉRMICA DA BATERIA - <b>Cbat</b>	18
EQUAÇÃO 10 CÁLCULO DE U [SANTOS, 2006] .....	19
EQUAÇÃO 11 BALANÇO TÉRMICO E BALANÇO DE MASSA DA SALA [YAMAKAWAL, ET AL., 2006], [TASHTOUSH, 2004].....	21
EQUAÇÃO 12 DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO 11.....	21
EQUAÇÃO 13 APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE À EQUAÇÃO 12 .....	21
EQUAÇÃO 14 SIMPLIFICAÇÃO DA EXPRESSÃO DE TEMPERATURA DA EQUAÇÃO 13.....	22
EQUAÇÃO 15 BALANÇO DE MASSA DA CAIXA DE MISTURA [TASHTOUSH, 2004].....	23
EQUAÇÃO 16 TEMPERATURA E RÁCIO DE HUMIDADE DA MISTURA .....	24
EQUAÇÃO 17 APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE NA EQUAÇÃO 16 .....	24
EQUAÇÃO 18 BALANÇO TÉRMICO DA BATERIA DE ÁGUA GELADA [PARVARESH, 2012], [TASHTOUSH, 2004] .....	27
EQUAÇÃO 19 APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE À EQUAÇÃO 18 .....	27
EQUAÇÃO 20 SIMPLIFICAÇÃO DA EQUAÇÃO 19.....	27
EQUAÇÃO 21 CÁLCULO DA PRESSÃO DE SATURAÇÃO DA ÁGUA PARA <b>td</b> [ASHRAE, 2009] .....	28
EQUAÇÃO 22 RÁCIO DE HUMIDADE EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DE VAPOR ÁGUA <b>Pw</b> [ASHRAE, 2009].....	29
EQUAÇÃO 23 EXPRESSÕES DE CÁLCULO DO PONTO DE ORVALHO [ASHRAE, 2009].....	29
EQUAÇÃO 24 PRESSÃO DA ÁGUA EM FUNÇÃO DE <b>Hr</b> E <b>Pws</b> [ASHRAE, 2009].....	29
EQUAÇÃO 25 PRESSÃO DE SATURAÇÃO DA ÁGUA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA [ASHRAE, 2009].....	30

EQUAÇÃO 26	EQUAÇÕES DE BALANÇO TÉRMICO E DE MASSA DO HUMIDIFICADOR, RESPETIVAMENTE [TASHTOUSH, 2004].....	32
EQUAÇÃO 27	APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE ÀS EXPRESSÕES DA EQUAÇÃO 26 .....	32
EQUAÇÃO 28	TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA NUMA CONDUTA [INCROPERA, 2008] .....	35
EQUAÇÃO 29	EQUAÇÃO DO NÚMERO DE NUSSELT [INCROPERA, 2008].....	36
EQUAÇÃO 30	CORRELAÇÃO DE DITTUS-BOELTER PARA APLICAÇÕES DE FLUXO TURBULENTO [INCROPERA, 2008] [WHITE,1998] .....	36
EQUAÇÃO 31	COEFICIENTE DE REYNOLDS [INCROPERA, 2008].....	37
EQUAÇÃO 32	NÚMERO DE PRANDTL [INCROPERA, 2008].....	37
EQUAÇÃO 33	LEI DE SUTHERLAND [WHITE, 1998].....	37
EQUAÇÃO 34	REGRESSÃO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO AR, K (W/M. K) .....	37
EQUAÇÃO 35	MODELO MATEMÁTICO PARA O CO <sub>2</sub> .....	39
EQUAÇÃO 36	APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE À EQUAÇÃO 35 .....	39
EQUAÇÃO 37	EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> , POR PESSOA [MONTEIRO, 2013].....	40
EQUAÇÃO 38	ENTALPIA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA EM °C E DO RÁCIO DE HUMIDADE .....	49
EQUAÇÃO 39	APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DA RETA PARA CÁLCULO DO RÁCIO DE HUMIDADE .....	50
EQUAÇÃO 40	OBTENÇÃO DO PONTO <b>b</b> DA EQUAÇÃO DA RETA.....	50
EQUAÇÃO 41	JUNÇÃO DE <b>A13</b> COM A EQUAÇÃO 38.....	50
EQUAÇÃO 42	EXPRESSÃO FINAL PARA OBTENÇÃO DE <b>W3</b> .....	50
EQUAÇÃO 43	RÁCIO DE AR HÚMIDO PRODUZIDO PELO HUMIDIFICADOR .....	56
EQUAÇÃO 44	RÁCIO DE HUMIDADE EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DE SATURAÇÃO DA ÁGUA ( <b>W<sub>sw</sub></b> ) E RÁCIO DE HUMIDADE EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DE VAPOR DE ÁGUA ( <b>W<sub>a</sub></b> ) .....	56
EQUAÇÃO 45	SINAL GERADO PELO PID [HONEYWELL, 1997].....	61
EQUAÇÃO 46	FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA DA EQUAÇÃO 45 .....	61
EQUAÇÃO 47	CORRENTE ELÉTRICA EM FUNÇÃO DO RENDIMENTO, CAUDAL E POTÊNCIA ELÉTRICA.....	67



## Nomenclatura

$\nu$  – Viscosidade cinemática, em  $\text{m}^2/\text{s}$

$\dot{V}_a$  – Caudal de ar,  $\text{m}^3/\text{s}$

$\dot{V}_{ae}$  – Caudal de ar extraído da sala, em  $\text{m}^3/\text{s}$

$\dot{V}_{am}$  – Caudal de ar de mistura (mistura de ar novo com ar da sala), em  $\text{m}^3/\text{s}$

$\dot{V}_{an}$  – Caudal de ar novo, em  $\text{m}^3/\text{s}$

$\dot{V}_w$  – Caudal de água,  $\text{m}^3/\text{s}$

$\dot{m}_a$  – Massa de ar,  $\text{kg}/\text{s}$

$\dot{m}_e$  – Massa do ar da extração, em  $\text{kg}/\text{s}$

$\dot{m}_m$  – Massa do ar de mistura, em  $\text{kg}/\text{s}$

$\dot{m}_o$  – Massa do ar exterior, em  $\text{kg}/\text{s}$

$\dot{m}_{res}$  – Rácio de ventilação pulmonar

$\dot{m}_{w,res}$  – Rácio de vapor de água expirado

$\dot{m}_w$  – Massa de água, em  $\text{kg}/\text{s}$

$h_i$  – Coeficiente de transferência de calor no interior da conduta, em  $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$

$h_o$  – Coeficiente de transferência de calor no exterior da conduta, em  $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$

$A_i = \pi \cdot d_i \cdot L$

$A_o = \pi \cdot d_o \cdot L$

$C_h$  – Capacidade térmica do humidificador

$C_a$  – Capacidade térmica do ar, em  $\text{kJ}/\text{K}$

$C_{bat}$  – Capacidade térmica da bateria, em  $\text{kJ}/\text{K}$

$Co2_{ext}$  – Valor de  $\text{CO}_2$  no exterior da Sala, em ppm (partes por milhão)

$Co2_{int}$  – Valor de  $\text{CO}_2$  no interior da Sala, em ppm (partes por milhão)

$cp_a$  – Calor específico do ar, em  $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$

$cp_{ar}$  – Calor específico do ar, em  $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$

$cp_w$  – Calor específico da água, em  $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$

$C_w$  – Capacidade térmica da água, em  $\text{kJ}/\text{K}$

$K_r$  – Condutibilidade térmica do isolamento, em W/m K

$Q_{ie}$  – Perdas térmicas por infiltrações e/ou exfiltrações da sala, em kJ/s

$T_{h,in}$  – Temperatura do ar de entrada no humidificador, em °C

$T_{h,out}$  – Temperatura do ar de saída do humidificador, em °C

$T_{a,in}$  – Temperatura de entrada de ar na bateria, em °C

$T_{a,out}$  – Temperatura de saída de ar da bateria, em °C

$T_{d,in}$  – Temperatura do fluido dentro da conduta, em °C

$T_{d,out}$  – Temperatura do fluido fora da conduta (temperatura exterior), em °C

$T_e$  – Temperatura do ar, da extração, em °C

$T_i$  – Temperatura do ar insuflado, em °C

$T_m$  – Temperatura do ar, da mistura, em °C

$T_o$  – Temperatura do ar exterior, em °C

$T_{ref}$  – Temperatura de referência do ar (273 K)

$T_s$  – Temperatura da Sala, em °C

$T_{su}$  – Temperatura do ar na eq, da Lei de *Sutherland*, em K

$T_{w,in}$  – Temperatura de entrada de água na bateria, em °C

$T_{w,out}$  – Temperatura de saída de água da bateria, em °C

$U_{uta}$  – Coeficiente de transmissão térmica das paredes da UTA, em W/m<sup>2</sup>.K

$V_H$  – Volume do módulo do humidificador, em m<sup>3</sup>

$V_{sala}$  – Volume da Sala, em m<sup>3</sup>

$W_h$  – Rácio de humidade na saída do humidificador, em kg de vapor/kg de ar seco

$W_a$  – Rácio de humidade em função da pressão de vapor de água

$W_e$  – Rácio de humidade do ar de extração, em kg de vapor/kg de ar seco

$W_i$  – Humidade absoluta insuflada na sala, em kg de vapor/kg de ar seco

$W_m$  – Rácio de humidade do ar da mistura, em kg de vapor/kg de ar seco

$W_o$  – Rácio de humidade do ar exterior, em kg de vapor/kg de ar seco

$W_s$  – Humidade absoluta da sala, em kg de vapor/kg de ar seco

$W_{si}$  – Rácio de humidade na entrada do humidificador, em kg de vapor/kg de ar seco

$W_{s_w}$  – Rácio de humidade em função da pressão de saturação da água

$d_i$  – Diâmetro da conduta, em m

$d_o$  – Diâmetro da conduta com isolamento, em m

$f_{i_{ar}}$  – Caudal de ar insuflado, em m<sup>3</sup>/s

$q_L$  – Carga térmica por geração de calor interna, em kJ/s

$\mu_{ref}$  – Viscosidade dinâmica de referência (0.171 x 10<sup>-5</sup> kg/m. s)

$\rho_{ar} = \rho$  – Densidade do ar, em kg/m<sup>3</sup>

$\rho_w$  – Densidade da água, em kg/m<sup>3</sup>

$h(s)$  – Rácio de ar húmido produzido pelo humidificador

$h(t)$  – Taxa de humidade produzida pelo humidificador

$A$  – Área das paredes da Sala, em m<sup>2</sup>

$C$  – Capacidade térmica da Sala, em kJ/K

$G$  – Produção de emissões de CO<sub>2</sub> por pessoa, em l/s

$L$  – Comprimento da conduta, em m

$P$  – Taxa de evaporação dos ocupantes da sala, em kg/s

$Q$  – Potência de perdas numa conduta, em W

$S$  – Número de *Sutherland* (110,4 K)

$U$  – Coeficiente de transmissão térmica, em W/m<sup>2</sup>.K

$d$  – Diâmetro da conduta (tubo), em m

$k$  – Condutibilidade térmica do ar, em W/m. K

$m$  – Massa volúmica da sala, em kg/m<sup>3</sup>

$n$  – Número de pessoas presentes na sala

$v$  – Velocidade do ar dentro da conduta, em m/s

$\alpha$  – Calor específico do ar insuflado, em kJ/kg. K

$\mu$  – Viscosidade dinâmica, em kg/m. s



## Acrónimos

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BAG – Bateria de Água Gelada

BAQ – Bateria de Água Quente

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

DB – Diagrama de Blocos

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EPS – Poliestireno Expandido Moldado

FC – *Free-Cooling*

GUI – *Graphic User Interface*

IDA – *Indoor Air*

ISO – *International Organization for Standardization*

LabVIEW – *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*

LAVAC – Laboratório de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

LV – Laboratórios Virtuais

O<sub>2</sub> – Oxigénio

PID – Controlo Proporcional, Integral e Derivativo

ppm – *Partes por milhão*

QAI – Qualidade de Ar Interior

RAN – Registo de Ar Novo

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SATEC – Sala para Testes de Equipamentos de Climatização

UE – União Europeia

UTA – Unidade de Tratamento de Ar

V3V – Válvula de três Vias

VI – *Virtual Instruments*



# 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho visa desenvolver uma aplicação em *software LabVIEW*, sob forma matemática (modelação), de todo o processo que decorre num sistema de Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) composto por uma Unidade de Tratamento de Ar (UTA) e uma Sala para Testes de Equipamentos de Climatização (SATEC).

Através da implementação deste processo será possível adquirir uma perspetiva teórica e minuciosa de como funciona uma vasta quantidade de variáveis dinâmicas, que são invisíveis e impercetíveis quando se coloca o sistema, em questão, em funcionamento. Estas variáveis, como por exemplo, a densidade do ar, a viscosidade dinâmica e cinemática, os coeficientes de transmissão térmica e até mesmo a humidade absoluta estão presentes para que se consigam obter as condições de temperatura e humidade pretendidas dentro de um espaço condicionado.

Basicamente, este trabalho, terá como finalidade criar uma aplicação que permita controlar as condições ambientais que interferem com o conforto de uma sala (temperatura e humidade).

## 1.1. Contextualização

A climatização moderna foi registada no início do século XX por *Willis Carrier* que desenvolveu este conceito. Tudo começou por uma má impressão do papel de um editor americano como consequência da instabilidade das condições climáticas (temperatura e humidade). Com este problema em mente, *Willis*, criou a primeira máquina de climatização que era capaz de controlar a humidade com a utilização de tubos frios. Mais tarde, as indústrias têxteis foram as primeiras a utilizarem um equipamento de climatização apto para controlar a temperatura e a humidade nos fios de algodão: a instabilidade da humidade faz variar a elasticidade dos fios têxteis.

Seguidamente, as indústrias de tabaco, laboratórios farmacêuticos e padarias não se deixaram ficar atrás e acompanharam esta tecnologia [Carrier, 2014].

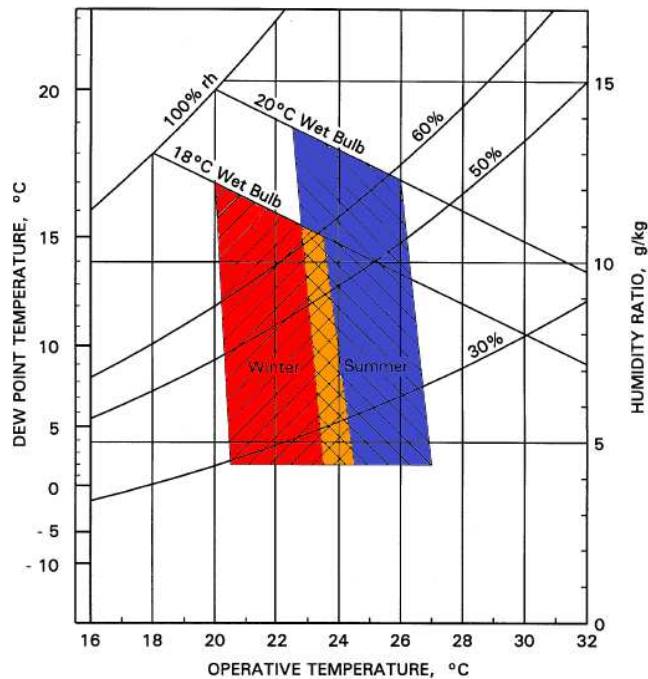
Hoje em dia, apesar de não estar documentado estatisticamente, existe uma grande quantidade de edifícios que possuem unidades de climatização, não só para a indústria mas, também, para conforto em espaços, nomeadamente, em edifícios de serviços.

A própria legislação portuguesa, através da Portaria n.º 349-D/2013, “estabelece os requisitos de conceção relativos à qualidade térmica da envolvente e à eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos, dos edifícios sujeitos a grande intervenção e dos edifícios existentes”. Ainda nesta Portaria, são definidos requisitos para os edifícios e as UTA's são equipamentos de AVAC que estão na maioria de projetos de edifícios de serviços, uma vez que é “obrigatória a instalação de um sistema de caudal de ar novo variável que permita o ajuste dos caudais em função da utilização e ocupação dos espaços” e, também, “os sistemas de climatização com potência instalada de climatização superior a 100 kW, dotados de ventilação mecânica que sirvam espaços com ocupação permanente”.

As UTA's permitem, através de um controlador eletrónico que as monitoriza e controla, obter valores de temperatura e humidade dentro de um determinado espaço conforme o que estiver predefinido no controlador eletrónico. Para que haja conforto térmico nestes espaços, os valores inseridos neste controlador poderão ser de 20°C para a estação de aquecimento (ou “estação convencional de aquecimento”, o período do ano a começar nos primeiros dez dias do mês de outubro, onde para cada localidade, a temperatura média diária é inferior a 15°C e com final nos últimos dez dias do mês de maio, em que a mesma temperatura continua inferior aos, já referidos, 15°C) e 25°C e 50% de humidade relativa para a estação de arrefecimento (ou “estação convencional de arrefecimento”, os meses de verão compreendidos entre junho e setembro), conforme os valores de referência definidos no Artigo 14 do Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril.

No que diz respeito ao conforto térmico, já enunciado algumas vezes, este não é apenas a definição dos valores, anteriormente, mencionados. Uma definição aceitável de conforto térmico é “uma condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico” [ASHRAE, 2001]. Apesar de ser uma definição bastante vaga, no que se refere, à condição da mente, esta evidencia corretamente que a perceção de conforto é um processo cognitivo que é influenciado por inúmeros processos físicos, fisiológicos, psicológicos, entre outros [ASHRAE, 2001].

De uma forma geral, o conforto ocorre quando a temperatura do corpo está dentro de limites reduzidos, a humidade da pele é baixa e o esforço fisiológico de regulação é mínimo [ASHRAE, 2001]. O Gráfico 1 representa, através de parte do diagrama psicrométrico, a zona de conforto para a estação de aquecimento (*Winter*) e estação de arrefecimento (*Summer*).



**Gráfico 1. Zonas de conforto para o inverno (a vermelho) e para o verão (a azul); zona comum a laranja [ASHRAE, 2001]**

De acordo com a Norma ISO7730 existem seis fatores primários para se definir o conforto térmico, embora haja outros fatores secundários que possam afetar este conforto, tais como o estado de saúde, o sexo, ambiente de trabalho e preferências individuais. Os seis fatores primários são:

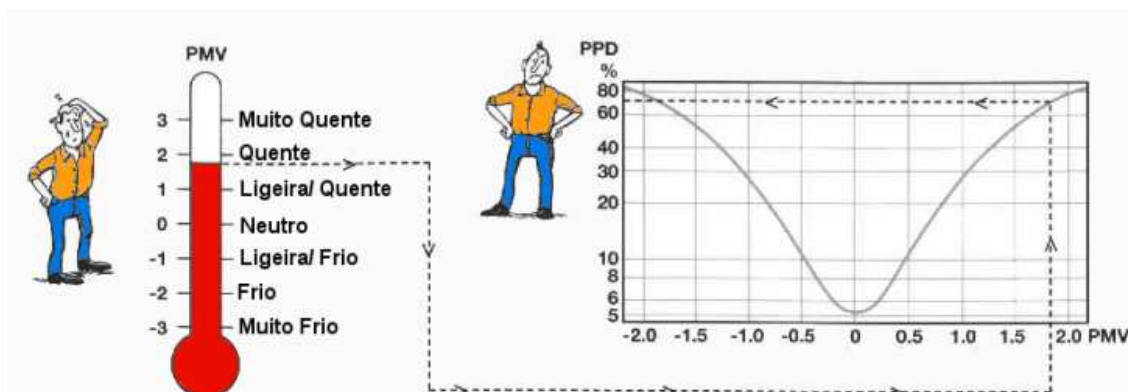
- Metabolismo;
- Vestuário;
- Temperatura do ar;
- Temperatura de radiação;
- Velocidade do ar;
- Humidade.

Quando estes fatores são estimados ou medidos, a sensação térmica do corpo, pode ser previsto por intermédio do cálculo do PMV (*Predicted Mean Vote* – número médio de votos previstos). O PMV é um índice que prevê o valor médio de votos de um largo número pessoas numa escala de sete níveis baseado no equilíbrio<sup>1</sup> térmico do corpo humano. A Tabela 1 apresenta os 7 níveis da sensação térmica.

**Tabela 1 Escala de sensação térmica**

+3	Muito Quente
+2	Quente
+1	Ligeiramente Quente
0	Neutro
-1	Ligeiramente frio
-2	Frio
-3	Muito Frio

Por outro lado, o desconforto térmico ou insatisfação térmica pode ser prevista pela percentagem de pessoas que se sentem com muito calor ou com muito frio num determinado ambiente. O PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied* – percentagem de insatisfação prevista) pode ser obtido por intermédio do PMV. A Figura 1 representa a relação entre estas duas previsões



**Figura 1. Relação entre o PPD e o PMV**

A evidência científica demonstra que o ser humano produz calor devido ao seu metabolismo. Este pode ser maior ou menor mediante a atividade que está a exercer.

<sup>1</sup> Balanço térmico é o equilíbrio entre a produção de calor interna do corpo e as perdas desse calor com o ambiente.

Para um adulto, em repouso, o calor produzido é cerca de 100 W, isto é, cerca de 58,1 W/m<sup>2</sup><sup>2</sup> de área superficial [ASHRAE, 2001], também conhecido como 1 met: unidade que expressa a taxa de metabolismo por unidade de área de *DuBois*. A Tabela 2 apresenta a quantidade de calor produzida pelo ser humano, consoante a atividade que está a desempenhar e a Equação 1 estima a área superficial baseado no peso e altura da pessoa, segundo *DuBois*.

A não esquecer que, inerente a esta produção de calor está associada uma taxa de humidade produzida pela expiração do ser humano. Esta taxa pode ser estimada segundo a expressão da Equação 2, em função da temperatura a que se está exposto e do rácio de humidade inspirada [ASHRAE, 2009].

---

<sup>2</sup> Valor baseado na média de indivíduos do sexo masculino da Europa, com 1,8 m<sup>2</sup> de área superficial.

**Tabela 2** Geração de calor típico do metabolismo do ser humano para várias atividades [ASHRAE, 2001]

	W/m <sup>2</sup>	met*
<b>Resting</b>		
Sleeping	40	0.7
Reclining	45	0.8
Seated, quiet	60	1.0
Standing, relaxed	70	1.2
<b>Walking (on level surface)</b>		
3.2 km/h (0.9 m/s)	115	2.0
4.3 km/h (1.2 m/s)	150	2.6
6.4 km/h (1.8 m/s)	220	3.8
<b>Office Activities</b>		
Reading, seated	55	1.0
Writing	60	1.0
Typing	65	1.1
Filing, seated	70	1.2
Filing, standing	80	1.4
Walking about	100	1.7
Lifting/packing	120	2.1
<b>Driving/Flying</b>		
Car	60 to 115	1.0 to 2.0
Aircraft, routine	70	1.2
Aircraft, instrument landing	105	1.8
Aircraft, combat	140	2.4
Heavy vehicle	185	3.2
<b>Miscellaneous Occupational Activities</b>		
Cooking	95 to 115	1.6 to 2.0
Housecleaning	115 to 200	2.0 to 3.4
Seated, heavy limb movement	130	2.2
<b>Machine work</b>		
sawing (table saw)	105	1.8
light (electrical industry)	115 to 140	2.0 to 2.4
heavy	235	4.0
Handling 50 kg bags	235	4.0
Pick and shovel work	235 to 280	4.0 to 4.8
<b>Miscellaneous Leisure Activities</b>		
Dancing, social	140 to 255	2.4 to 4.4
Calisthenics/exercise	175 to 235	3.0 to 4.0
Tennis, singles	210 to 270	3.6 to 4.0
Basketball	290 to 440	5.0 to 7.6
Wrestling, competitive	410 to 505	7.0 to 8.7

$$A_D = 0,202 \cdot \text{massa}^{0,425} \cdot \text{altura}^{0,725}$$

**Equação 1** Cálculo da área superficial do corpo humano segundo *DuBois* [DUBOIS, 1916]

Onde:

$A_D$  – Área superficial de *DuBois*, em m<sup>2</sup>

*massa* – Peso da pessoa, em kg

*altura* – Altura da pessoa, em m

$$W_{ex} = 0,0277 + 0,000065.T + 0,2.W$$

**Equação 2 Cálculo do rácio de humidade expirada [ASHRAE, 2009]**

Em que:

$W_{ex}$  – Rácio de humidade expirada pela pessoa, em kg de vapor/kg ar seco

$W$  – Rácio de humidade inspirada pela pessoa, em kg de vapor/kg ar seco

$T$  – Temperatura a que pessoa está sujeita (temperatura da sala), em °C

No entanto, esta última equação não é suficiente para se saber o caudal de vapor de água expirado por pessoa. Com o intuito de solucionar este problema, recorreu-se à Equação 3 e Equação 4. A primeira equação devolve a taxa de ventilação pulmonar consoante o metabolismo ( $M$ ) e a área superficial de *DuBois*, onde  $K_{res}$  é constante de proporcionalidade, com o valor de  $1,43E^{-3} \text{ kg/kJ}$  [ASHRAE, 2009] Sendo que a taxa de vapor de água expirado é dado pela segunda equação

$$\dot{m}_{res} = K_{res}.M.A_D$$

**Equação 3 Taxa de ventilação pulmonar [ASHRAE, 2009]**

$$\dot{m}_{w,res} = \frac{\dot{m}_{res}.(W_{ex} - W_s)}{A_D}$$

**Equação 4 Taxa de vapor de água expirado [ASRAE, 2009]**

A nível de controlo, para que se possa monitorizar e regular o conforto térmico, este necessita de entradas que são facultados pela modelação matemática dos vários componentes que constituem a UTA. A descrição da modelação dos componentes será desenvolvida no capítulo 2.1 deste trabalho.

Neste âmbito, falta referir que a modelação matemática entende-se como um processo que permite descrever matematicamente o comportamento de um sistema real. São, particularmente, utilizados em ciências naturais, em ciências sociais e nos variados campos da engenharia.

Os modelos matemáticos para a modelação de sistemas podem assumir variadíssimas formas, tais como, os modelos de sistemas dinâmicos, modelos estatísticos, modelos teóricos e, os muito utilizados, sistemas com equações diferenciais. Estes modelos matemáticos são compostos por variáveis. Entre elas destacam-se seis grupos básicos utilizados na modelação:

1. As variáveis de entrada – são dados que, anteriormente, conhecidos servem de entrada para um sistema;
2. As variáveis de decisão – são variáveis que definem a aceitação ou não de determinadas decisões;
3. As variáveis de estado – são aquelas que mostram as decisões ou o estado de um sistema, por exemplo;
4. As variáveis aleatórias – são variáveis que atribuem um valor numérico a cada resultado individual de uma experiência;
5. As variáveis exógenas – são determinadas por ocorrências exteriores ao sistema, pelo que são dados que se aceitam para estudar o desempenho da variável explicada;
6. As variáveis de saída – dados que, a partir das variáveis de entrada juntamente com as outras, dão uma determinada saída ou resposta do sistema;

Qualquer que seja a forma ou conjunto de formas utilizadas, é necessário, previamente, definir-se o sistema real que se quer estudar e identificar o problema.

## **1.2. Motivação e Objetivo sobre o presente trabalho**

A motivação para a realização deste trabalho, prendeu-se com a necessidade de se conseguir simular ensaios reais numa forma virtual, ou seja, através da aplicação desenvolvida poder-se-á simular condições de conforto, qualidade do ar interior (QAI), eficiências energéticas e, até mesmo, reduções de consumos elétricos para climatizar um determinado espaço. Com recurso a esta *aplicação* poderá, também, ser possível recriar estas simulações à distância, sob plataformas web, designadas de Laboratórios Virtuais (LV). Os LV permitem que professores, estudantes e investigadores na área

de laboratórios consigam reproduzir ensaios virtuais, de ensaios reais, através da internet sem que, para tal, se tenham que deslocar a um laboratório.

O lab2go é um projeto que tem como objetivo reunir LV's numa plataforma web numa perspectiva de ensino, treino e formação [LAB2GO, 2014]. Por outro lado, a realização destes ensaios de forma virtual, traduz-se em redução de consumos energéticos uma vez que, não há a necessidade de ligar equipamentos reais, cujos consumos elétricos possam ser significativos.

A redução dos consumos elétricos devido à utilização dos LV, podem contribuir para ajudar nas reduções de emissões de CO<sub>2</sub> permitindo que o programa designado por “20-20-20” ou “*Energy and Climate Change Package*” tenha sucesso. Este programa consiste, principalmente, na redução em 20% as emissões de gases de efeito de estufa em relação aos níveis de 1990, no aumento de 20% da produção energética da UE a partir de fontes renováveis e na melhoria em 20% da eficiência energética da UE [CE, 2014]. Ainda neste âmbito, é possível simular-se várias situações para que se consiga uma redução do consumo energético e eficiência do equipamento. Segundo CASTRO [CASTRO, 2014], o controlo de *setpoint* e variação dos ventiladores em função dos sensores de CO<sub>2</sub>, aplicado a grandes edifícios de serviços, traduzem-se em reduções de consumos de 18,78MWh, permitindo uma poupança de 1975,60€ anuais.

Para o desenvolvimento desta aplicação, foi sugerido o sistema de AVAC situado no Laboratório de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (LAVAC), na sala F108, do edifício F do ISEP, uma vez que este já se encontra instalado e pronto a utilizar. Este, é composto por uma UTA, cujas características de fabrico são desconhecidas, pela SATEC e por uma rede de condutas circulares, que faz o transporte do ar entre a SATEC e a UTA.

### **1.3. Organização da Dissertação**

Após este capítulo onde foi descrita uma breve introdução, proceder-se-á no capítulo 2, à apresentação teórica da modelação do sistema AVAC em estudo com uma descrição de cada componente e os passos que levaram à concretização da modelação de cada um desses componentes. Também será desenvolvida a teoria de cada destes e apresentados os valores das suas características.

De seguida, no 3º capítulo, será apresentado o desenvolvimento do capítulo anterior no *software LabVIEW*, fornecendo explicações de alguns pormenores importantes em

alguns dos componentes do equipamento. No capítulo 4 serão apresentados os resultados de simulações e a análise destes.

Posteriormente, no 5º capítulo poderão ser encontradas novas funcionalidades implementadas na aplicação.

No 6º capítulo é apresentada a conclusão deste trabalho, seguidamente dos trabalhos que se poderão desenvolver futuramente.

As referências bibliográficas que permitiram a elaboração deste relatório, estão disponíveis no 7º capítulo.

No 8º capítulo estão todos os documentos que foram considerados para anexo e que darão apoio a várias partes deste trabalho.

Por fim, para quem tiver intenção de efetuar algumas simulações na aplicação desenvolvida terá oportunidade de encontrar um manual de utilização no capítulo 9.

## 2. MODELAÇÃO MATEMÁTICA DO SISTEMA DE AVAC

Iniciando a sequência de etapas demonstrado na Figura 10, procurou-se definir em que consiste o problema.

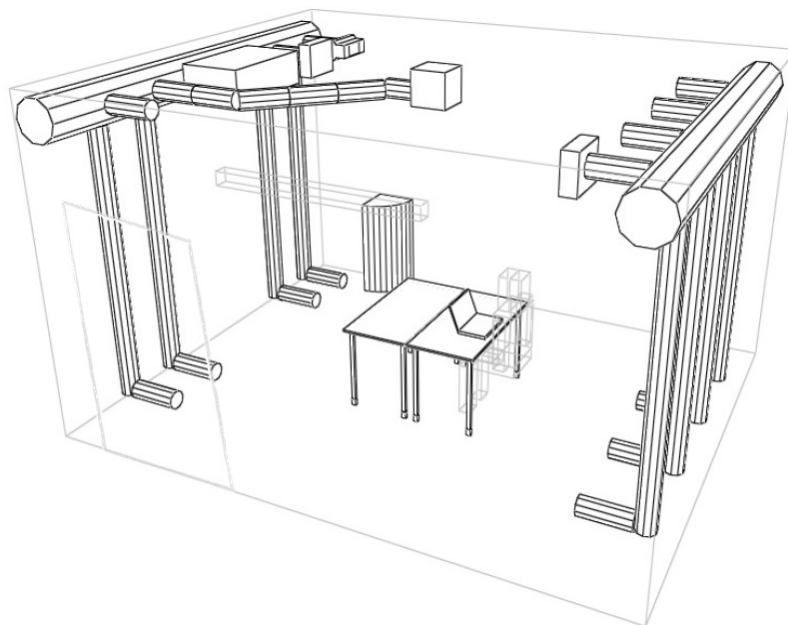
Iniciou-se o processo pela localização do equipamento e da sala e verificou-se que se encontram dentro do LAVAC. A Figura 2 apresenta uma fotografia da UTA que serve como base de estudo e na Figura 3 um esboço da geometria interna da sala.

Tendo em conta que a UTA não possui qualquer chapa de características houve, então, a necessidade de se realizar medições e verificações de componentes e estrutura do equipamento para se determinarem as características mediante cálculos e assim se proceder à sua modelação.

No ponto 2.2 estão descritas as verificações e medições efetuadas, com apresentação de alguns resultados dos cálculos executados.



**Figura 2. Fotografia da UTA**



**Figura 3. Geometria interna da SATEC [Monteiro, 2013]**

## 2.1. Componentes da UTA

Efetuada uma inspeção visual à UTA utilizada como base para este trabalho, verificou-se que esta é constituída pelos seguintes componentes:

- Caixa de mistura de Ar;
- Filtros de entrada de Ar;
- Bateria<sup>3</sup> de água gelada;
- Bateria de água quente;
- Humidificador;
- Ventiladores Centrífugos<sup>4</sup>;
- Atenuadores acústicos;
- Conduatas.

Dos componentes apresentados foi realizada a modelação da caixa de mistura, das duas baterias de água, do humidificador e das conduatas. Para os ventiladores, foram feitas medições de perdas de carga ( $\Delta P$ ) para diferentes caudais de forma a obter-se a curva característica dos mesmos e deste modo conseguir calcular-se os consumos elétricos com base nas informações apresentadas nas chapas de característica dos motores.

## 2.2. Verificações e Medições

De acordo com o que já foi referido anteriormente, perante a ausência da chapa de características da UTA, iniciou-se a leitura de temperaturas de ar e de caudais nas baterias de água gelada e de água quente. Estas leituras permitiram o cálculo das potências destes dois componentes, assim como, as suas eficiências de transferência de calor ( $\varepsilon$ ). Neste processo, também foi medido o valor do caudal de ar.

Para se proceder às leituras mencionadas, foram concretizados dois ensaios. O primeiro ensaio foi realizado a 07/01/2014 com o objetivo de obter registos das

---

<sup>3</sup> Vulgarmente conhecido por Baterias de Água, este componente é um permutador de transferência de calor que consiste na transferência de calor entre dois fluidos, sem contacto físico entre eles, e que permite o controlo de temperatura de um desses fluidos.

<sup>4</sup> Turbina em caracol acionada através de correias por motores elétricos

temperaturas apenas com o funcionamento da bateria de água gelada (BAG). O segundo ensaio, foi conseguido no dia posterior, no qual foram recolhidos os dados com a bateria de água quente (BAQ).

Para a BAG, existe um *chiller*<sup>5</sup> que arrefece a água até aos 7°C, que é bombeada até à entrada da bateria de água na UTA. À entrada desta existe uma válvula de três vias (V3V), ilustrada na Figura 5, que pode fazer variar o caudal de água dentro da bateria. Esta variação é feita por meio de um atuador eletrónico que está acoplado na V3V (ver exemplo desta interligação na Figura 4).

Este processo é similar no funcionamento da BAQ. A única divergência prende-se com a existência de uma caldeira<sup>6</sup> elétrica que aquece a água à temperatura de 80°C.

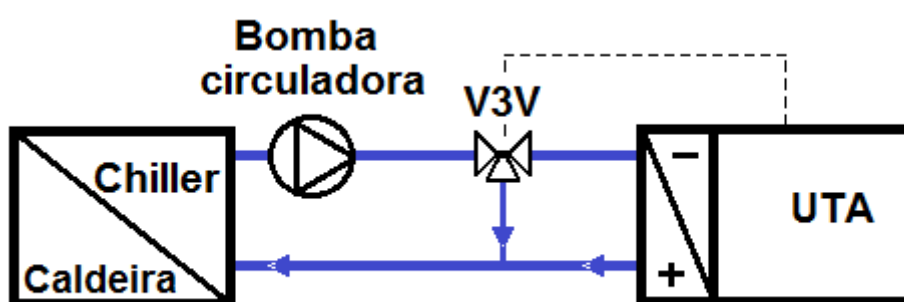


Figura 4. Interligação entre o Chiller/Caldeira e as baterias da UTA

A leitura dos caudais e temperaturas de entrada e de saída de água, de ambas as baterias, foram obtidas com contadores de entalpia, presentes na tubagem dos dois componentes de transferência de calor. Na Figura 6 está ilustrada uma foto do contador de entalpia utilizado que devolveu as leituras das temperaturas de entrada e saída de água das baterias, assim como, o respetivo caudal.

---

5 Chiller é um equipamento de AVAC que, através de um fluido frigorígeno num circuito frigorífico, é capaz de arrefecer outro fluido a uma determinada temperatura, neste caso, a água a uma temperatura de 7°C

6 Caldeira é um equipamento de AVAC que, através de um combustível, normalmente gás natural ou gasóleo, é capaz de aquecer outro fluido a uma determinada temperatura, neste caso, a água a uma temperatura de 80°C.



**Figura 5. Atuador e válvula de três vias**



**Figura 6. Contador de Entalpia Schlumberger Thermiflu**

Nestas medições, foram utilizados os seguintes equipamentos de medida:

- Kimo AMI301, (ver Figura 7) com acessório de fio quente, para medição do caudal de ar no interior da conduta. Precisão:  $\pm 3\%$  da leitura  $\pm 0,03$  m/s para o leitor e  $\pm 3\%$  da leitura  $\pm 0,1$  m/s para o acessório.
- Contador de Entalpia Schlumberger Thermiflu Typ444 para medição dos caudais de água das baterias e para medição das temperaturas de água entre a entrada e saída na BAG e de água quente.
- Sondas de temperatura SATCHWELL DDU1803, visível na Figura 8, incorporadas na própria UTA: uma sonda no ar de entrada (ar novo) e uma após as baterias de água (ar de mistura).

Na Tabela 12 do Anexo A encontram os dados da BAG, na Tabela 13 os dados da BAQ e, por fim, na Tabela 14 o caudal de água.



**Figura 7. KIMO AMI301 com acessório de fio quente**



**Figura 8. Sonda Temperatura SATCHWELL DDU1803**

Após estas medições foi, então possível calcular a potência das baterias e as suas eficiências de transferência de calor.

Para o cálculo das potências foi utilizada a Equação 5 de modo a obter o valor máximo do diferencial de temperatura na bateria. Posteriormente, calculou-se a potência máxima de transferência de energia através da Equação 6, onde o valor de  $C_{min}$  é o menor valor entre as capacidades térmicas do ar ( $C_a$ ) e da água ( $C_w$ ), ou seja, se  $C_a$  for menor que  $C_w$ , então  $C_{min}$  terá o valor de  $C_a$  ( $C_{min} = C_a$ ), caso contrário  $C_{min} = C_w$ .

Onde  $C = \dot{m} \cdot Cp$  [YUNUS A, 2002].

Conhecidos os valores de  $\Delta T_{max}$  e de  $Q_{max}$ , procedeu-se ao cálculo da potência atual de cada uma das baterias com o auxílio da Equação 7.

Desta forma é, agora, possível obter os valores das eficiências de transferência de calor com a Equação 8.

$$\Delta T_{max} = T_{a,in} - T_{w,in}$$

**Equação 5** Diferencial máxima de temperatura (a – ar; w - água) [YUNUS A, 2002]

$$Q_{max} = C_{min} \cdot \Delta T_{max}$$

**Equação 6** Potência máxima de transferência de energia [YUNUS A, 2002]

$$Q = C_c \cdot (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad \text{ou} \quad Q = C_h \cdot (T_{h,in} - T_{h,out})$$

**Equação 7** Potência atual de transferência de energia (eq. da esquerda para água gelada e eq. da direita para água quente) [YUNUS A, 2002]

Onde  $C_c$  e  $C_h$  são as capacidades térmicas da água gelada da água quente, respetivamente.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{\text{potência atual de transferência de energia}}{\text{potência de transferência de energia máxima}}$$

**Equação 8** Eficiência de transferência de calor [YUNUS A, 2002]

As potências calculadas com as equações apresentadas, anteriormente, são de 1,427 kW e 11,02 kW. Quanto às eficiências de transferência de calor são 94,88% e 65,05%, para as baterias de água gelada e água quente, respetivamente.

De seguida, efetuou-se o cálculo da capacidade térmica de cada uma das baterias, com recurso à Equação 9, sendo que para tal foi necessário medir o volume total do fluido que percorre nos tubos de cobre de cada uma das baterias.

Começando pela bateria de água gelada, esta contém três *rows*<sup>7</sup> e oito *fiadas*<sup>8</sup> com um comprimento por tubo de 0,455 m e diâmetro exterior de 16 mm. O volume, para este caso, é de  $4,39 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ . Após estes dados, foi possível efetuar o cálculo previsto obtendo o resultado de 18,41 kJ/K<sup>9</sup>.

---

<sup>7</sup> *Rows*, do inglês, colunas. São o número que tubos existentes na horizontal, sendo que 1 *row* equivale a 1 par de tubos.

<sup>8</sup> *Fiadas*, é o número de tubos existentes na vertical.

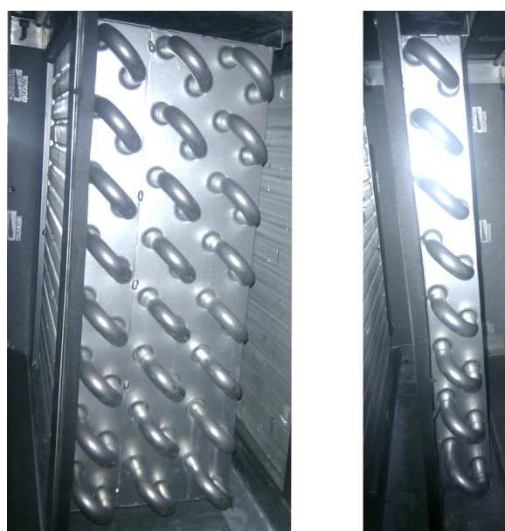
<sup>9</sup> Foi utilizada uma densidade da água de 999,7 kg/m<sup>3</sup> e um calor específico de 4,194kJ/kg. K, com base numa temperatura de água de 10°C.

Quanto à BAQ, é composta por um row e oito fiadas com o mesmo comprimento e diâmetro de tudo da bateria anterior. A capacidade térmica desta bateria resultou em 5,97 kJ/K<sup>10</sup>, provenientes de um volume total do tubo de 1,46x10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>.

Nas imagens da Figura 9 está presente o número de rows e de fiadas para as baterias de água gelada e de água quente, respetivamente.

$$C_{bat} = m_w \cdot Cp_w = \rho_w \cdot V_{tubo} \cdot Cp_w$$

**Equação 9** Expressão de cálculo para capacidade térmica da bateria –  $C_{bat}$



**Figura 9.** Bateria de água gelada à esquerda e de água quente à direita

Em seguida, procedeu-se à estrutura da UTA. Nas modelações das baterias, é necessário a inserção do coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) da UTA, pois existem perdas pelas paredes desta, para o exterior.

Na inspeção das paredes da UTA pôde verificar-se que são construídas por uma chapa de liga de alumínio com cerca de 0,5 mm de espessura ( $e$ ) e uma placa de poliestireno expandido moldado (EPS) com um  $e$  de 20 mm.

A chapa de alumínio tem uma condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) de 160 W/m. K e a placa de EPS tem um  $\lambda = 0,037$  W/m. K [SANTOS, 2006]. Sabendo que a UTA se encontra dentro do Laboratório de AVAC, a resistência térmica superficial é considerada de

---

<sup>10</sup> Foi utilizada uma densidade da água de 971,8 kg/m<sup>3</sup> e um calor específico de 4,197kJ/kg. K, com base numa temperatura de água de 80°C.

interior, logo obtém o valor de  $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  [SANTOS, 2006]. Com estes dados foi possível proceder-se ao cálculo do  $U$  com a ajuda da Equação 10, obtendo-se um valor de  $1,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

$$U = \frac{1}{R_{se} + \frac{e}{\lambda} + R_{si}}$$

**Equação 10 Cálculo de U [SANTOS, 2006]**

O posicionamento das baterias é a meio do *deck*<sup>11</sup> inferior da UTA, sendo este o módulo que servirá para o cálculo do  $U_{uta}$ . Este módulo que é, geometricamente, um paralelepípedo tem dimensões de  $0,75 \times 0,56 \times 0,63$  [comprimento x largura x altura] (valores em metros). Na Figura 61 do Anexo D está representado em esboço da UTA com as suas dimensões. Deste bloco, apenas quatro áreas serão utilizadas: a área inferior e superior e as duas laterais; uma vez que a frontal e traseira são as de passagem do ar. Tendo em conta as medidas e as paredes mencionadas, efetuando os devidos cálculos, chega-se a uma área total de  $1,79 \text{ m}^2$  que corresponde a um  $U_{uta}$  de  $2,23 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

Relativamente ao humidificador, verificou-se que é um humidificador adiabático (explicado no ponto 2.3.2.4), como tal é composto por um favo em celulose cuja densidade varia entre os  $1220$  e os  $1340 \text{ kg/m}^3$  e o calor específico é de  $1,548 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ . [ENGINEERINGTOOLBOX, 2014].

Com estes dados foi possível calcular-se a capacidade térmica do humidificador, sabendo que este mede  $0,4 \times 0,1 \times 0,585$  [comprimento x largura x altura] (em metros) e que o volume da celulose é de cerca de  $\frac{1}{10}$  do volume do humidificador. Aplicando a Equação 9 a este caso, obtemos um  $C_h = 4,85 \text{ kJ/K}$ . No que se refere, ao coeficiente de transmissão térmica do humidificador ( $U_h$ ), é utilizada a área de contacto deste componente com a UTA, sendo que este contacto é feito em 4 lados: o topo, a base e as duas laterais. De acordo, com o mencionado, anteriormente, a UTA tem um  $U = 1,25 \text{ W/m}^2$ , deste modo o  $U_h$  obtém o valor de  $1,25 \times 0,197 = 0,24625 \text{ W/m}^2$ , onde a área de contacto da UTA com o humidificador é  $2 \times (0,4 \times 0,1) + 2 \times (0,585 \times 0,1) = 0,197 \text{ m}^2$ , referente à soma das áreas das laterais com o topo e base.

---

<sup>11</sup> Parte inferior da UTA correspondendo à insuflação

No que diz respeito à SATEC os valores de  $U$  das paredes estão representados na Tabela 15 do Anexo B, cujo valor utilizado foi de  $0,284 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , referente à média dos valores presentes na Tabela 16.

### 2.3. Modelação

Para traduzirmos uma situação real num modelo matemático, é preciso percorrer uma sequência de etapas, conforme se pode verificar no fluxograma da Figura 10.

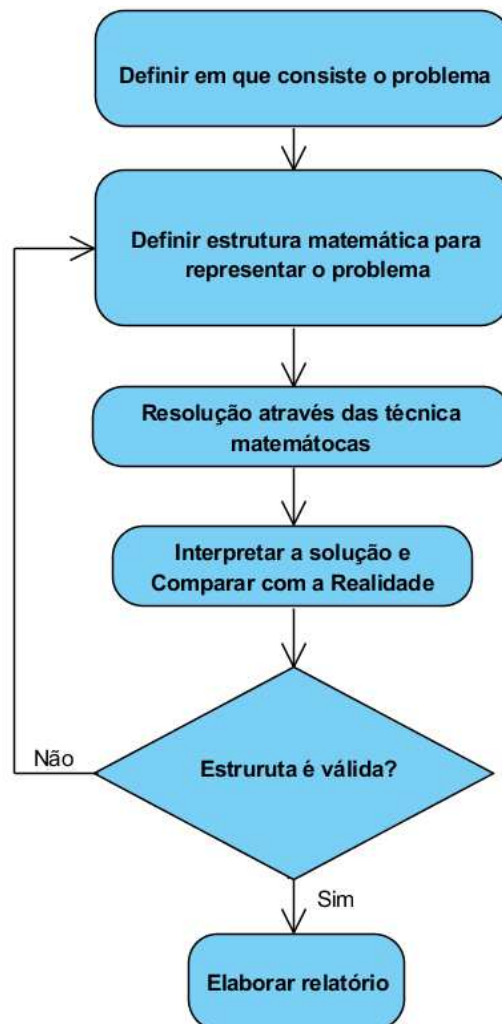


Figura 10. Sequência de etapas a percorrer

### 2.3.1 Modelação da Sala

Na modelação da SATEC foi utilizada uma equação diferencial de primeira ordem do balanço térmico da mesma, presente na Equação 11, assim como a respetiva equação diferencial do balanço de massa.

$$C \frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha(T_i - T_s) + U \cdot A(T_o - T_s) + q_L \pm Q_{ie}$$

$$V_{sala} \frac{\partial W_s}{\partial t} = f i_{ar}(W_i - W_s) + \frac{P(t)}{\rho_{ar}} \cdot n$$

**Equação 11** Balanço térmico e balanço de massa da sala [YAMAKAWAL, et al., 2006], [TASHTOUSH, 2004]

Onde,

$$C = m \cdot C p_{sala} = \rho_{T_s} \cdot V_{sala} \cdot C p_{ar}$$

$$\alpha = f i_{ar} \cdot \rho_{T_i} \cdot C p_{ar}$$

Desenvolvendo as expressões da Equação 11, para o balanço térmico e de balanço de massa da sala, vem:

$$C \frac{\partial T_s}{\partial t} + T_s(U \cdot A + \alpha) = \alpha \cdot T_i + U \cdot A \cdot T_o + q_L \pm Q_{ie}$$

$$V_{sala} \frac{\partial W_s}{\partial t} + f i_{ar} \cdot W_s = f i_{ar} \cdot W_i + \frac{P(t)}{\rho_{ar}} \cdot n$$

**Equação 12** Desenvolvimento da Equação 11

Desta forma, poder-se-á aplicar a Transformada de Laplace, que permite uma representação de sinais no domínio das frequências em função de uma variável 's', e obter as equações seguintes:

$$T_s(s) = \frac{\alpha \cdot T_i(s) + U \cdot A \cdot T_o(s) + q_L(s) \pm Q_{ie}(s)}{Cs + U \cdot A + \alpha}$$

$$W_s(s) = \frac{1}{V_s s + f i_{ar}} \cdot \left( f i_{ar} \cdot W_i(s) + \frac{P(s)}{\rho_{ar}} \cdot n \right)$$

**Equação 13** Aplicação da Transformada de Laplace à Equação 12

Para simplificar e, posteriormente, implementar a expressão anterior num diagrama de blocos (DB) atribuíram-se as letras  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  à equação do balanço térmico, conforme apresentado na seguinte equação:

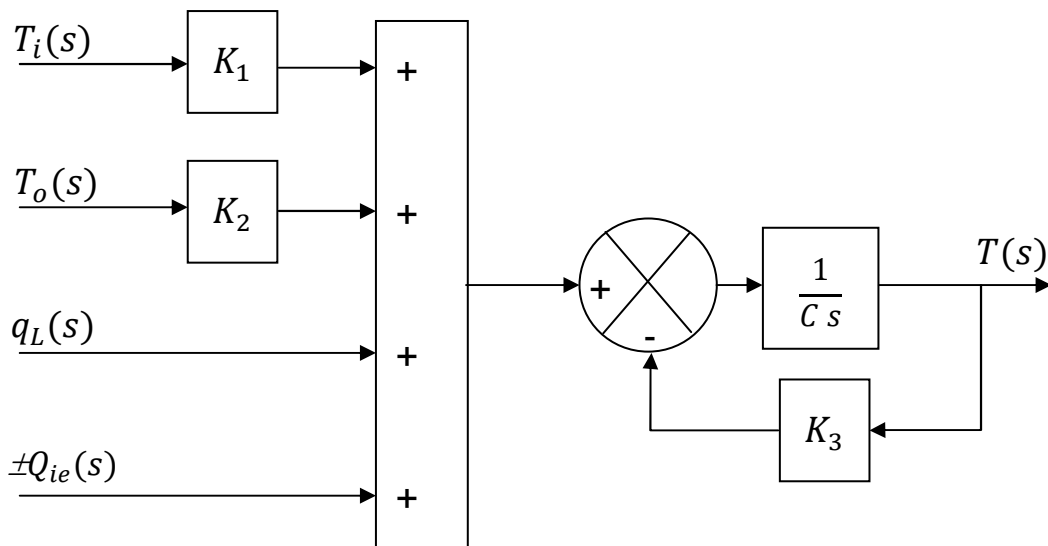
$$T_s(s) = \frac{K_1 \cdot T_i(s) + K_2 \cdot T_o(s) + q_L(s) \pm Q_{ie}(s)}{Cs + K_3}$$

**Equação 14** Simplificação da expressão de temperatura da Equação 13

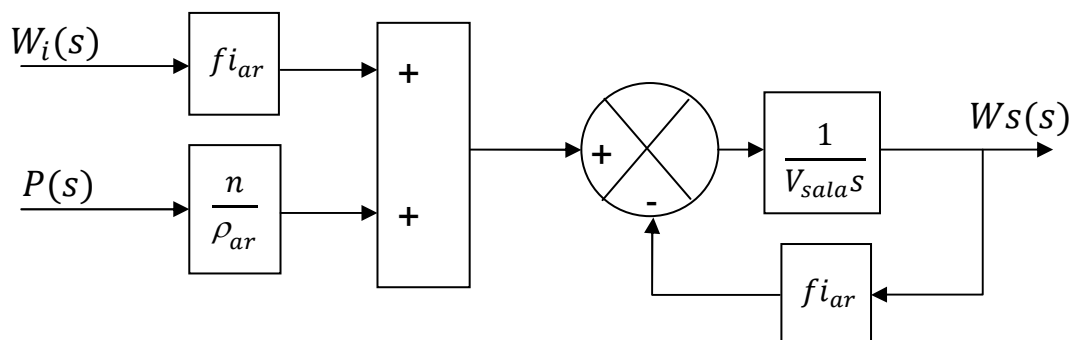
Com os valores de:

$$K_1 = \alpha, K_2 = U \cdot A \text{ e } K_3 = U \cdot A + \alpha$$

Transformando as equações da sala em sistemas de DB, obtém-se:



**Figura 11.** Diagramas de blocos da temperatura da Equação 14



**Figura 12.** Diagramas de blocos do rácio de humidade da Equação 14

Assim, fica concluída a modelação do balanço térmico e do rácio de humidade ( $W_s$ ) da SATEC.

### 2.3.2 Modelação da UTA

#### 2.3.2.1 Modelação da caixa de mistura de ar

Este componente é, hoje em dia, muito utilizado neste tipo de equipamentos. Permite que o ar extraído de um determinado espaço seja aproveitado para retornar ao mesmo, ou seja, as condições do ar, em termos de temperatura e humidade, que saem do espaço já climatizado é aproveitado para voltar ao mesmo espaço. A caixa de mistura de ar poderá misturar ou não o ar extraído com o ar exterior e, desta forma permite poupar-se energia no aquecimento e/ou arrefecimento, pois não há necessidade de aquecer e/ou arrefecer o ar desse espaço desde a temperatura exterior até ao desejado: a temperatura da mistura do ar é superior ou inferior à temperatura exterior, consoante o equipamento estiver em modo aquecimento ou arrefecimento, respetivamente.

Uma vez que, o processo da mistura do ar exterior com o ar de retorno do espaço ocorre sobre condições estáveis e adiabáticas [ASHRAE, 2009], a modelação deste componente é efetuado através do balanço de massa, da seguinte forma:

$$\dot{m}_m \cdot C_{p_{ar}} \cdot T_m = \dot{m}_e \cdot C_{p_{ar}} \cdot T_e + \dot{m}_o \cdot C_{p_{ar}} \cdot T_o$$

**Equação 15** Balanço de massa da caixa de mistura [TASHTOUSH, 2004]

Onde,

$$\dot{m}_m = \dot{m}_e + \dot{m}_o$$

De acordo com o definido pela ASHRAE [ASHRAE, 2009], representado pelo esquema da Figura 13.

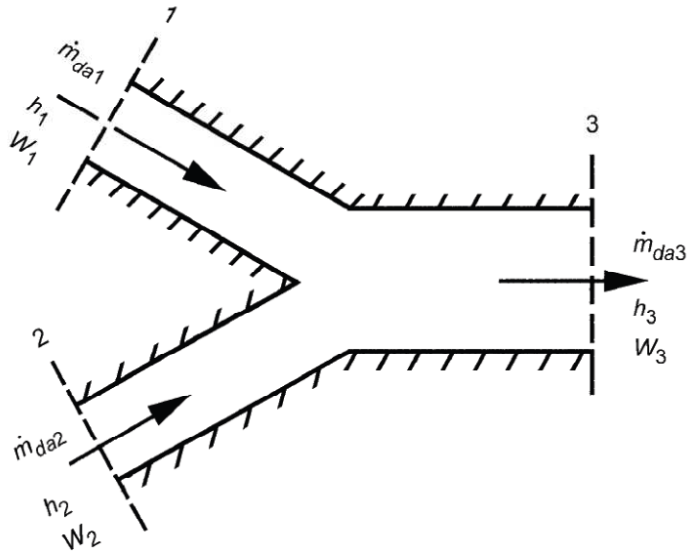


Figura 13. Mistura de duas correntes de ar úmido [ASHRAE, 2009]

Simplificando a Equação 15 e desenvolvendo de forma análoga para o rácio de humidade. As expressões estão representadas na Equação 16.

$$T_m = \frac{\dot{m}_e \cdot T_e + \dot{m}_o \cdot T_o}{\dot{m}_e + \dot{m}_o}$$

$$W_m = \frac{\dot{m}_e \cdot W_e + \dot{m}_o \cdot W_o}{\dot{m}_e + \dot{m}_o}$$

Equação 16 Temperatura e Rácio de humidade da mistura

Ao aplicar a transformada de Laplace às expressões da Equação 16, obtém-se:

$$T_m(s) = \frac{\dot{m}_e \cdot T_e(s) + \dot{m}_o \cdot T_o(s)}{\dot{m}_e + \dot{m}_o}$$

$$W_m(s) = \frac{\dot{m}_e \cdot W_e(s) + \dot{m}_o \cdot W_o(s)}{\dot{m}_e + \dot{m}_o}$$

Equação 17 Aplicação da Transformada de Laplace na Equação 16

Assim, o respetivo DB para a Temperatura é:

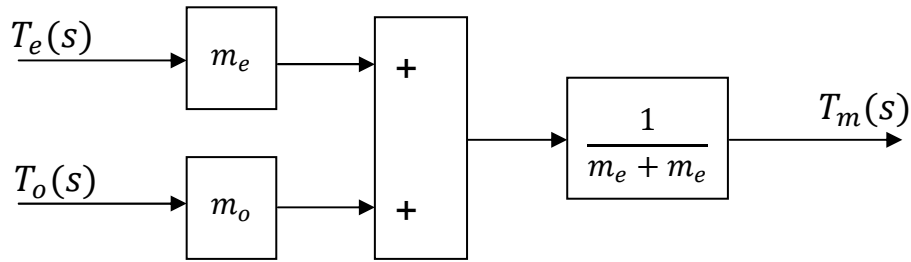


Figura 14. DB para a Temperatura da Equação 17

E o DB para o rácio de humidade é:

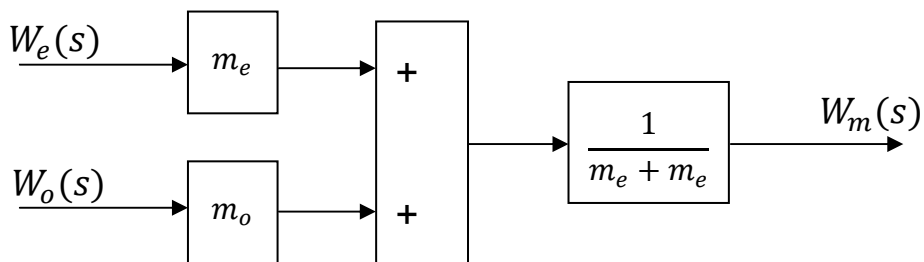


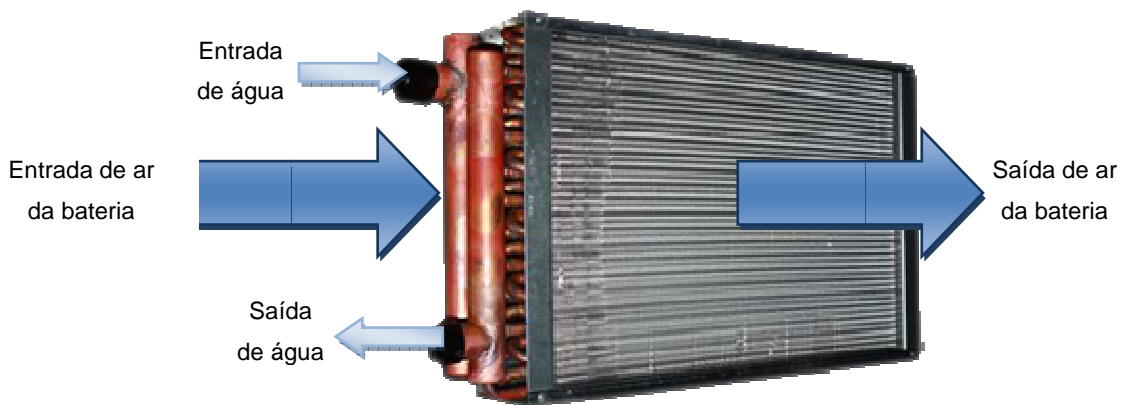
Figura 15. DB para a Humidade da Equação 17

### 2.3.2.2 Modelação da bateria de água gelada

A BAG é um componente da UTA onde o ar atravessa e é arrefecido ou aquecido por convecção forçada<sup>12</sup> devido ao seu contacto com os tubos (onde a água circula) e com o alhetado, em alumínio. Na Figura 16 está um exemplo de uma bateria, utilizada na UTA, onde se pode visualizar onde o ar atravessa e onde a água circula para que possa haver a transferência de calor entre estes dois fluidos sem contacto entre eles. Normalmente, é construído com um ou mais circuitos em tubo de cobre percorridos por alhetas de alumínio.

---

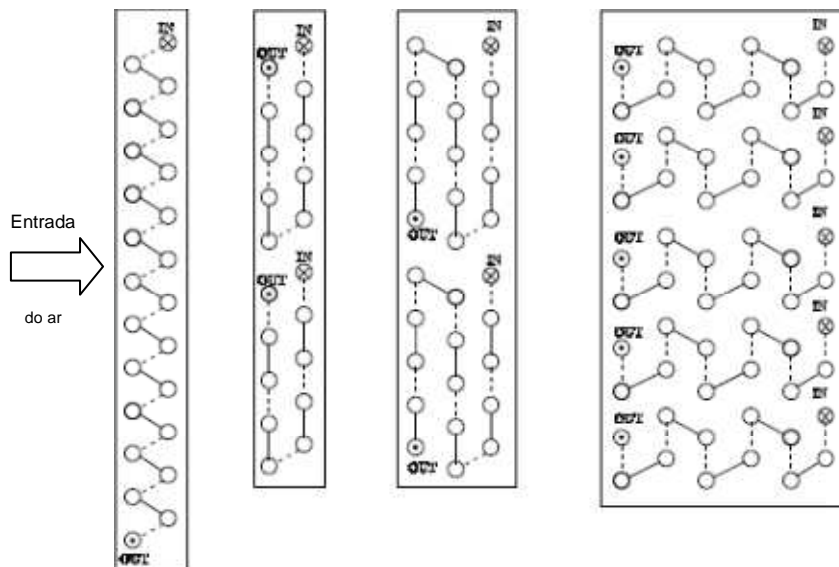
<sup>12</sup> Convecção forçada é um mecanismo ou tipo de transporte de calor no qual o movimento do fluido é gerado por uma fonte externa (como uma bomba, ventilador, dispositivo de sucção, etc.).



**Figura 16. Bateria de água de uma UTA**

O tubo de cobre na vertical, que se pode visualizar na foto, é designado por “flauta”, uma vez que este tubo é perfurado consoante o número de circuitos que a bateria poderá ter. Estes circuitos poderão ter vários padrões. As imagens contidas na Figura 17 apresentam alguns desses padrões.

Embora não tenha sido necessário, na UTA em estudo, não foi possível obter o padrão desses circuitos uma vez que não está visível, está sem acesso e não existe qualquer informação do fabricante.



**Figura 17. Alguns padrões dos circuitos dos tubos de cobre**

A modelação deste componente é efetuada, mais uma vez, através do balanço térmico de uma equação diferencial, descrita em baixo:

$$C_{bat} \frac{\partial T_{a,out}}{\partial t} = C_w (T_{w,in} - T_{w,out}) + U_{uta} (T_o - T_{a,out}) + C_a (T_{a,in} - T_{a,out})$$

**Equação 18** Balanço térmico da bateria de água gelada [PARVARESH, 2012], [TASHTOUSH, 2004]

Onde,

$$C_w = \dot{m}_w \cdot Cp_w \text{ e } \dot{m}_w = \rho_w \cdot \dot{V}_w$$

$$C_a = \dot{m}_a \cdot Cp_a \text{ e } \dot{m}_a = \rho_a \cdot \dot{V}_a$$

Após o desenvolvimento da Equação 18 e a aplicação da Transformada de Laplace na mesma, vem:

$$T_{a,out}(s) = \frac{C_w \cdot [T_{w,in}(s) - T_{w,out}(s)] + U_{uta} \cdot T_o(s) + C_a \cdot T_{a,in}(s)}{C_{bat}s + C_a + U_{uta}}$$

**Equação 19** Aplicação da Transformada de Laplace à Equação 18

Efetuada uma simplificação semelhante à efetuada na modelação da sala, para a equação anterior, nasce a presente na Equação 20.

Após este passo foi, então, possível apresentar o respetivo DB, que está representado na Figura 18.

$$T_{a,out}(s) = \frac{K_4 \cdot [T_{w,in}(s) - T_{w,out}(s)] + K_5 \cdot T_o(s) + K_6 \cdot T_{a,in}(s)}{C_{bat}s + K_7}$$

**Equação 20** Simplificação da Equação 19

Onde, os respetivos valores de:

$$K_4 = C_w, K_5 = U_{uta}, K_6 = C_a \text{ e } K_7 = C_a + U_{uta}$$

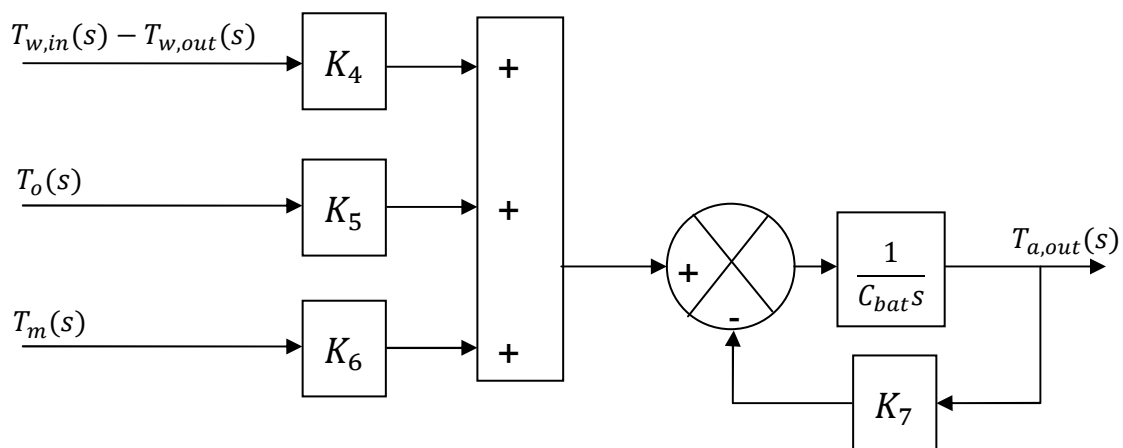


Figura 18. Diagrama de Blocos da Equação 20

Quanto ao rácio de humidade, este componente tem uma particularidade funcional importante que é o facto de conseguir uma produção de calor sensível<sup>13</sup> e uma produção de calor latente<sup>14</sup>, ou seja, tem a capacidade de reduzir a temperatura e o rácio de humidade (desumidificação) na sua saída.

Isto só acontece caso a temperatura da própria bateria seja inferior à temperatura de ponto de orvalho. Esta explicação da redução da temperatura e do rácio de humidade é efetuada mais em pormenor no capítulo 3.1.3.

Relativamente, à temperatura de ponto orvalho  $t_d$ , não é uma temperatura que se veja ou consiga facilmente. Esta depende de dois principais fatores: a pressão de saturação da água da temperatura de orvalho ( $P_{ws_{td}}$ ) e do rácio de humidade ( $W$ ).

A  $P_{ws_{td}}$  é obtida através da Equação 21, enquanto que  $W$  é calculada através da Equação 22 que advém da anterior, contudo a pressão desta equação não é a mesma da anterior.

$$P_{ws_{td}} = \frac{Pa \cdot W}{0,621945 + W}$$

**Equação 21 Cálculo da pressão de saturação da água para  $t_d$  [ASHRAE, 2009]**

Em que  $Pa$  é a Pressão atmosférica no valor de 101325 Pascal (Pa).

<sup>13</sup> O calor sensível acontece quando algo é aquecido ou arrefecido, a sua temperatura aumenta ou diminui à medida que o calor lhe é adicionado ou removido, sem que o estado do fluido seja alterado.

<sup>14</sup> O calor latente é a adição ou remoção de calor que provoca alterações ao estado de um fluido (vapor para líquido, de líquido para sólido ou na situação inversa).

$$W = 0,621945 \cdot \frac{P_w}{P_a - P_w}$$

**Equação 22** Rácio de humidade em função da pressão de vapor água  $P_w$  [ASHRAE, 2009]

Obtida a  $P_{ws_{td}}$  e  $W$  é, agora, possível o cálculo da temperatura de ponto de orvalho através das equações seguintes:

$$td = a_1 + a_2 \cdot b + a_3 \cdot b^2 + a_4 \cdot b^3 + a_5 \cdot P_{ws_{td}}^{0,1984} \quad \forall td \in [0^\circ\text{C}; 93^\circ\text{C}]$$

$$td = 6,09 + 12,608 \cdot b + 0,4959 \cdot b^2 \quad \forall td \in < 0^\circ\text{C}$$

**Equação 23** Expressões de cálculo do ponto de orvalho [ASHRAE, 2009]

Em que,

$$a_1 = 6,54$$

$$a_2 = 14,526$$

$$a_3 = 0,7389$$

$$a_4 = 0,09486$$

$$a_5 = 0,4569$$

$$b = \ln \left( \frac{P_{ws_{td}}}{1000} \right)^{15}$$

Em relação a  $P_w$ , utilizado na Equação 22, este depende da pressão de saturação da água ( $P_{ws}$ ), para uma temperatura que não a do ponto de orvalho, e do valor de humidade relativa conforme as expressões da Equação 24 e da Equação 25. A primeira expressão da Equação 25 é válida para valores entre  $-100^\circ\text{C}$  (cem graus Celcius negativos) e  $0^\circ\text{C}$ ; se a temperatura for superior a  $0^\circ\text{C}$  e inferior a  $200^\circ\text{C}$ , deve ser utilizada a segunda expressão.

$$Hr = \frac{P_w \cdot 100}{P_{ws}} \Leftrightarrow P_w = \frac{P_{ws} \cdot Hr}{100}$$

**Equação 24** Pressão da água em função de  $Hr$  e  $P_{ws}$  [ASHRAE, 2009]

---

<sup>15</sup> É necessária conversão da pressão de saturação para kPa.

$$\ln(P_{ws}) = \frac{c_1}{T} + c_2 + c_3 \cdot T + c_4 \cdot T^2 + c_5 \cdot T^3 + c_6 \cdot T^4 + c_7 \cdot \ln(T)$$

$$\ln(P_{ws}) = \frac{c_8}{T} + c_9 + c_{10} \cdot T + c_{11} \cdot T^2 + c_{12} \cdot T^3 + c_{13} \cdot \ln(T)$$

**Equação 25** Pressão de saturação da água em função da temperatura [ASHRAE, 2009]

Onde,

$T = \text{temperatura absoluta, } K = 273,15 + ^\circ C$

$$c_1 = -5,674\ 535\ 9\ E^3$$

$$c_2 = 6,392\ 524\ 7$$

$$c_3 = -9,677\ 843\ 0E^{-3}$$

$$c_4 = 6,221\ 570\ 1E^{-7}$$

$$c_5 = 2,074\ 782\ 5E^{-9}$$

$$c_6 = -9,484\ 024\ 0E^{-13}$$

$$c_7 = 4,163\ 501\ 9$$

$$c_8 = -5,800\ 220\ 6E^3$$

$$c_9 = 1,391\ 499\ 3$$

$$c_{10} = -4,864\ 023\ 9E^{-2}$$

$$c_{11} = 4,176\ 476\ 8E^{-5}$$

$$c_{12} = -1,445\ 209\ 3E^{-8}$$

$$c_{13} = 6,545\ 967\ 3$$

### 2.3.2.3 Modelação da bateria de água quente

No que diz respeito à modelação desta bateria é, praticamente, o mesmo processo que o desenvolvido na BAG. Difere no facto desta bateria efetuar apenas aquecimento sobre calor sensível (não há desumidificação) e no cálculo da temperatura de saída de água.

Desta forma, a equação para a modelação é a mesma da bateria de água gelada, ou seja, a apresentada na Equação 18.

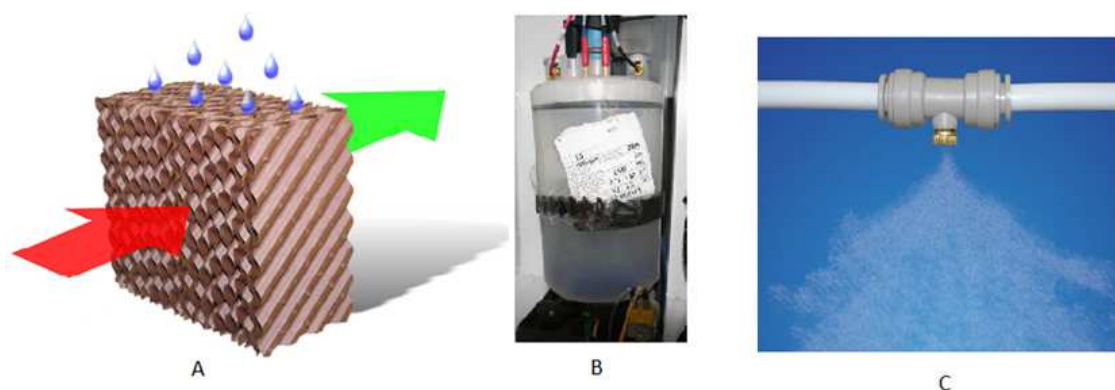
#### 2.3.2.4 Modelação do Humidificador

O humidificador é um componente da UTA que permite, como o próprio nome indica, humidificar. A função deste componente é repor o valor de humidade no ar que por ele atravessa de modo a que a quantidade de humidade, ou vapor de água, contida no ar esteja no valor pretendido.

Existem vários tipos de humidificadores:

- **Humidificadores adiabáticos (ou evaporativos)** – Para produzirem o vapor de água necessário para a humificação, utilizam o calor contido no ar: o ar arrefece ao atravessar neste tipo de humidificadores. A diferença de pressão entre o ar e a água faz evaporá-la. Têm o aspeto de favo e são, também, caracterizados pelo seu baixo consumo de energia;
- **Humidificadores isotérmicos (ou de vapor de água)** – Estes humidificadores utilizam energia elétrica para produzir vapor de água. O vapor é misturado com o ar, normalmente, aspirado pelo ventilador. Durante o processo de humificação, a temperatura mantém-se constante. Estes humidificadores são mais indicados para ambientes limpos;
- **Humidificadores pulverizadores** – Através de um procedimento mecânico, elétrico ou de ar comprimido é produzida uma pulverização da água em pequenas partículas que se evaporam no ar;

As imagens da Figura 19 demonstram estes tipos de humidificadores.



**Figura 19. Tipos de humidificadores: A – Adiabático; B – Isotérmico; C – Pulverizador**

O humidificador da UTA, em estudo, é do tipo adiabático logo, a sua modelação, é dividida em duas partes:

1. A parte da temperatura à saída do humidificador, pois a temperatura do ar ao atravessar o favo arrefece;
2. A parte de humidade, propriamente dita, que se baseia num processo de transferência de vapor de água para o ar e que resulta no aumento de humidade.

As equações para esta modelação são:

$$C_h \frac{\partial T_{h,out}}{\partial t} = f i_{ar} \cdot C p_a (T_{h,in} - T_{h,out}) + U_{uta} (T_o - T_{h,out})$$

$$V_h \frac{\partial W_h}{\partial t} = f i_{ar} (W_{si} - W_h) + \frac{h(t)}{\rho_{ar}}$$

**Equação 26** Equações de balanço térmico e de massa do humidificador, respetivamente [TASHTOUSH, 2004]

Desenvolvendo as equações anteriores e aplicando a Transformada de Laplace, obtém-se:

$$T_{h,out}(s) = \frac{f i_{ar} \cdot C p_a \cdot T_{h,in} + U_h \cdot T_o(s)}{C_h s + f i_{ar} \cdot C p_a + U_h}$$

$$W_h(s) = \frac{f i_{ar} \cdot W_{si}(s) + \frac{h(s)}{\rho_{ar}}}{V_h + f i_{ar}}$$

**Equação 27** Aplicação da Transformada de Laplace às expressões da Equação 26

Utilizando um  $K_8 = f i_{ar} \cdot C p_a$  para a primeira parcela do numerador da equação da temperatura e um  $K_9 = f i_{ar} \cdot C p_a \cdot U_h$  para o denominador da mesma, os DB representativos das equações são:

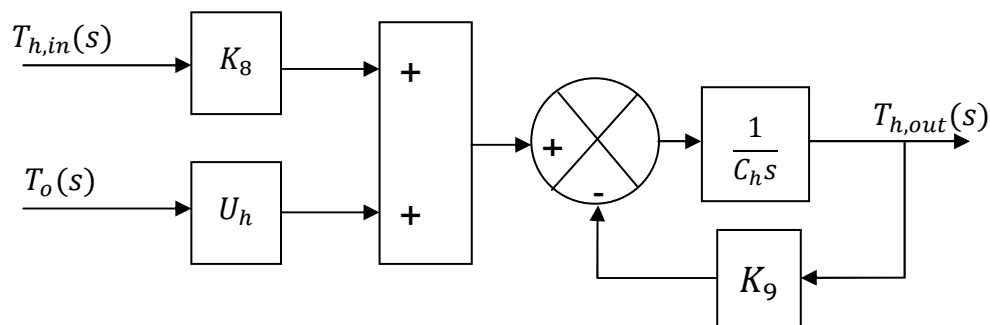


Figura 20. Diagramas de Blocos da temperatura da Equação 27

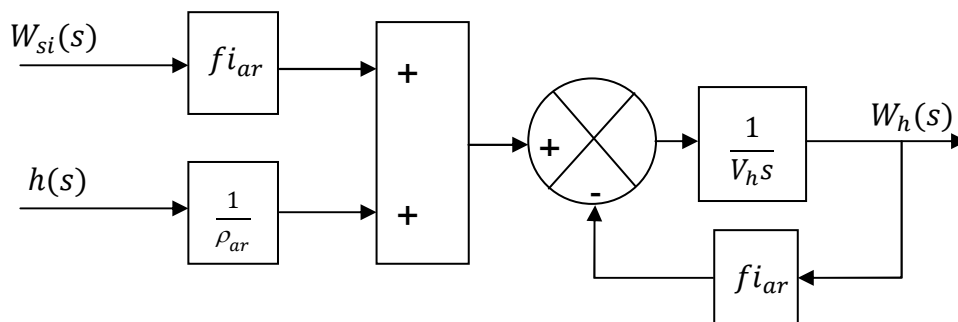
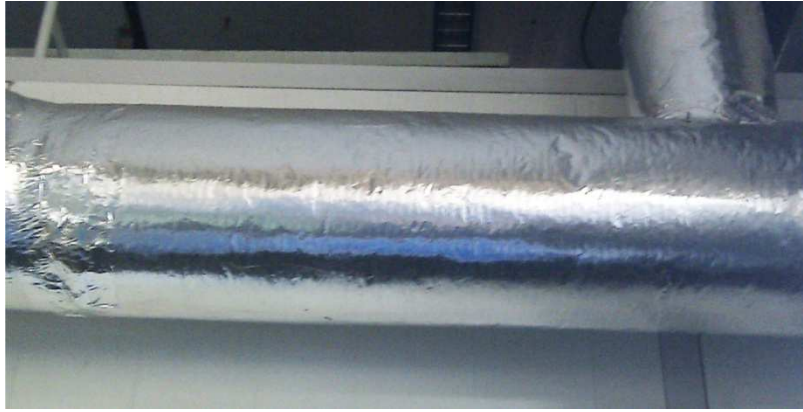


Figura 21. Diagramas de Blocos do rácio de humidade da Equação 27

### 2.3.2.5 Modelação das condutas de insuflação e de extração

As condutas são componentes que encaminham um determinado fluido para um local específico. Estas podem ter várias formas: podem ser circulares, ser quadradas ou retangulares. Podem conter um isolamento térmico ou não, consoante se pretende manter a energia dentro delas. Neste caso específico, as condutas são circulares com 300 mm de diâmetro, têm um isolamento em lã de rocha de 30 mm e encaminham o ar entre a máquina e a SATEC, quer para insuflar, quer para extrair o ar. A imagem da Figura 22 mostra um exemplo da conduta utilizada, sem o revestimento.



**Figura 22. Troço de conduta metálica de 300mm**

Apesar de ser um componente simples, a modelação da conduta tem alguma complexidade no que se refere ao cálculo de perdas entre a temperatura de entrada e saída de ar. Esta varia consoante as condições exteriores e com a influência do isolamento térmico.

Esta modelação exige o cálculo do escoamento turbulento através:

- Do coeficiente de *Reynolds* ( $Re$ ), uma vez que o valor deste é superior a 2300;
- Do coeficiente de transferência de calor no interior da conduta ( $h_i$ );
- Da condutividade térmica ( $k$ ), entre outras, apresentadas mais adiante.

Na imagem da Figura 23 está representado um exemplo destes regimes, num tubo circular.

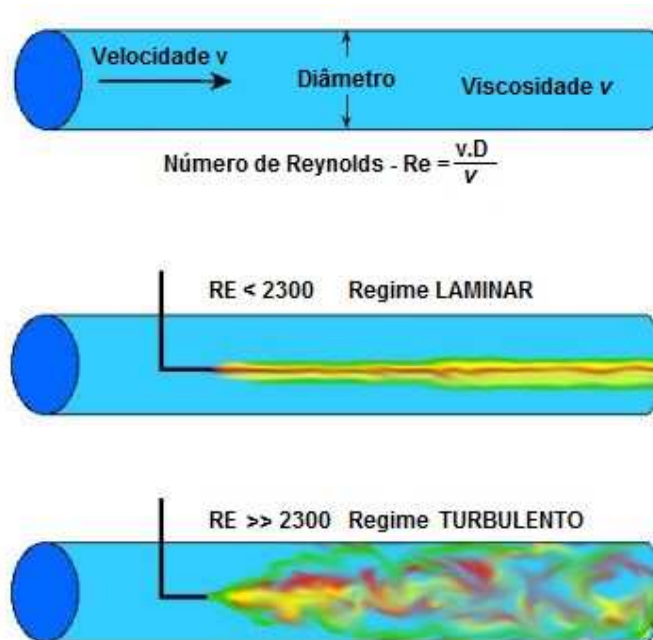


Figura 23. Regime Turbulento e Laminar, segundo o número de Reynolds

Passando agora para modelação, todo o processo começa na equação matemática onde é calculada a potência de perdas ( $Q$ ), conforme a equação seguinte:

$$Q = \frac{T_{d,in} - T_{d,out}}{\frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot K_r} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) + \frac{1}{h_o \cdot A_o}}$$

Equação 28 Transferência de energia numa conduta [INCROPERA, 2008]

No que diz respeito a  $h_i$  e a  $k$ , são explicados a seguir com a utilização destes no capítulo 3.1.6.

Para  $h_i$ , deve-se utilizar a Equação 29, que se aplica a instalações de convecção forçada, pois a UTA utiliza ventiladores para fazer circular o ar. Contudo, não é suficiente, pois ficamos com o número de *Nusselt* ( $Nu$ ) e com a condutividade térmica em falta. Para esta última, recorreu-se à Equação 34 com o auxílio da Tabela 3. Para a obtenção do  $Nu$ , serviu de suporte a Equação 30, correlação de *Dittus-Boelter*, que, por sua vez, depende do número de *Reynolds* e do número de *Prandtl* ( $Pr$ ), cujas fórmulas estão presentes na Equação 31 e na Equação 32, respetivamente. A utilização da correlação de *Dittus-Boelter* depende do valor do resultado da equação de  $Re$ : se é ou não superior a 2300. Além disto, há que ter em conta o valor do

expoente de  $Pr$ , pois difere se o fluido no interior do tubo foi arrefecido ou aquecido (em relação ao exterior), utilizando a constante de 0,3 para o primeiro caso e 0,4 para o segundo.

A partir deste momento, é necessário calcular-se o valor da velocidade do ar no tubo  $v$  e da viscosidade cinemática  $\nu$  para se obter o  $Re$ . Mais uma vez, estamos perante a dependência de outra expressão para se obter o valor de  $v$ . Para tal, recorreu-se à expressão  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  [INCROPERA, 2008], com a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) calculada através da Lei de *Sutherland*<sup>16</sup>, na Equação 33.

Com o  $Pr$ , ainda em falta, utilizou-se a expressão  $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp}$  [INCROPERA, 2008] para obter o valor da constante  $\alpha$ , uma vez que já se tinha obtido, anteriormente, o valor de  $\mu$ .

Após esta complexidade de fórmulas foi, então, possível determinar o valor de  $h_i$  e por consequência calcular-se o valor de  $\dot{Q}$  através da fórmula  $\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{d,out} - T_{d,in})$  [INCROPERA, 2008]. Desta forma, sabendo a temperatura de entrada da conduta  $T_{d,in}$  e efetuando a conversão de kW para W, calcula-se a temperatura de saída da conduta, desejada.

$$Nu = \frac{h_i \cdot d_i}{k}$$

**Equação 29** Equação do número de Nusselt [INCROPERA, 2008]

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$$

n=0,3 para arrefecimento ou n=0,4 para aquecimento

com  $Re \gg 2300$

**Equação 30** Correlação de *Dittus-Boelter* para aplicações de fluxo turbulento [INCROPERA, 2008] [WHITE,1998]

---

<sup>16</sup> *William Sutherland*, nasceu em Glasgow a 24 de agosto de 1859, escocês, foi físico-químico e escritor no jornal australiano "The Age".

$$Re = \frac{v \cdot d_i}{\nu}$$

**Equação 31** Coeficiente de *Reynolds* [INCROPERA, 2008]

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu \cdot Cp}{k}$$

**Equação 32** Número de *Prandtl* [INCROPERA, 2008]

$$\mu = \mu_{ref} \cdot \left( \frac{T_{su}}{T_{ref}} \right)^{3/2} \cdot \left( \frac{T_{ref} + S}{T_{su} + S} \right)$$

**Equação 33** Lei de *Sutherland* [WHITE, 1998]

$$k = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3$$

**Equação 34** Regressão da condutibilidade térmica do Ar, k (W/m. K)

**Tabela 3** Parâmetros de regressão da condutibilidade térmica do Ar, k (W/m. K)  
[MATOS, 1998]

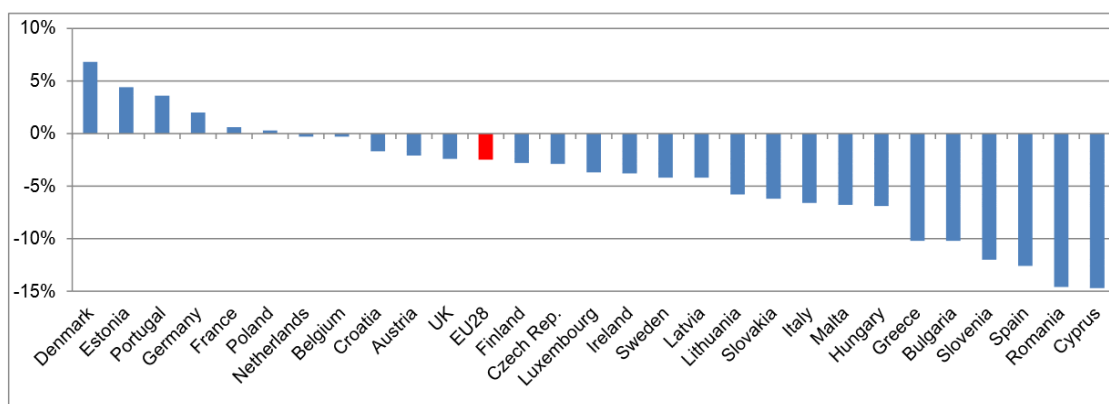
Gás	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	Gama de valores de $T(K)$
Ar	$0,23037 E^{-2}$	$0,92020 E^{-4}$	$-0,41047 E^{-7}$	$0,14533 E^{-10}$	200 e 2000

### 2.3.2.6 Modelação do CO<sub>2</sub>

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é o principal gás de efeito estufa emitido por atividades humanas. Estima-se que em 2013, na União Europeia (UE), as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes de combustíveis fósseis desceram cerca de 2,5% em comparação com o ano anterior. De acordo com os registos estatísticos, Portugal obteve um acréscimo de 3,6% de emissões e o maior decréscimo foi obtido pelo Chipre (14,7%) [EUROSTAT, 2014].

O CO<sub>2</sub> representa cerca de 80% das emissões de gases de efeito estufa na UE.

A imagem da Figura 24 representa, graficamente, a variação das emissões de CO<sub>2</sub> dos 28 membros da UE, em 2012/2013, onde se verifica que grande parte dos países reduziram as suas emissões.



**Figura 24. Emissões de CO<sub>2</sub> da UE em 2012/2013 (estimado em 2013) [EUROSTAT, 2014]**

No que diz respeito aos edifícios, estes são responsáveis por cerca de 40% de energia produzida na UE, o que contribui para emissões, em grande escala, de CO<sub>2</sub>.

Com o crescimento deste sector é de prever um aumento dessas emissões, pelo que se tem procurado instituir a utilização de fontes de energia renováveis para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa. Assim, a UE acordou, através da Diretiva 2002/91/CE e revista em 2010 como Diretiva 2010/31/CE, em reduzir o consumo de energia em, pelo menos, 20% em relação aos níveis de 1990.

Por outra perspetiva, o CO<sub>2</sub> como qualidade de ar interior (em inglês IDA – *Indoor Air*) também é uma preocupação para os projetistas de sistemas de ar condicionado. O controlo do nível de CO<sub>2</sub> em edifícios ou salas é importante do ponto de vista de conforto e saúde (o gás torna-se tóxico com uma concentração de 5000 ppm [Monteiro, 2013]).

A Tabela 4 apresenta os vários níveis da QAI e os respetivos valores típicos de CO<sub>2</sub>.

**Tabela 4 Classificação da qualidade do ar interior [EN 13779, 2007]**

Nível	Descrição	Alcance Típico	Valor Predefinido
IDA 1	Alta Qualidade de Ar Interior	<400	350
IDA 2	Média Qualidade de Ar Interior	400 a 600	500
IDA 3	Moderada Qualidade de Ar Interior	600 a 1000	800
IDA 4	Baixa Qualidade de Ar Interior	>1000	1200

Exemplificando: o nível IDA1 só é atingido se a concentração de CO<sub>2</sub> no interior estiver, no máximo, 400 ppm acima do valor de concentração de CO<sub>2</sub> do exterior, ou seja, se por ventura a concentração de CO<sub>2</sub> no exterior estiver em 400 ppm, no interior não poderá ascender os 800 ppm para que permaneça no IDA1. Caso seja superior, passará para o nível seguinte: IDA2.

Partindo para a modelação das concentrações de CO<sub>2</sub> dentro da SATEC, foi utilizada a expressão da Equação 35, que depende da concentração do ar exterior ( $Co2_{ext}$ ), da concentração do ar interior ( $Co2_{int}$ ) e da possível emissão de CO<sub>2</sub> emitido pelas pessoas ( $G$ ) que possam estar na sala.

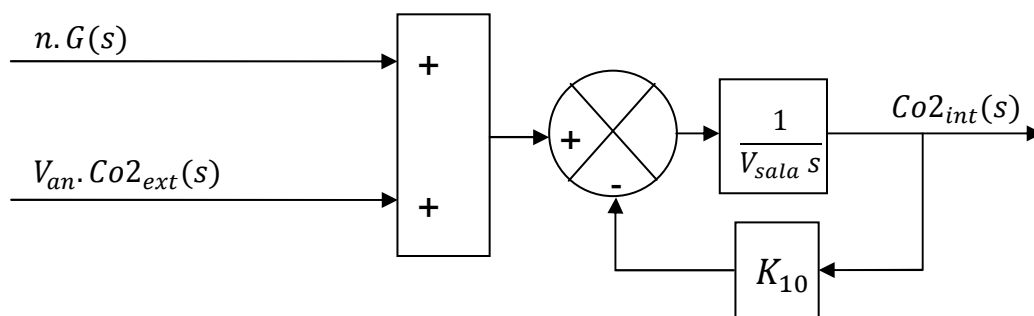
$$V_{sala} \cdot \frac{dCo2_{int}}{dt} = n \cdot G + V_{an} \cdot Co2_{ext} + V_{am} \cdot Co2_{int} - V_{ae} \cdot Co2_{int}$$

**Equação 35** Modelo matemático para o CO<sub>2</sub>

Após o desenvolvimento desta expressão, obteve-se a Equação 36, no domínio das frequências, prosseguindo-se para o respetivo DB.

$$Co2_{int}(s) = \frac{V_{an} \cdot Co2_{ext} + n \cdot G}{V_{sala}s + V_{ae} - V_{am}}$$

**Equação 36** Aplicação da transformada de Laplace à Equação 35



**Figura 25.** Diagrama de Blocos para a modelação do nível de CO<sub>2</sub> na sala

Onde,

$$K_{10} = V_{ae} - V_{am}$$

Utilizando um valor de emissões de CO<sub>2</sub>, por pessoa, de 5,17 l/s, obtido pela Equação 37 e tendo em conta a densidade do CO<sub>2</sub> de 1,52 kg/m<sup>3</sup> [AIR Liquide, 2012] [LINDE, 2013], obtém-se, facilmente, a concentração da sala  $Co2_{int}$ .

$$V_{CO_2} = RQ \cdot \frac{0,00276 \cdot A_D \cdot M}{0,23 \cdot RQ + 0,77}$$

**Equação 37 Emissões de CO<sub>2</sub>, por pessoa [Monteiro, 2013]**

Em que  $RQ$  é o coeficiente de respiração dado pela taxa de oxigénio (O<sub>2</sub>) inspirado e transformado em CO<sub>2</sub> durante a expiração. Esta taxa de O<sub>2</sub> varia consoante a atividade que se está a desempenhar. Na Tabela 5 estão apresentados os valores de consumo de O<sub>2</sub> em função do nível de atividade. O  $M$  remete para o metabolismo da pessoa.

**Tabela 5 Consumo de O<sub>2</sub> inspirado em função da atividade**

Tipo de Atividade	Batimentos Cardíacos (bpm)	Consumo de O <sub>2</sub> (ml/s)
Atividade leve	<90	<8
Atividade moderada	90 a 110	8 a 16
Atividade pesada	110 a 130	16 a 24
Atividade muito pesada	130 a 150	24 a 32
Atividade extremamente pesada	150 a 170	>32

O diagrama de blocos do sistema, relativamente às temperaturas e rácios de humidade pode ser visualizado no Anexo E.

### 3. IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAÇÃO NO SIMULADOR *LABVIEW*

O *LabVIEW* (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineering **W**orkbench) é um poderoso *software* desenvolvido pela *National Instruments*<sup>17</sup> que permite, facilmente, criar aplicações de simulação. A linguagem gráfica deste *software* é designada de "G". É muito utilizado para a aquisição e controlo de dados, controlo de instrumentos e automação industrial.

A interação com o programador é feita através de duas janelas denominadas de *Virtual Instruments* (VI): uma delas é o *Front Page* que funciona com interface para com o utilizador (GUI) e a outra é o *Block Diagram* (Diagrama de Blocos), onde é possível desenvolver aplicações com blocos gráficos de forma rápida e simples, semelhante ao conhecido *Simulink* do *MatLab*. A Figura 26 mostra um *GUI* e uma VI do *LabVIEW*.

Este *software* vem composto com os módulos mais básicos, módulos estes onde se encontram os vários blocos gráficos, tais como os blocos de álgebra elementar, caixas de texto tanto de *input* como de *output*, botões de ação, barras deslizantes, entre uma imensidão de outros blocos. No entanto, foi necessário acrescentar novos módulos que permitiram a execução da modelação deste trabalho. Estes módulos foram:

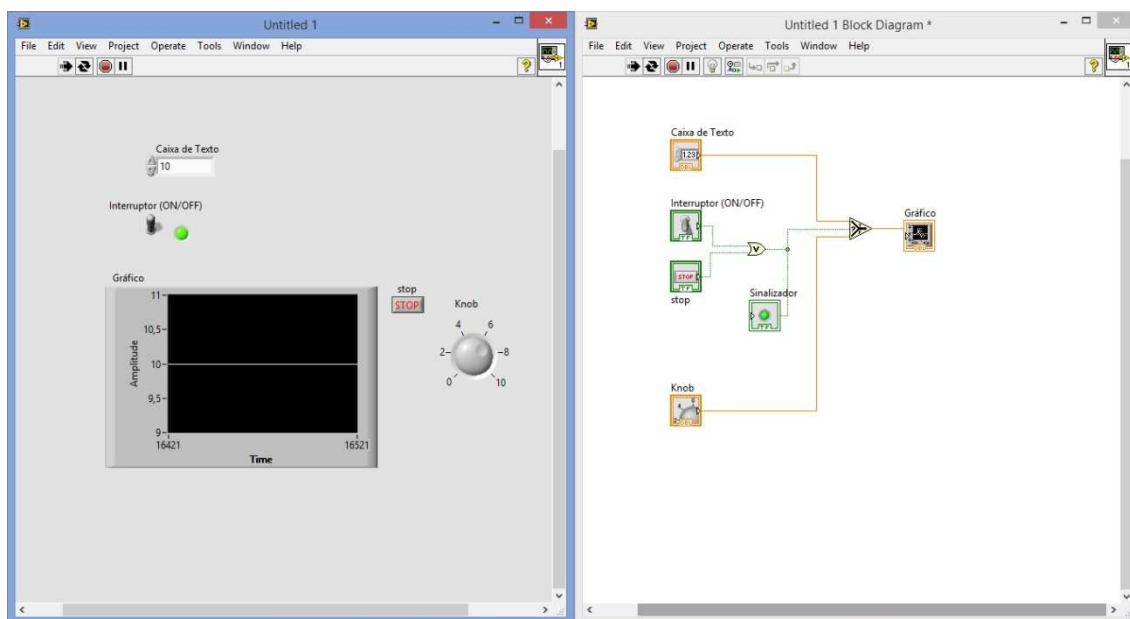
- O *Control Design & Simulation* onde estão incorporados os blocos de integração e derivativo, assim como a aritmética de sinais e, também, o bloco de ganhos.

---

<sup>17</sup> A *National Instruments* é uma empresa americana, fundada em 1976 por *James Truchard*, *Bill Nowlin* e *Jeff Kodosky*, com sede em Austin, no Texas. É uma produtora de equipamento de teste automatizado e de *software* de instrumentação virtual.

- Os blocos de controlo PID também estão inseridos no módulo *Control Design & Simulation*. Basicamente, não seria possível efetuar este trabalho sem este importante módulo.

A escolha deste programa prendeu-se com o intuito de conhecer um *software* diferente do *Simulink* e que permitisse comunicações com dispositivos de escrita e aquisição de dados para um possível desenvolvimento futuro deste trabalho.



**Figura 26.** Janelas do *LabVIEW*: GUI, à esquerda e VI, à direita

### 3.1. Implementação da modelação

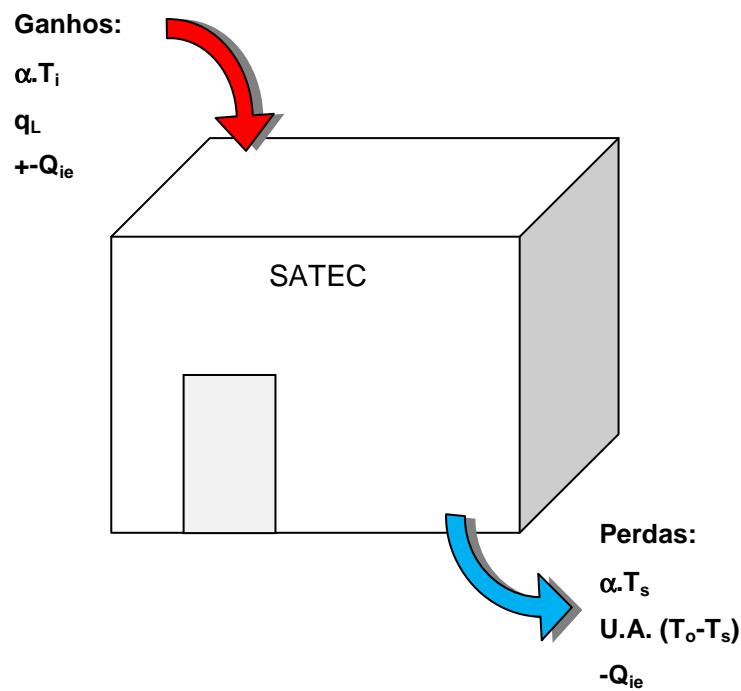
#### 3.1.1 Na Sala SATEC

A SATEC, em estudo, tem um comprimento de 4900 mm, uma largura de 4020 mm e uma altura de 2950 mm. Esta está, como já foi referido anteriormente, dentro do LAVAC do DEM e é completamente construída (paredes e teto) com painéis sandwich de alumínio cujo interior é de poliuretano. Estes painéis sandwich têm uma espessura de 60 mm e o seu coeficiente de transmissão térmica é de  $0,284 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , já referido anteriormente, no final do ponto 2.2. Não existem janelas e o único acesso é por uma porta construída com o mesmo material das paredes. No interior da SATEC existem várias possibilidades de insuflação e de extração de ar. No entanto, foi utilizada a insuflação e a extração apresentadas na Figura 28, para que o ar percorra a sala em toda a sua extensão. As restantes insuflações e extrações foram mantidas fechadas.

No interior, possuímos uma carga térmica ( $q_L$ ), mínima, de 54W, referente à iluminação no interior. Quanto às perdas por infiltração<sup>18</sup> e/ou exfiltração<sup>19</sup> ( $Q_{ie}$ ), partiu-se do princípio que não existem, pois o valor seria insignificante.

O número no interior da sala pode variar, pelo que foi contabilizada a inserção de uma caixa de texto para adicionar o número destas dentro da sala.

A Figura 27 apresenta o balanço energético que influencia a SATEC, em conformidade com a Equação 12.



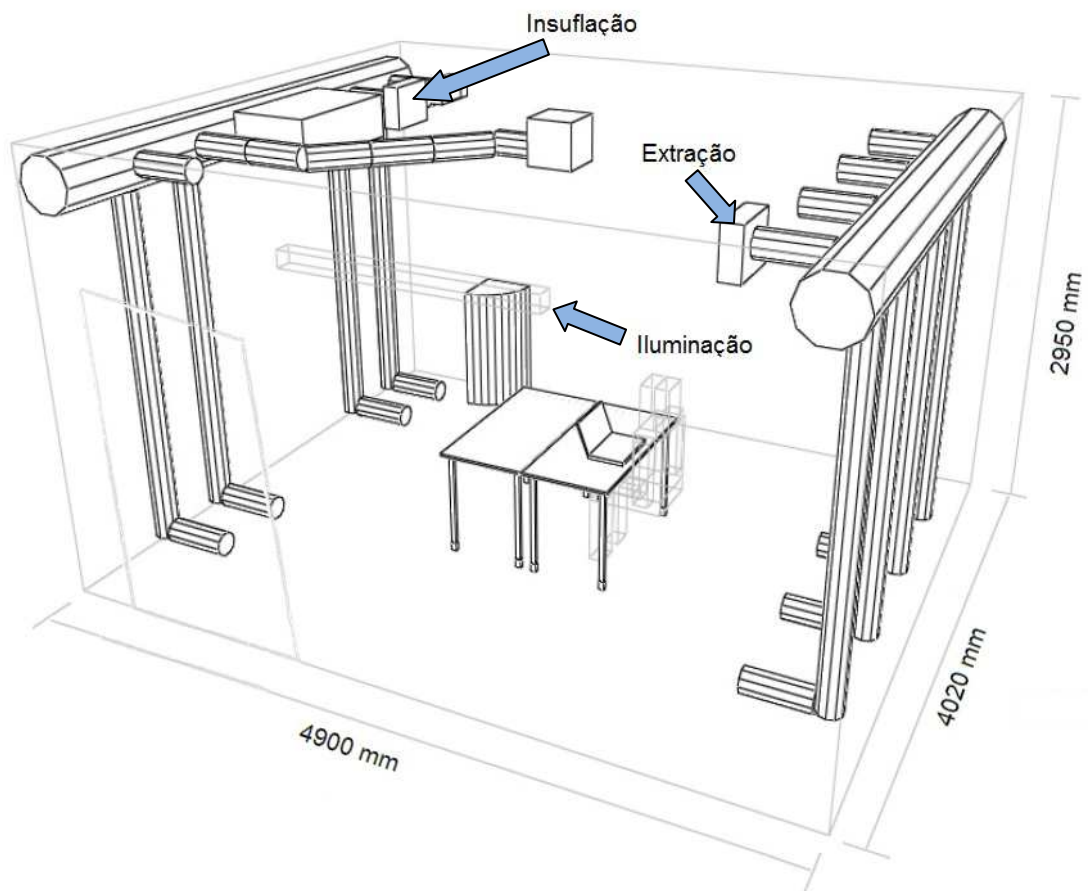
**Figura 27.** Esquemático da SATEC com os ganhos e perdas de energia

---

<sup>18</sup> É o fluxo de ar que entra num espaço ou edifício através de fendas e outras aberturas não intencionais e através da utilização normal de portas com o exterior para entrada e saída de pessoas e bens. Também conhecido como fuga de ar para o exterior [ASHRAE, 2001].

<sup>19</sup> É o fluxo de ar que sai do interior de um espaço ou edifício através de fendas e outras aberturas não intencionais [ASHRAE, 2001].

---



**Figura 28. Insuflação e Extração do ar da SATEC [Monteiro, 2013]**

O VI da modelação da SATEC, implementado conforme enunciado no capítulo anterior, está representado na Figura 29.

Para se verificar o sinal de  $Q_{ie}$  é necessário proceder-se à comparação entre a temperatura da SATEC ( $T_s$ ) e a temperatura exterior ( $T_o$ ), de modo, a que aquele valor seja positivo ou negativo. Se a temperatura exterior for mais alta que a temperatura da SATEC (infiltração), então o valor é positivo; se a temperatura exterior for mais baixa que a temperatura da SATEC (exfiltração) o valor é negativo. Assim sendo, é necessário ter, junto do DB da Figura 29, a verificação desta condição através da comparação entre as duas temperaturas, fazendo a respetiva alteração do sinal do valor de  $Q_{ie}$ . A Figura 30 apresenta a verificação desta condição.

A entrada “Condições iniciais – Temp” é a temperatura a que a sala se encontra no início da simulação, isto é, quando se pretende efetuar uma simulação, ao colocar um

valor de temperatura nesta entrada, os resultados começarão a partir do valor indicado.

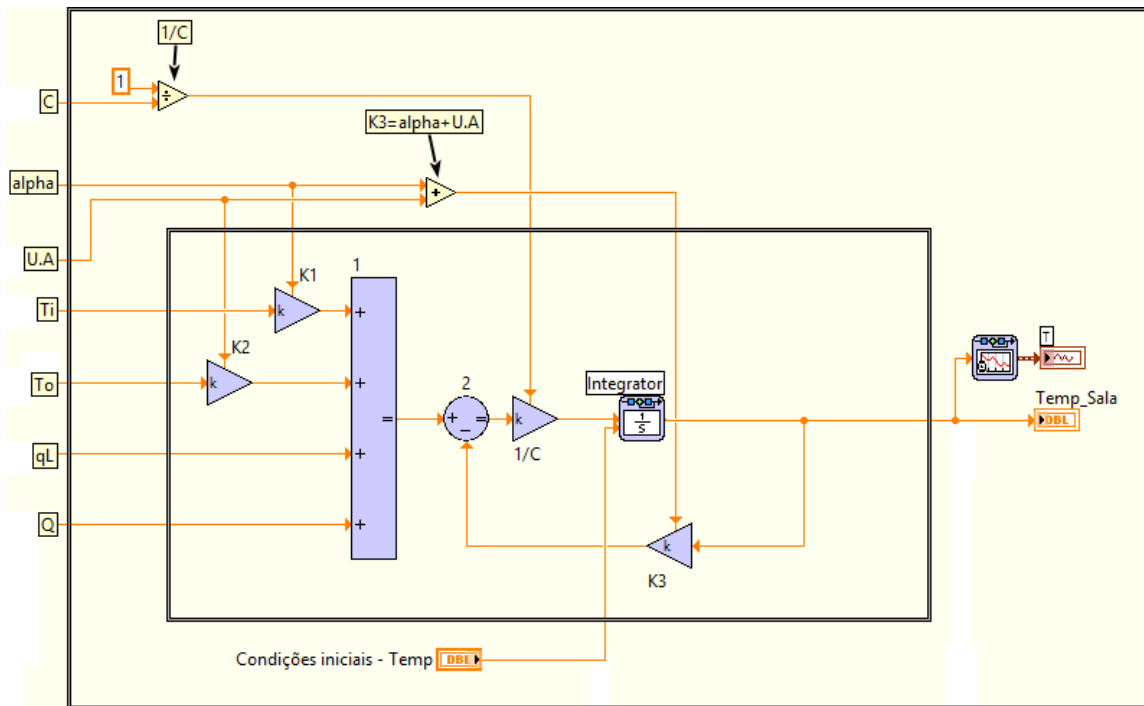


Figura 29. Diagrama de Blocos da modelação da Temperatura da Sala

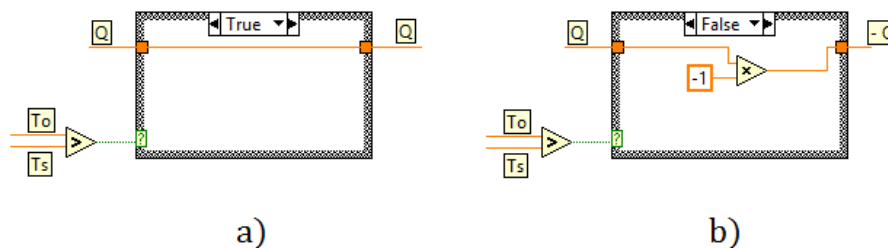
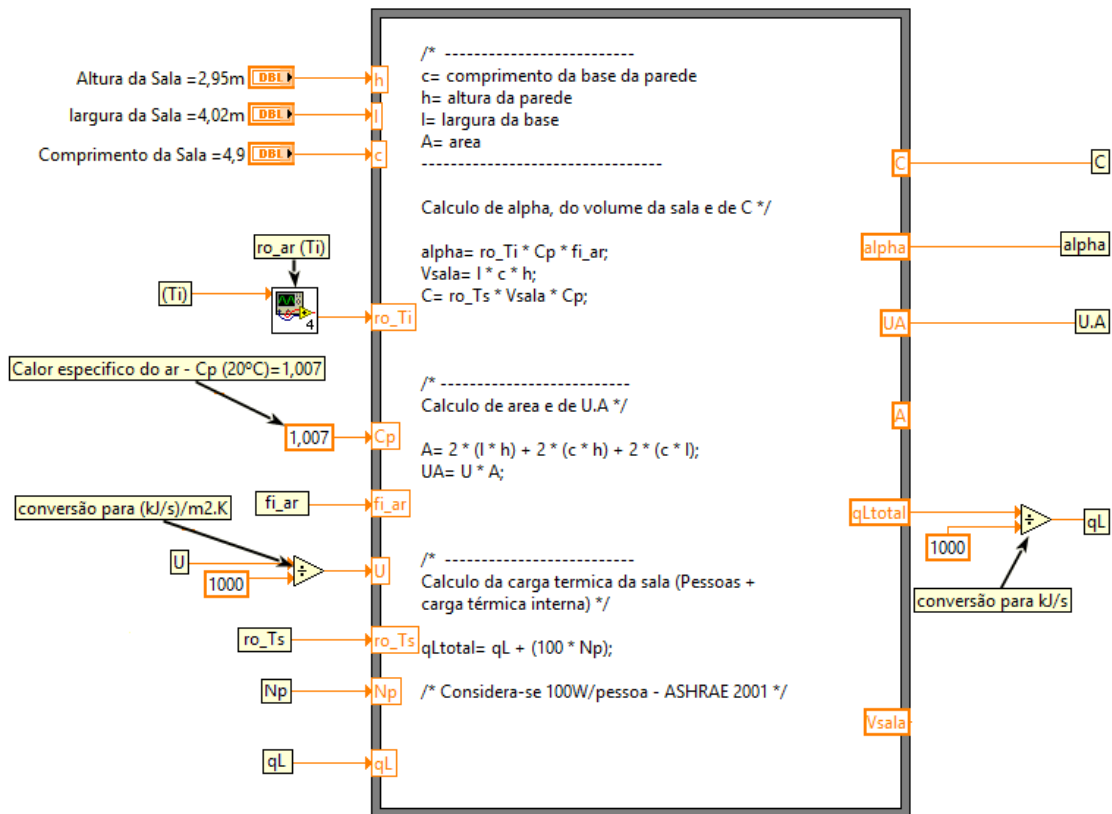


Figura 30. Comparação entre os valores das temperaturas  $T_o$  e  $T_s$ . Em a) se for verdadeira; em b) se for falsa.

As variáveis de entrada  $C$ ,  $\alpha$  ( $\alpha$ ),  $U.A$  e  $q_L$  são tratadas antes de darem entrada no bloco da modelação da sala. Para a primeira variável indicada, foi efetuado o respetivo cálculo da capacidade térmica da sala:  $C = \rho_{T_s} \cdot V_{sala} \cdot C p_{ar}$ , onde o valor de  $\rho_{ar}$  se refere à densidade do ar da sala e o calor específico do ar ( $C p_{ar}$ ) ganha o valor de 1,007 kJ/kg. K para qualquer temperatura de ar, uma vez que a variação deste é insignificante entre 10°C e 70°C. A segunda variável, através da equação  $\alpha = \rho_{T_i} \cdot C p_{ar} \cdot f i_{ar}$ , refere-se ao calor específico do ar insuflado.

O coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) é multiplicado pela área total da sala, ou seja, pelas quatro paredes, pelo teto e chão resultando na variável  $U.A$ .

O  $q_L$  é a carga térmica por geração interna, onde é, também, adicionado ao calor produzido pelas pessoas que possam estar na sala, conforme o seu número ( $N_p$ ). A imagem da Figura 31 representa um *Formula Node* do *LabVIEW* onde são conseguidos estes cálculos.



**Figura 31. Tratamento das variáveis de entrada para o DB da modelação da Sala**

Note-se que houve a necessidade de realizar algumas conversões de unidades: as potências  $Q_{ie}$  (não apresentada neste bloco),  $q_L$  e o coeficiente de transmissão térmica são convertidos de W para kJ/s.

Em termos de modelação do rácio de humidade ( $W_s$ ), cujo VI do *LabVIEW* está ilustrado na Figura 32 conforme o segundo DB da Figura 12, o valor de entrada  $P$  corresponde à taxa de evaporação de cada pessoa.

A entrada  $W_i$  é o rácio de humidade insuflada na SATEC: a mesma da saída do humidificado está apresentada mais à frente, no ponto 3.1.5.

Em termos de condições iniciais de humidade, foi importante executar a conversão de humidade relativa ( $Hr$ ) para o rácio de humidade, uma vez que esta modelação

funciona em função desta. Assim, o bloco da conversão tem como entradas as condições iniciais de  $T_s$  e de  $Hr$  para se obter o respetivo rácio de humidade.

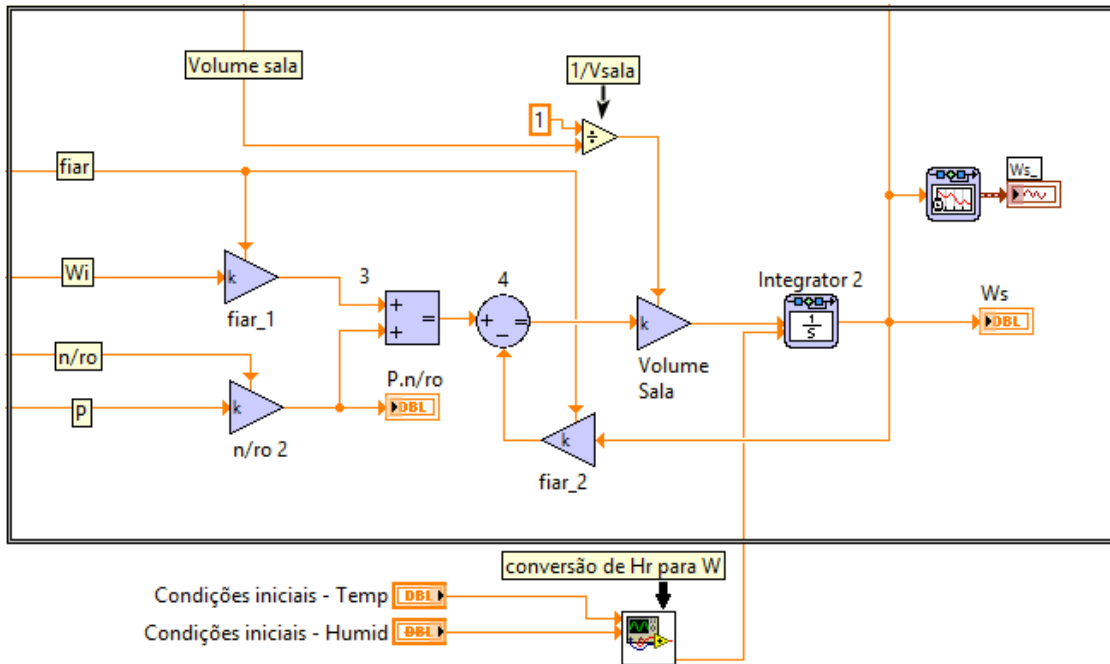
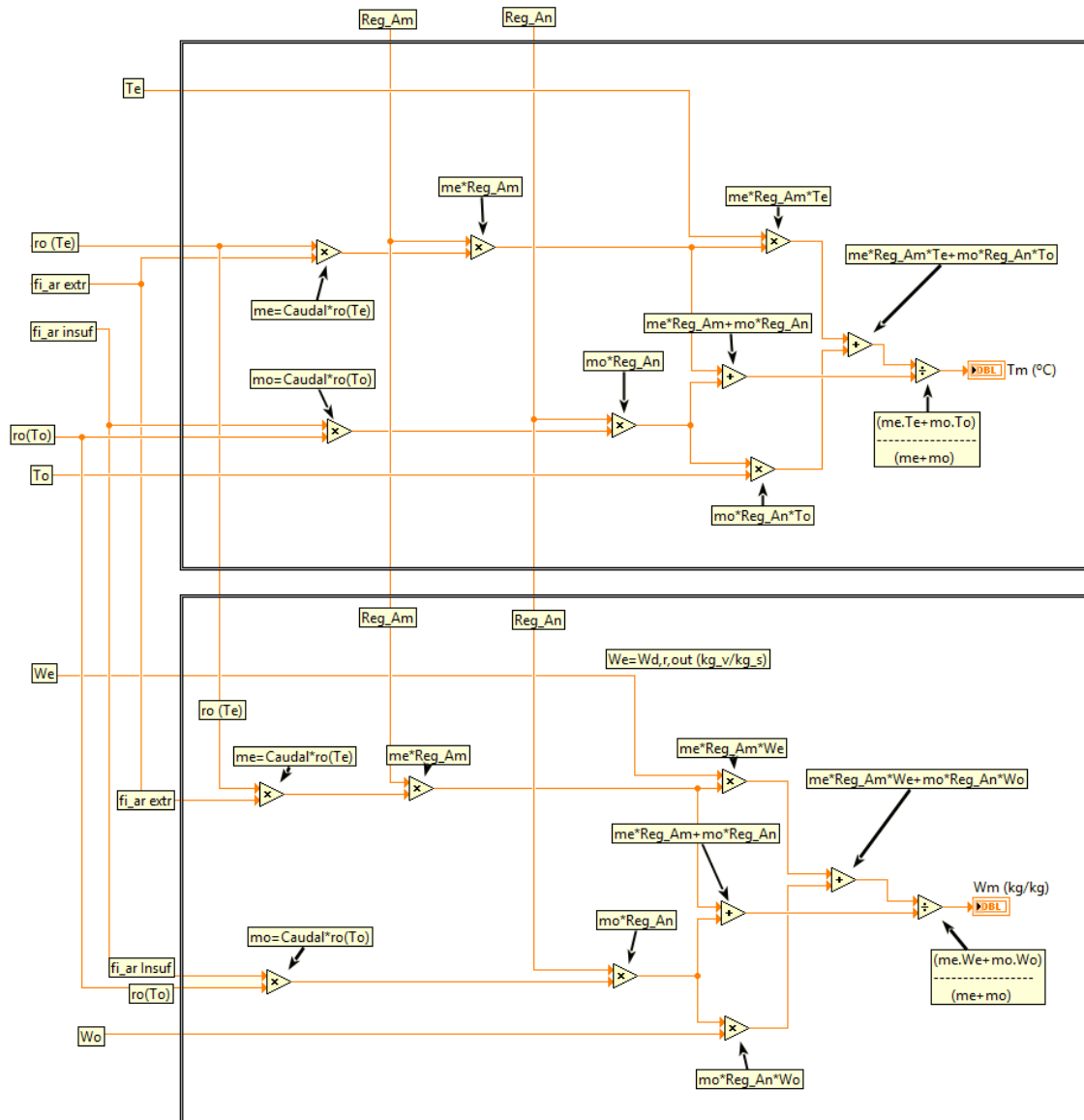


Figura 32. Diagrama de Blocos da modelação do rácio de humidade da sala

Após a conclusão deste DB, foi incrementado um bloco para conversão do  $W_i$  para  $Hr$  de modo a ser possível apresentar uma melhor perceção deste parâmetro da sala.

### 3.1.2 Na Caixa de Mistura

Para a modelação deste componente, foi utilizada a sequência apresentada no ponto 2.3.2.1 que nos fornecerá os valores da temperatura de mistura de ar ( $T_m$ ) e do respetivo rácio de humidade ( $W_m$ ). Na Figura 33 está representado o VI executado. As entradas  $Reg\_Am$  e  $Reg\_An$  referem-se, respetivamente, à percentagem de abertura dos registos de ar de mistura, que faz mistura do ar extraído com o ar de entrada, e do registo de ar novo (RAN), ar vindo do exterior.



**Figura 33. Modelação em LabVIEW da Temperatura e Rácio de humidade na Caixa de Mistura de Ar**

Os atuadores dos registos são modulantes, o que significa que, podem variar entre os 0 (zero) – fechados – e os 100 % - abertos. Tendo em conta esta situação, a temperatura da mistura ( $T_m$ ) variará conforme a variação da posição desses registos.

Para tal poder acontecer, foi determinante inserir um bloco para efetuar o produto da massa de ar novo ( $\dot{m}_o$ ) pela percentagem de abertura do  $Reg\_An$  e outro bloco para registar o produto da massa de ar de extração ( $\dot{m}_e$ ) pela percentagem de abertura do  $Reg\_Am$ . É de realçar que estes registos funcionam em simultâneo, contudo de forma inversamente proporcional, isto é, se o RAN abrir numa determinada percentagem, o registo de mistura fecha na mesma percentagem.

Para o diagrama de blocos que nos fornecerá  $W_m$ , a mecânica do funcionamento é a mesma. Os valores de saída da caixa de mistura  $T_m$  e  $W_m$  serão as entradas na BAG.

### 3.1.3 Na Bateria de Água Gelada

Em relação à modelação deste componente da UTA, houve a necessidade de ser ter em conta um pormenor importante que apenas ocorre nesta bateria. Este pormenor diz respeito ao vapor de água contido no ar: o ar é uma mistura de vários gases, no qual está incluído o vapor de água. O vapor de água contido no ar ao entrar em contacto com um material mais frio (abaixo da temperatura de ponto de orvalho), vai passar para o estado líquido (fenómeno de condensação do vapor de água): o mesmo acontece, por vezes, nas janelas de casa durante o inverno.

Na bateria de água sucede, exatamente, o mesmo quando esta está a uma temperatura inferior à temperatura de orvalho: uma quantidade do vapor de água contida no ar será transformada e retirada no estado líquido – calor latente –, fazendo com que o rácio de humidade de saída da bateria diminua, dando a este processo o nome de desumidificação. Este rácio de humidade, é traduzido no diagrama da Figura 34, por  $\Delta W$ .

No que diz respeito a cálculos, resume-se tudo à obtenção do valor de rácio de humidade e da entalpia nos pontos 1 e 2 da Figura 34.

Para o rácio de humidade obtém-se o apoio da Equação 22 que necessita da Equação 24 para obter do  $P_w$ , que por sua vez precisa da Equação 25 devido à ausência do  $P_w$ .

No que se refere à entalpia, recorre-se ao uso da Equação 38 que apenas depende do rácio de humidade, já calculada, e da temperatura.

$$h = 1,006.T + W.(2501 + 1,86.T)$$

#### **Equação 38 Entalpia em função da temperatura em °C e do rácio de humidade**

Sabendo a temperatura da bateria e a temperatura de saída da mesma, foi possível calcular a humidade relativa de saída, no ponto 3. Este cálculo é efetuado através da Equação 38 com auxílio à equação da reta entre o ponto 1 e o ponto 2, onde o declive

é dado pela equação  $\Delta_{12} = \frac{h_1 - h_2}{W_1 - W_2}$ , em que  $h_1$  e  $h_2$  são as entalpias dos pontos 1 e 2, respetivamente, assim como  $W_1$  e  $W_2$  são as humidades absolutas dos mesmo pontos. Assim,

$$y = \Delta_{12} \cdot x + b$$

**Equação 39 Aplicação da equação da reta para cálculo do rácio de humidade**

Para encontrar o valor de  $b$  faz-se, por exemplo,  $y = h_1$  e  $x = W_1$  obtendo:

$$b = h_1 - (\Delta_{12} \cdot W_1)$$

**Equação 40 Obtenção do ponto  $b$  da equação da reta**

De forma análoga, para o ponto 3, faz-se  $\Delta_{13} = \frac{h_1 - h_3}{W_1 - W_3}$  por forma a encontrar-se a entalpia para o este ponto.

Para obter o valor de  $\Delta_{13}$  substitui-se  $h_3$  pela Equação 38 por em  $\Delta_{13}$  e obtemos:

$$\Delta_{13} = \frac{h_1 - [1,006 \cdot T_3 + w_3 \cdot (2501 + 1,86 \cdot T_3)]}{W_1 - W_3}$$

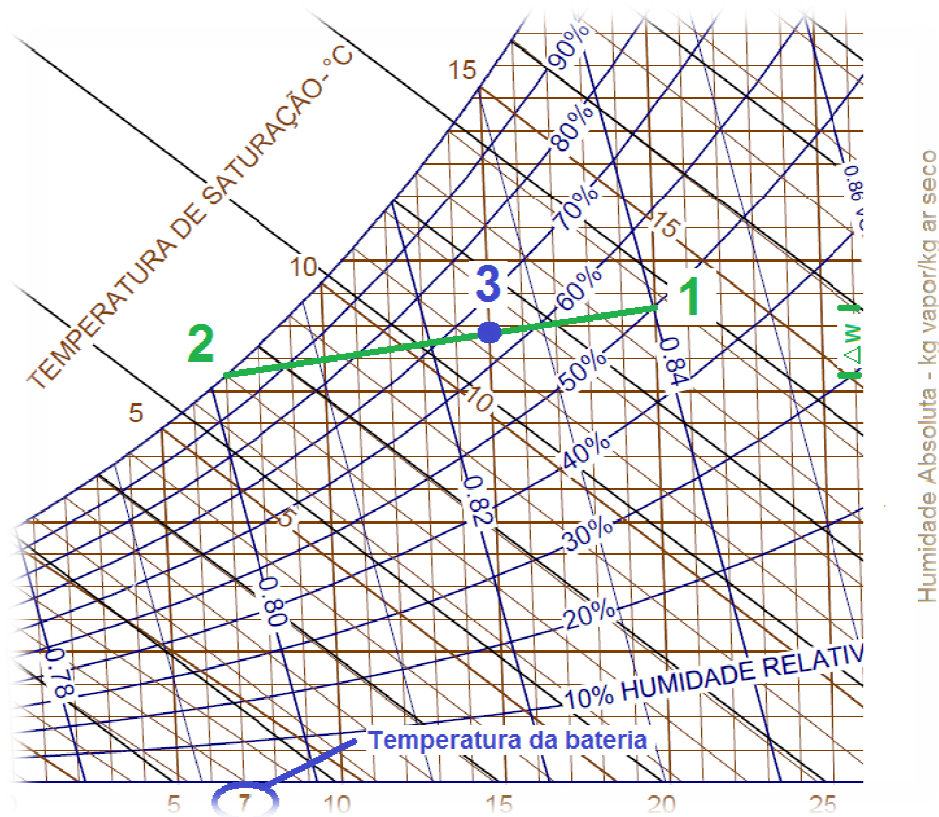
**Equação 41 Junção de  $\Delta_{13}$  com a Equação 38**

Estamos, agora, à vontade para sabermos o valor do rácio de humidade no ponto 3. Rearranjando a Equação 41, ficamos com:

$$W_3 = \frac{h_1 - 1,006 \cdot T_3 - \Delta_{13} \cdot W_1}{2501 - \Delta_{13} + 1,86 \cdot T_3}$$

**Equação 42 Expressão final para obtenção de  $W_3$**

Posteriormente, com este valor e o valor da temperatura foi possível encontrar o respetivo valor do rácio de humidade com a Equação 22, Equação 24 e Equação 25.



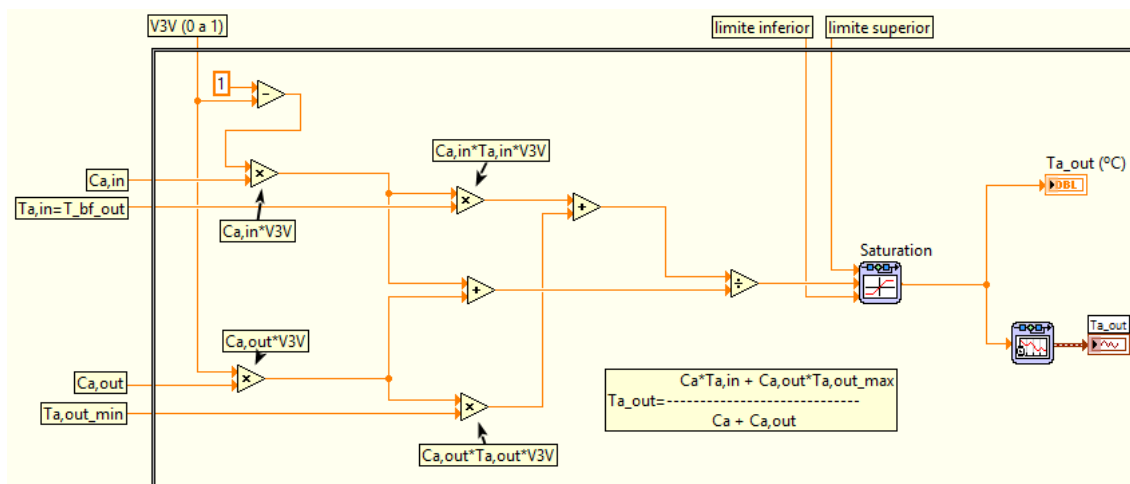
**Figura 34. Exemplo do funcionamento da bateria de água gelada no Diagrama Psicrométrico**

A modelação efetuada para a bateria (da Figura 38) irá dar-nos a temperatura de ar mínima possível neste componente, tendo em conta a sua potência e eficiência de transferência de calor, calculados no capítulo 2.2. A temperatura de saída da bateria variará consoante a posição da V3V que altera o caudal de água gelada que passa pelos circuitos e por sua vez, também, varia a temperatura da água da bateria.

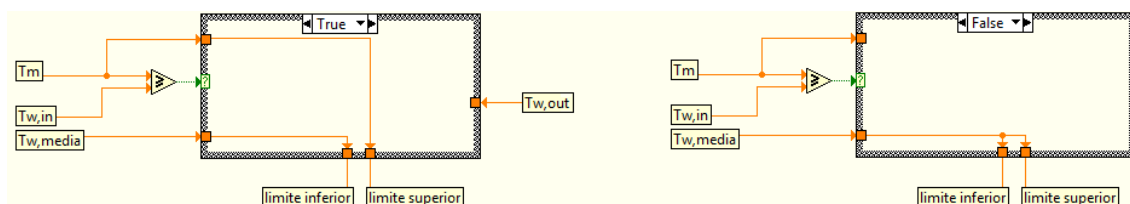
Desta forma, é possível fazer variar a temperatura de ar de saída da BAG entre o valor mínimo, que é dado pela modelação da bateria quando a V3V se encontra na sua posição máxima de abertura (caudal de água a passar totalmente pela bateria), e o valor da temperatura de ar de entrada, quando a V3V está na posição de fecho (caudal de água a passar na totalidade pelo *bypass*).

O VI que nos dará a temperatura de ar à saída da bateria pode ser encontrado na Figura 35. Os limites apresentados, nesta mesma figura, dizem respeito ao valor mínimo e máximo que o ar pode atingir na saída da bateria, isto é, o ar à saída da BAG não poderá ser inferior à temperatura da água que passa pela bateria – seria uma impossibilidade física -, nem poderá ser superior à temperatura de ar de entrada. Desta forma impôs-se as condições apresentadas na Figura 36.

Resumindo, se  $T_m$  for superior a  $T_{w,in}$ , então o limite inferior será o valor da temperatura média de água da bateria ( $T_{w,media}$ )<sup>20</sup> e o limite superior será, por razões óbvias, o da temperatura de entrada de ar. Por outro lado, se  $T_m$  for inferior a  $T_{w,in}$  (no caso do inverno com temperaturas perto de 0°C), então ambos os limites terão o valor de  $T_{w,media}$ , ou seja, a temperatura do ar terá de aquecer até à temperatura média da água, pois é superior à de entrada de ar.



**Figura 35.** Diagrama de Blocos da variação da temperatura de saída de ar da bateria consoante a variação da V3V

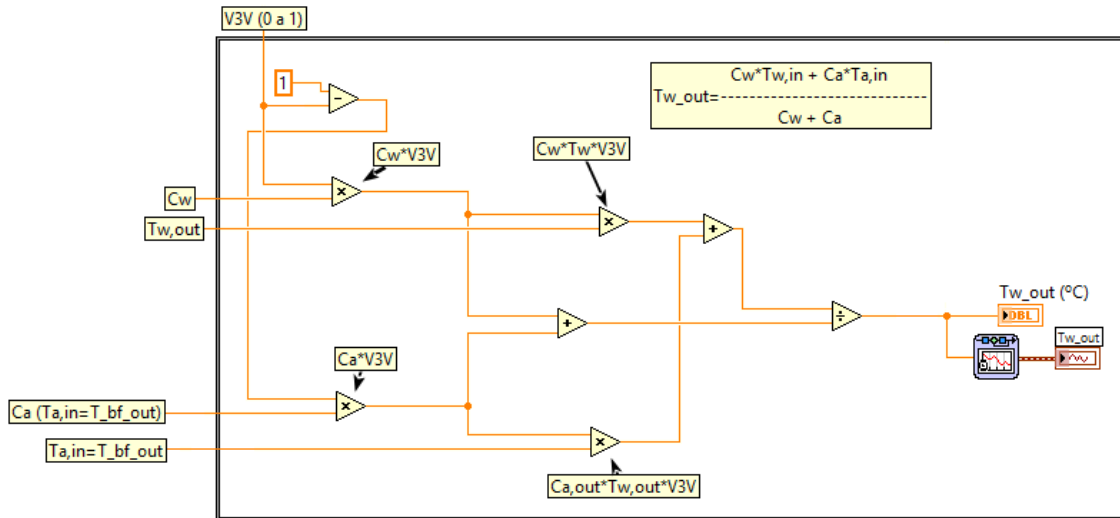


**Figura 36.** Condição para imposição de limites mínimos e máximos na saída do ar da bateria de água gelada.

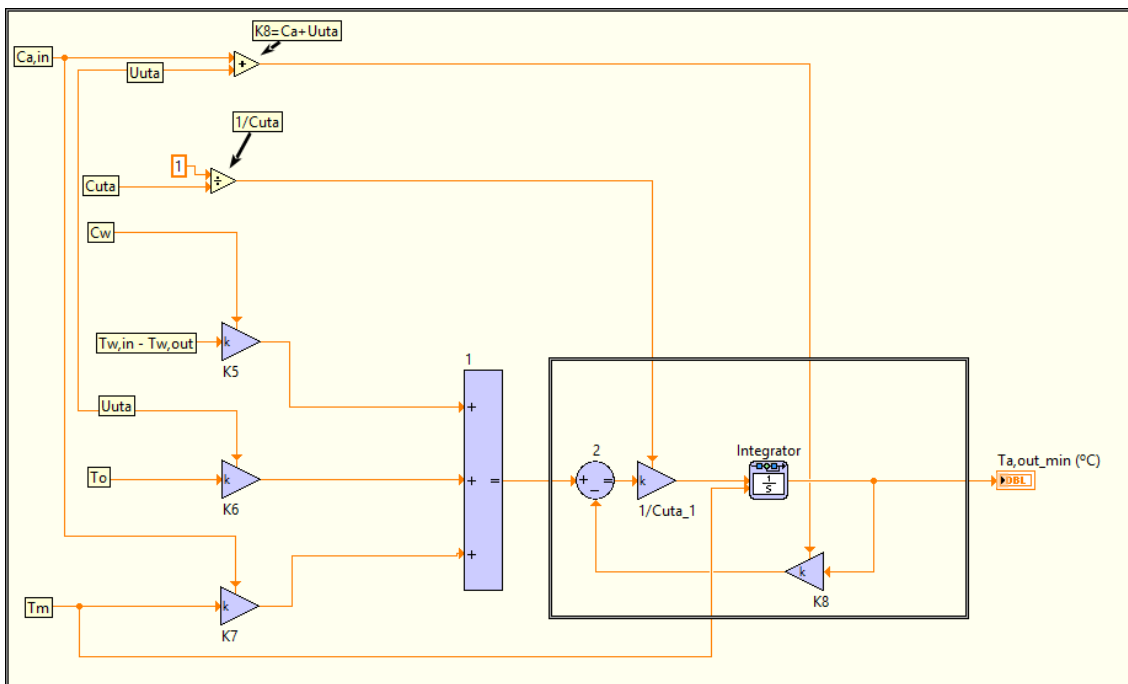
Para a variação da temperatura de saída de água da bateria ( $T_{w,out}$ ) consoante a variação da V3V, foi efetuado o mesmo processo do exposto, anteriormente, com a exceção dos limites impostos, pois  $T_{w,out}$  não influencia a temperatura de ar na UTA. A

<sup>20</sup> Foi considerada a temperatura média da bateria, uma vez que o método para o cálculo desta temperatura, para o caso em questão, seria tema para um trabalho de mestrado.

Figura 37 ilustra o VI desta variação, embora o resultado não seja utilizado para apresentação no GUI.



**Figura 37. Diagrama de Blocos da variação da temperatura de saída de água da bateria consoante a variação da V3V**



**Figura 38. Diagrama de Blocos da modelação da bateria de água gelada**

### 3.1.4 Na Bateria de Água Quente

Na BAQ, a modelação desta é feita da mesma forma que a BAG no que se refere à temperatura. O DB desta bateria é o mesmo que o encontrado, anteriormente, na Figura 38.

Para o lado da humidade é que existe diferença. Enquanto na BAG, a obtenção da humidade é realizada através da equação da reta, aqui o declive da reta é zero, pois apenas existe calor sensível e, no diagrama psicrométrico presente na Figura 39, significará uma reta horizontal.

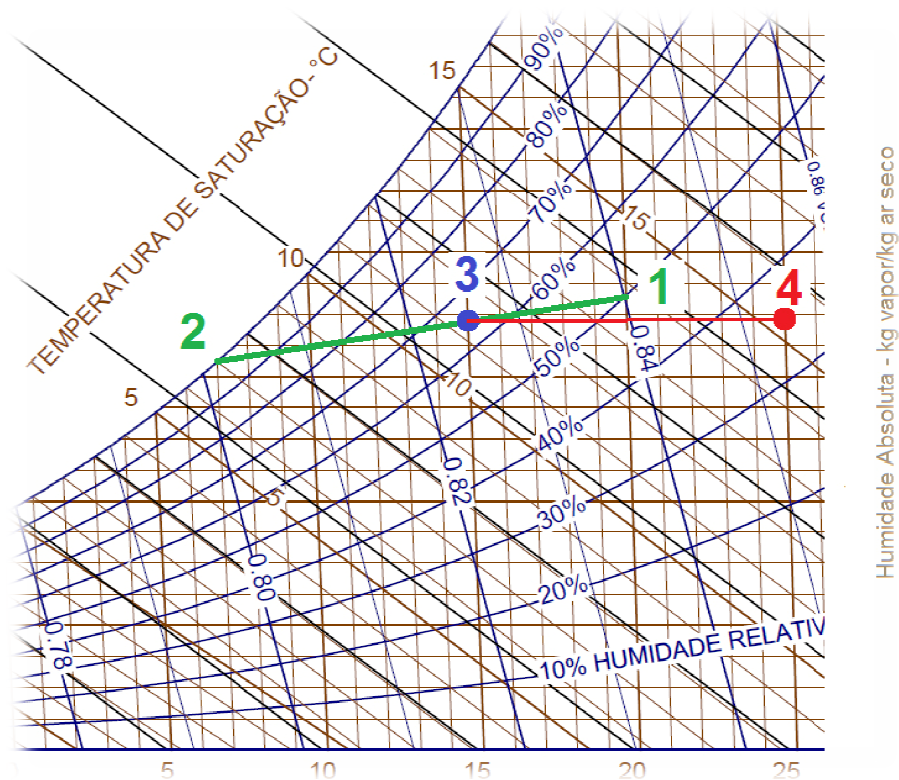
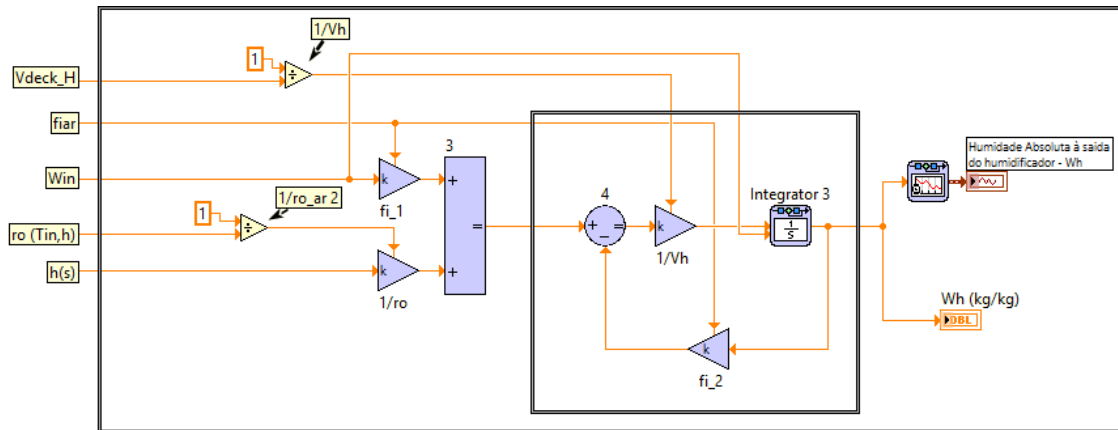


Figura 39. Exemplo do funcionamento da bateria de água quente no Diagrama Psicrométrico

Através do ponto 4 encontrado, apenas com o aumento da temperatura, obtém-se, facilmente, os respetivos valores de rácio de humidade e de humidade relativa. Mais uma vez, através da equação da reta (com declive zero), com o auxílio da Equação 42, da Equação 22, da Equação 24 e da Equação 25 consegue-se facilmente calcular os parâmetros de humidade mencionados.





**Figura 41. Diagrama de blocos para o rácio de humidade produzida pelo humidificador**

A particularidade na modelação do humidificador diz respeito à capacidade deste conseguir humidificar, ou seja, com este tipo de humidificadores só é possível humidificar caso a pressão de saturação da água ( $P_{ws}$ ) seja superior à pressão do vapor de água contido no ar ( $P_w$ ) para que a água passe para o ar no estado de vapor. Caso isto não aconteça, o rácio de humidade que passará para a saída do humidificador será igual ao de entrada e o rácio de ar húmido ( $h(s)$ ) terá de ser zero.

A Equação 43 dá-nos o  $h(s)$  produzido pelo humidificador, em função das expressões da Equação 44.

$$h(s) = \dot{m} \cdot (W_{s_w} - W_a) = f i_{ar} \cdot \rho_{ar} \cdot (W_{s_w} - W_a)$$

**Equação 43 Rácio de ar húmido produzido pelo humidificador**

Onde,

$$W_{s_w} = 0,621945 \cdot \frac{P_{ws}}{P_a - P_{ws}} \text{ e } W_a = 0,621945 \cdot \frac{P_w}{P_a - P_w}$$

**Equação 44 Rácio de humidade em função da pressão de saturação da água ( $W_{s_w}$ ) e rácio de humidade em função da pressão de vapor de água ( $W_a$ )**

Para que  $h(s)$  seja inserido na modelação, é necessário proceder à comparação entre  $P_{ws}$  e  $P_w$  mencionada, anteriormente. A Figura 42 apresenta essa comparação e devolve o valor de  $h(s)$  de acordo com o seu estado lógico.

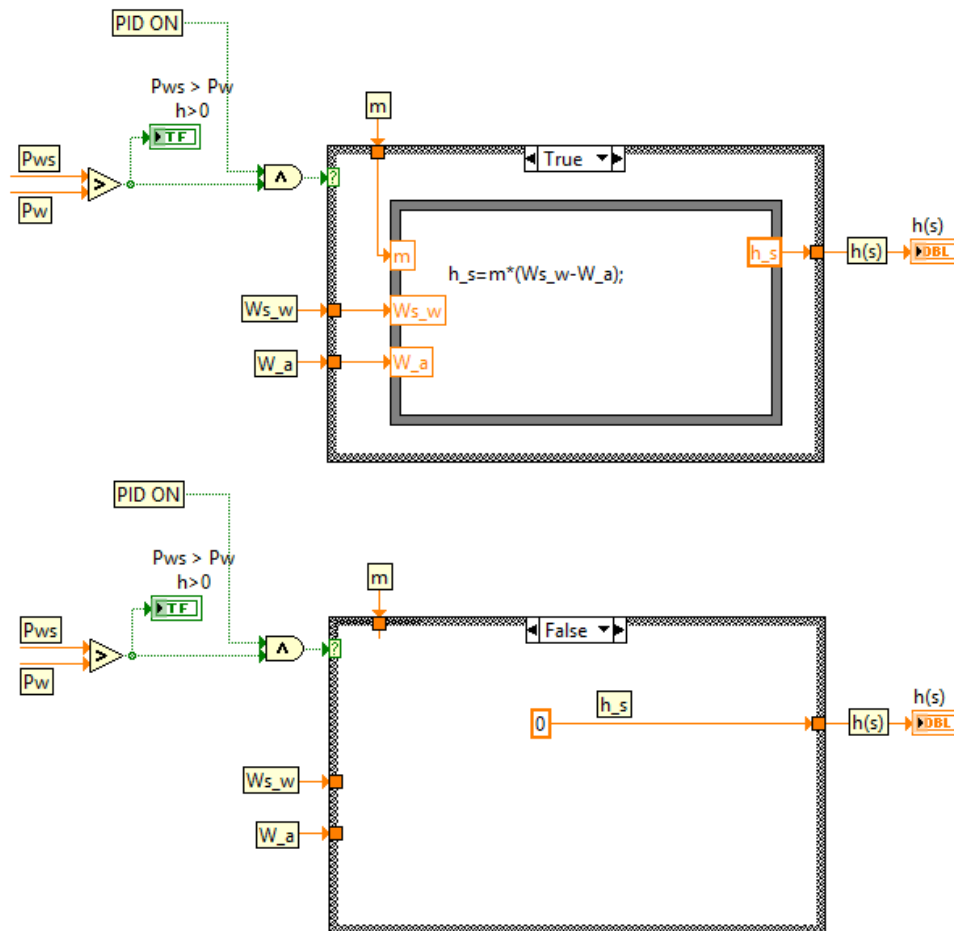


Figura 42. Comparação entre  $P_{ws}$  e  $P_w$  para decisão da saída  $h(s)$

Concluindo, este componente só entrará em funcionamento se:

- 1 O PID do humidificador estiver ligado;
- 2 O valor de pressão de saturação da água contida no humidificador for superior à pressão de vapor de água contida no ar que atravessa o humidificador. Por outras palavras, só é possível haver humificação se o vapor de água contido no ar for inferior àquele que o humidificador consegue produzir, conforme a temperatura da água neste.

### 3.1.6 Nas Condução de Insuflação e Condução de Retorno

Todas as condutas, mais ou menos isoladas, têm perdas ou ganhos com o ambiente exterior, conforme esteja mais frio ou mais quente, respetivamente.

Os cálculos para as perdas ou ganhos deste componente, estão visíveis na Figura 43, em que as saídas, nesta caixa de fórmulas,  $Q$  e  $T_{dout}$  são a potência e a temperatura de saída da conduta. Nas entradas desta caixa,  $len$  corresponde ao valor de  $\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)$ ,  $h_o$  é coeficiente de transferência de calor no exterior da conduta com o valor de 7,69 W/m<sup>2</sup>. K, ou seja,  $h_o = \frac{1}{R_{si\_horizontal}} = \frac{1}{0.13}$  [SANTOS, 2006].  $K_r$  é a condutibilidade térmica do isolamento em lã de rocha, com o valor de 0,037 W/m. K (média dos valores apresentados por SANTOS [SANTOS, 2006]) e  $\pi$  é o valor de  $\pi = 3,1415$ .

O cálculo do coeficiente de transferência de calor no interior da conduta,  $h_i$ , é feito com base na caixa de fórmulas da Figura 44. Aqui, o valor de saída  $h$  representa o valor procurado de  $h_i$ . As restantes são apenas para servir de entrada nas várias fórmulas contidas na *fórmula node*, em que o *LabVIEW* obriga a que estejam colocadas como saídas. Na entrada desta caixa, salienta-se:

- O número de Reynolds com valores superiores a 5600, o que significa que estamos perante um regime turbulento ( $Re \gg 2300$ );
- O valor de  $n$ , da Equação 30, que varia consoante a condição da caixa à esquerda: se  $T_o$  for superior à temperatura de ar na entrada da conduta ( $T_{dr,in}$ ) o valor de  $n$  é 0,4 (aquecimento), caso contrário é 0,3 (arrefecimento);
- O valor de  $d$  refere-se ao diâmetro interior do tubo;
- O valor de  $T$  é a temperatura de ar na entrada da conduta, em K;
- O valor de  $T_{ref}$  é a temperatura de referência no valor de 273 K e  $\mu_{ref}$  é a viscosidade dinâmica de referência, com o valor de  $1,71 \times 10^{-5}$  kg/m. s, ambos da Equação 33;
- O valor de  $S$  é de 110,4 K.

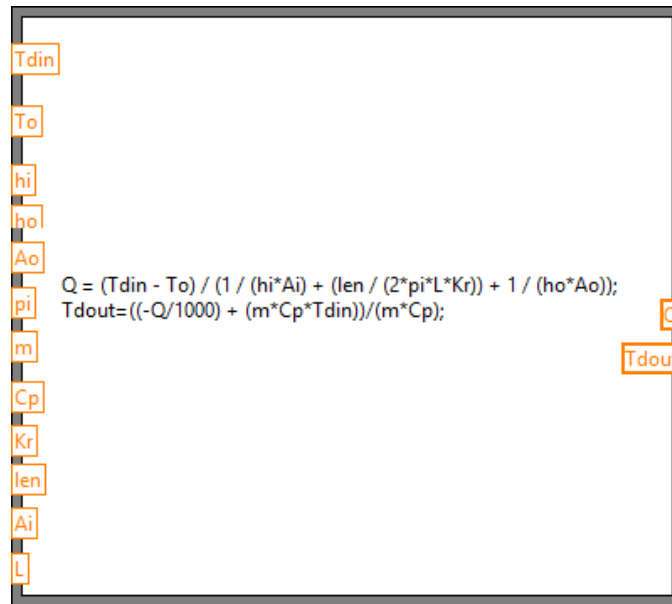


Figura 43. Caixa de fórmulas em *LabVIEW* para os cálculos para as perdas ou ganhos

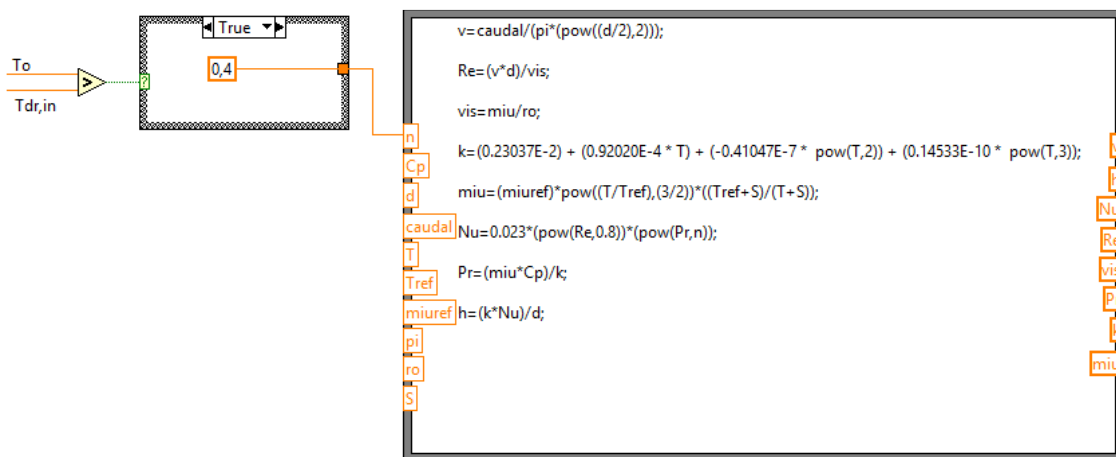


Figura 44. Caixa de fórmulas para o cálculo de  $h_i$

A conduta tem um diâmetro  $d_i = 300 \text{ mm}$  e a lâ rocha tem uma espessura  $e = 30 \text{ mm}$ , perfazendo um diâmetro total  $d_o = 330 \text{ mm}$ .

### 3.1.7 Para o $\text{CO}_2$

As concentrações de  $\text{CO}_2$  no ar exterior têm níveis entre os 330 e 370 partes por milhão (ppm) [ASHRAE, 2001], sendo que para o interior aplicam-se os valores da Tabela 4. Ainda, no que diz respeito a valores referenciados, é estabelecido pelo RSECE um valor de  $1800 \text{ mg/m}^3$ , correspondente a um máximo de 1000 ppm.

Valores acima dos estabelecidos poderão causar cefaleias, irritação ocular e na orofaringe e fadiga entre outras [ADENE, 2014]

As emissões de CO<sub>2</sub>, por pessoa, ( $\dot{V}_{CO_2}$ ) variam consoante a atividade que esta está a desenvolver, uma vez que as emissões dependem do fluxo de oxigénio consumido, de acordo com a Equação 37.

O modelo matemático do CO<sub>2</sub> depende apenas do valor desta concentração no exterior e da emissão de CO<sub>2</sub> por pessoas que possam estar dentro da sala.

A Figura 45 representa o VI desta modelação implementada.

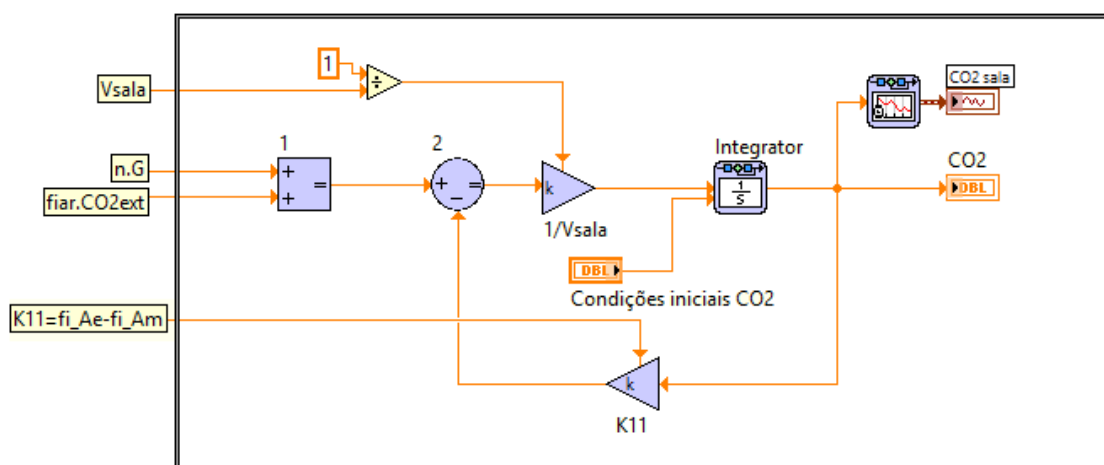


Figura 45. Modelação de concentrações de CO<sub>2</sub> na sala

### 3.1.8 Controlo Proporcional Integral e Derivativo - PID

O controlo PID é um algoritmo de controlo mais utilizado na indústria e tem sido aplicado em todo o mundo para todo o tipo de sistemas de controlo. A popularidade dos controladores PID pode ser atribuída, em parte, ao seu desempenho robusto numa ampla gama de condições de funcionamento e em parte à sua simplicidade funcional, que permite operá-los de uma forma simples e direta.

O objetivo deste controlador é aproveitar as características particulares de cada uma das ações a P, I e D a fim de se obter um melhor e significativo comportamento transitório e em regime permanente do sistema a ser controlado.

O sinal de controlo gerado pelo controlador PID é dado por:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

**Equação 45 Sinal gerado pelo PID [HONEYWELL, 1997]**

Em que:

$K_p$  – É o ganho proporcional

$K_I = K_p \cdot \frac{1}{s \cdot T_I}$  . – É o ganho integral, onde  $T_I$  é o tempo integrativo

$K_D = K_p \cdot s \cdot T_D$  – É o ganho derivativo ou tempo derivativo

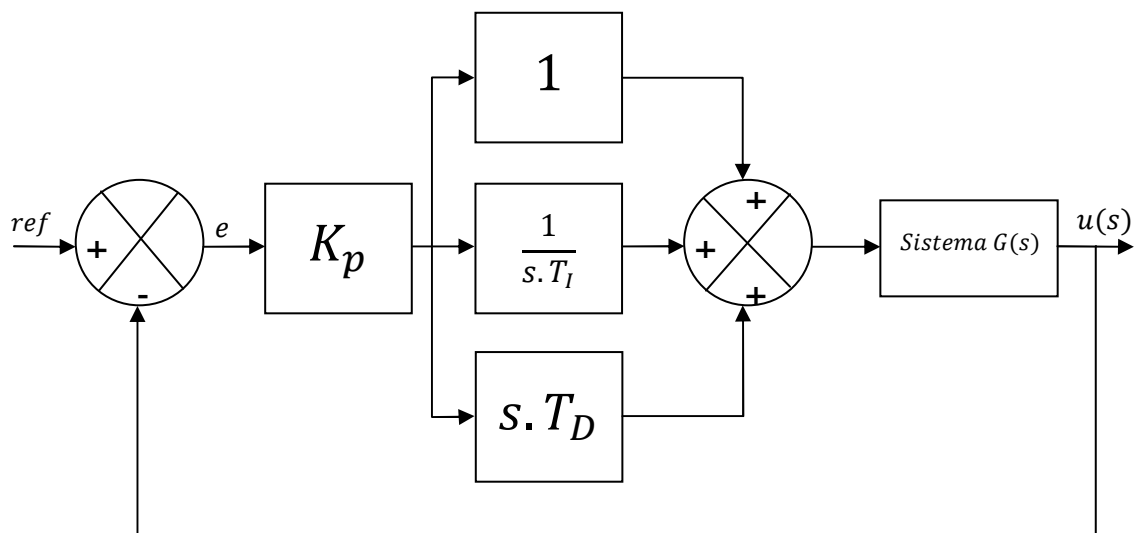
$e(t) = u(t) - ref$  – É o erro, em que  $ref$  é o valor de referência, ou seja, o valor que se pretende manter.

A sua configuração, em função de transferência, pode ser apresentada na Equação 46.

$$U(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + s \cdot K_D = K_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{s \cdot T_I} + s \cdot T_D \right)$$

**Equação 46 Função transferência da Equação 45**

De acordo com a equação anterior, o diagrama de blocos do sistema é definido através da Figura 46.

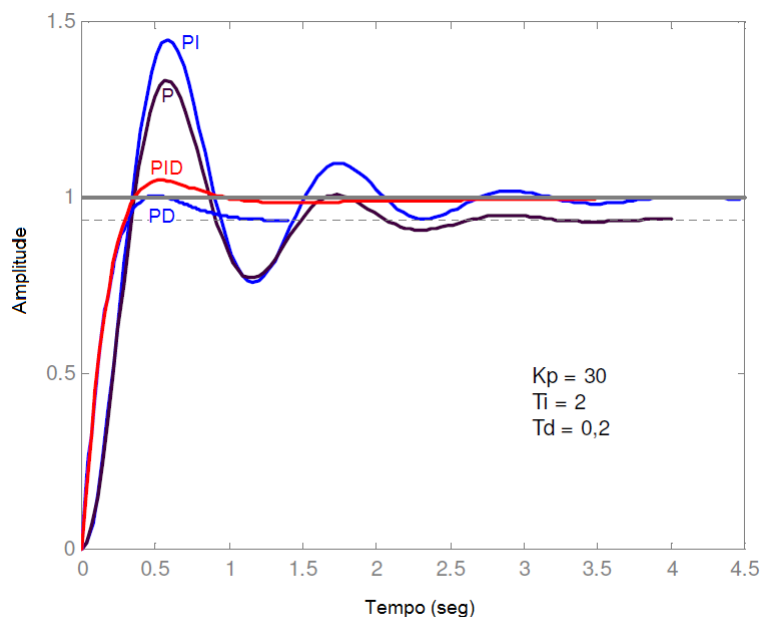


**Figura 46. Diagrama de blocos do PID**

Apesar de termos disponíveis três ações, dependendo da aplicação, poderá não ser necessária a utilização de uma ou mais destas ações, isto é, poderemos utilizar estas ações de modo a obter quatro configurações:

- Proporcional – P
- Proporcional-Integral – PI
- Proporcional-Derivativo – PD
- Proporcional-Integral-Derivativo – PID

A resposta deste controlo a uma entrada de degrau unitário, para as quatro configurações, pode ser visualizado no Gráfico 2.



**Gráfico 2. Resposta do PID a uma entrada de degrau unitário:  $ref = 1$  [MORGADO, 2007]**

Conforme se pode visualizar, as quatro configurações têm comportamentos diferentes. Não se pode dizer que um é mais certo ou errado, mais recomendado ou menos recomendado que outro. Tudo depende do tipo de sistema que se pretende controlar.

#### 3.1.8.1 Aplicação do PID para controlo de temperatura

Embora não tenha sido referido anteriormente, o controlo PID está aplicado no funcionamento na UTA, mas inserido numa placa eletrónica (PLC) cuja modelação não foi concretizada devido à impossibilidade de se conseguir interpretar como é que esta controla o comportamento da UTA. No entanto, o PID tem de estar presente na

modelação para que possa existir um controlo da temperatura e humidade dentro da SATEC, conforme o desejado.

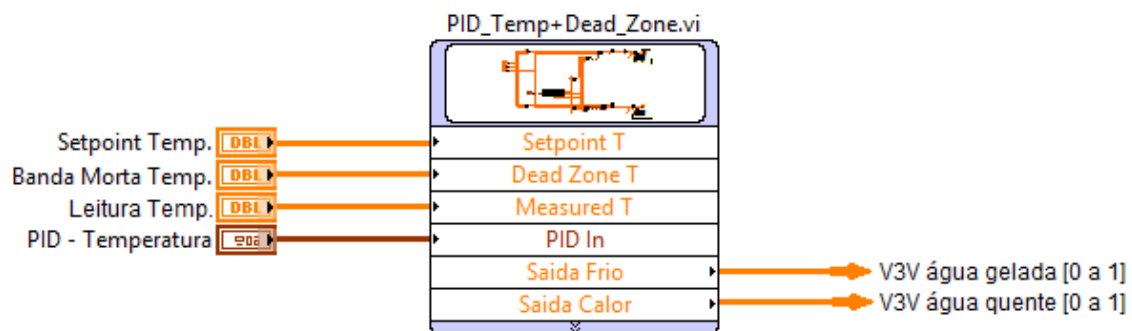
O *software* de desenvolvimento, *LabVIEW*, permite que este controlo seja conseguido através de blocos PID já construídos e disponíveis, bastando para tal seleccionar o tipo de PID desejado.

O PID introduzido irá definir qual a necessidade de arrefecimento ou aquecimento que será fornecido à SATEC, atuando sobre as V3V das baterias, com uma variação entre 0 e 100% (zero e cem por cento) consoante a temperatura de insuflação da SATEC.

O bloco do controlo PID efetuado está presente na Figura 47, onde temos como entradas:

- O *setpoint* de temperatura (valor desejado na sala);
- A banda morta de temperatura (valor entre o qual o PID não reagirá);
- A leitura de temperatura de insuflação da sala;
- Os ganhos do PID (o ganho proporcional, o tempo integrativo e o derivativo).

Nas saídas temos os sinais para as V3V de água gelada e água quente.



**Figura 47. Módulo do PID de temperatura do sistema, em Labview**

Em termos gráficos, este bloco irá dar-nos a saída conforme o representado no Gráfico 3.

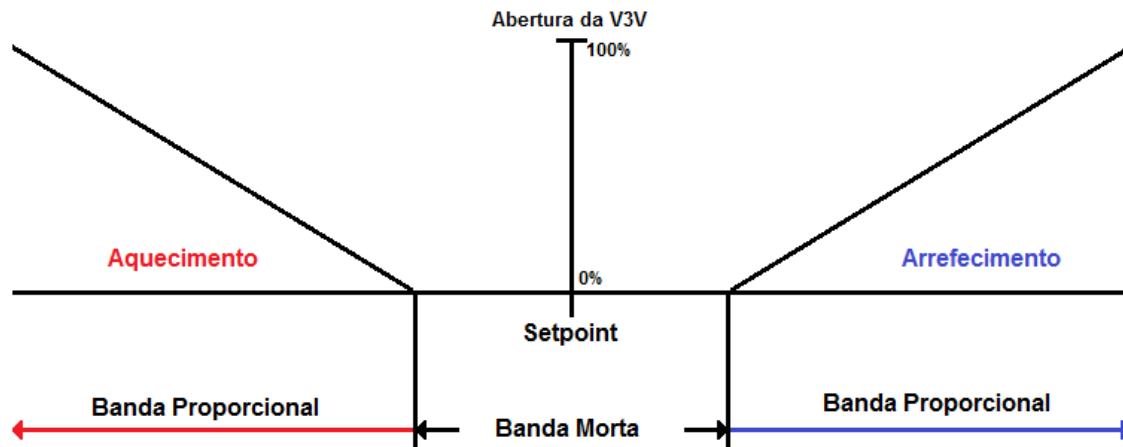


Gráfico 3. Relação entre as saídas do PID e a temperatura

Onde o Ganho Proporcional é o valor do ganho  $P$  do PID.

### 3.1.9 Motores dos Ventiladores

Nos motores dos ventiladores (foto da Figura 48) não foi criada, propriamente, uma modelação. Estes motores são de velocidade fixa. Em relação ao caudal é possível a sua variação através de fecho de registos nas grelhas da conduta, dentro da SATEC.

Aqui, houve o interesse de saber qual o consumo elétrico de cada um dos ventiladores (insuflação e extração) consoante o caudal de ar utilizado. Para que tal fosse possível, foi necessário proceder-se a leituras de diferentes caudais e respetivas perdas de carga ( $\Delta P$ ) dos componentes. Isto deveu-se ao facto de faltar informação sobre a curva característica dos ventiladores dada a sua antiguidade.



**Figura 48. Motor e turbina do ventilador**

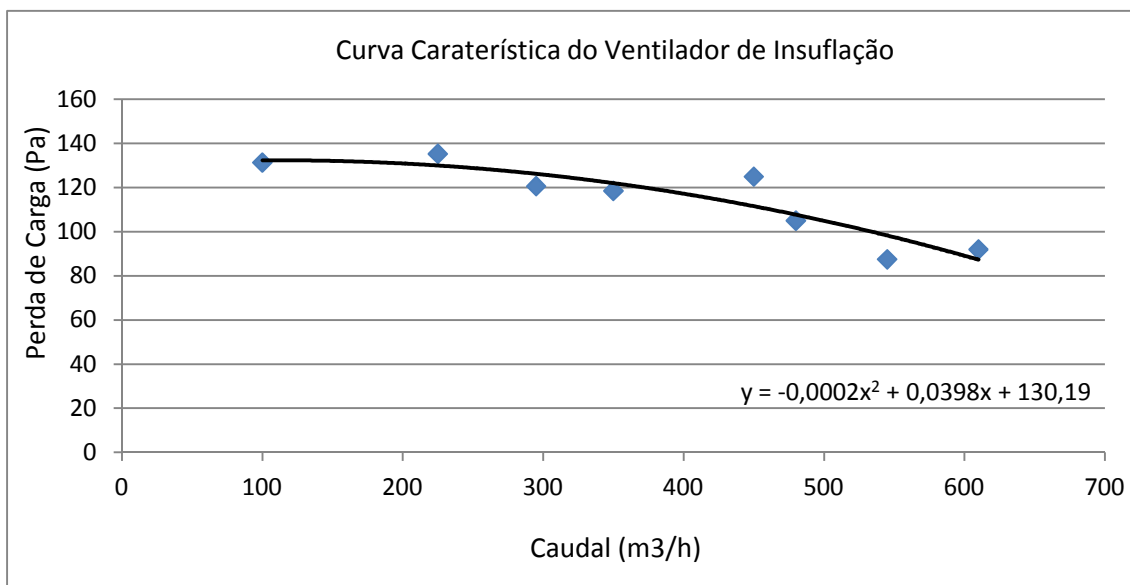
As medições efetuadas podem ser visualizadas na Tabela 6.

**Tabela 6 Medições de caudais e perdas de carga**

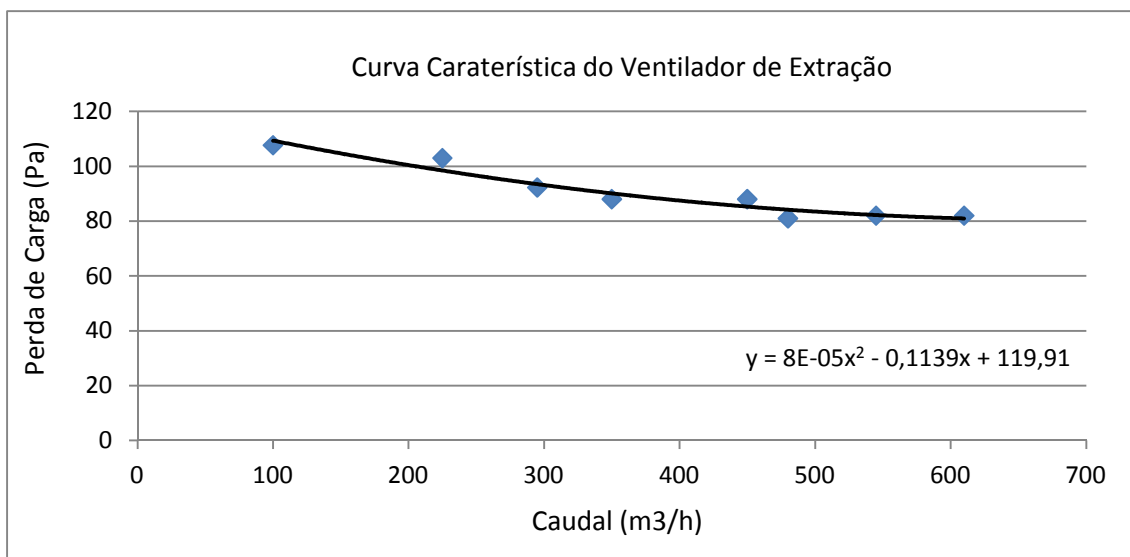
Caudal	Pré Filtro	Bateria água gelada+quente +hum	Ventilador Insuflação	Atenuador acústico	Filtro F7	Ventilador Extração	Conduta Insuflação	Conduta Extração	DP Total Extração	DP Total Insuflação
m <sup>3</sup> /h	Pascal (Pa)									
610	34	23	-103	1	12	-110	22	82	82	92
545	32	20	-103	1	12	-110	22	82	82	88
480	31	17	-102	1	12	-110	44	81	81	105
450	30	16	-102	1	9	-95	69	88	88	125
350	24	15	-105	1	9	-95	69	88	88	119
295	21	15	-107	1	7	-96	77	92	92	121
225	18	14	-106	1	7	-99	96	103	103	135
100	12	11	-105	0	8	-103	100	108	108	131

Com base nesta tabela, foi possível desenvolver os gráficos correspondentes às curvas características dos ventiladores (Gráfico 4 e Gráfico 5) e obter as equações das curvas que nos fornecerá o  $\Delta P$  para qualquer caudal de ar.

Por sua vez, através da expressão apresentada na Equação 47, sabendo os rendimentos e o fator de potência ( $\cos(\varphi)$ ) dos motores, é possível retirar os consumos elétricos, pretendidos.



**Gráfico 4. Curva caraterística (medida) do ventilador de insuflação**



**Gráfico 5. Curva caraterística (medida) do ventilador de extração**

$$\eta = \frac{\Delta P \cdot \dot{V}}{P_e} = \frac{\Delta P \cdot \dot{V}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi)} \Leftrightarrow I = \frac{\Delta P \cdot \dot{V}}{\eta \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot \cos(\varphi)}$$

**Equação 47 Corrente elétrica em função do rendimento, caudal e potência elétrica**

Onde,

$\eta$  - Rendimento do motor

$\Delta P$  - Perda de carga do sistema

$\dot{V}$  - Caudal do sistema

$P_e = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$  - Potência elétrica de um equipamento trifásico

$U$  - Tensão composta

$I$  - Corrente elétrica

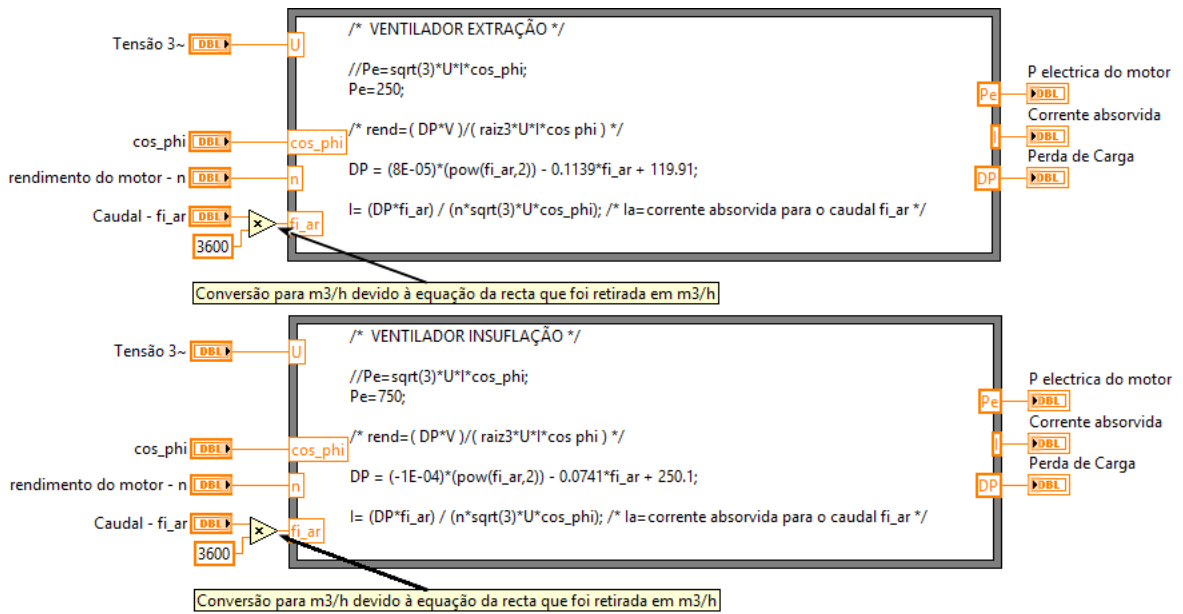
$\cos(\varphi)$  - Fator de potência

No que se refere aos dados dos motores, poderão ser encontrados na Tabela 7.

**Tabela 7 Dados de características dos motores dos ventiladores**

Dado	Motor INSUFLAÇÃO	Motor EXTRAÇÃO	Unidades
Potência	750	250	W
Rendimento	75	68	%
Tensão	400	400	VAC
$\cos(\varphi)$	0,8	0,67	-

Os fórmulas do *LabVIEW* que implementam estes cálculos estão descritos na Figura 49.



**Figura 49. Cálculo da corrente elétrica de ambos os ventiladores**

### 3.1.10 *Graphic User Interface* da modelação do Sistema de AVAC

O GUI do simulador está presente na Figura 50, onde se pode verificar o modelo da UTA, com as respetivas condutas de insuflação e extração até ao espaço a climatizar.

Estes contêm várias entradas e várias saídas. As entradas (*inputs*) são os dados que o utilizador pode alterar conforme o tipo de simulação que pretende efetuar e as saídas (*outputs*) são os dados que irá obter durante a simulação. Para mais informações sobre estes *inputs* e *outputs*, consulte o capítulo 9 - Manual de Utilizador do Simulador.

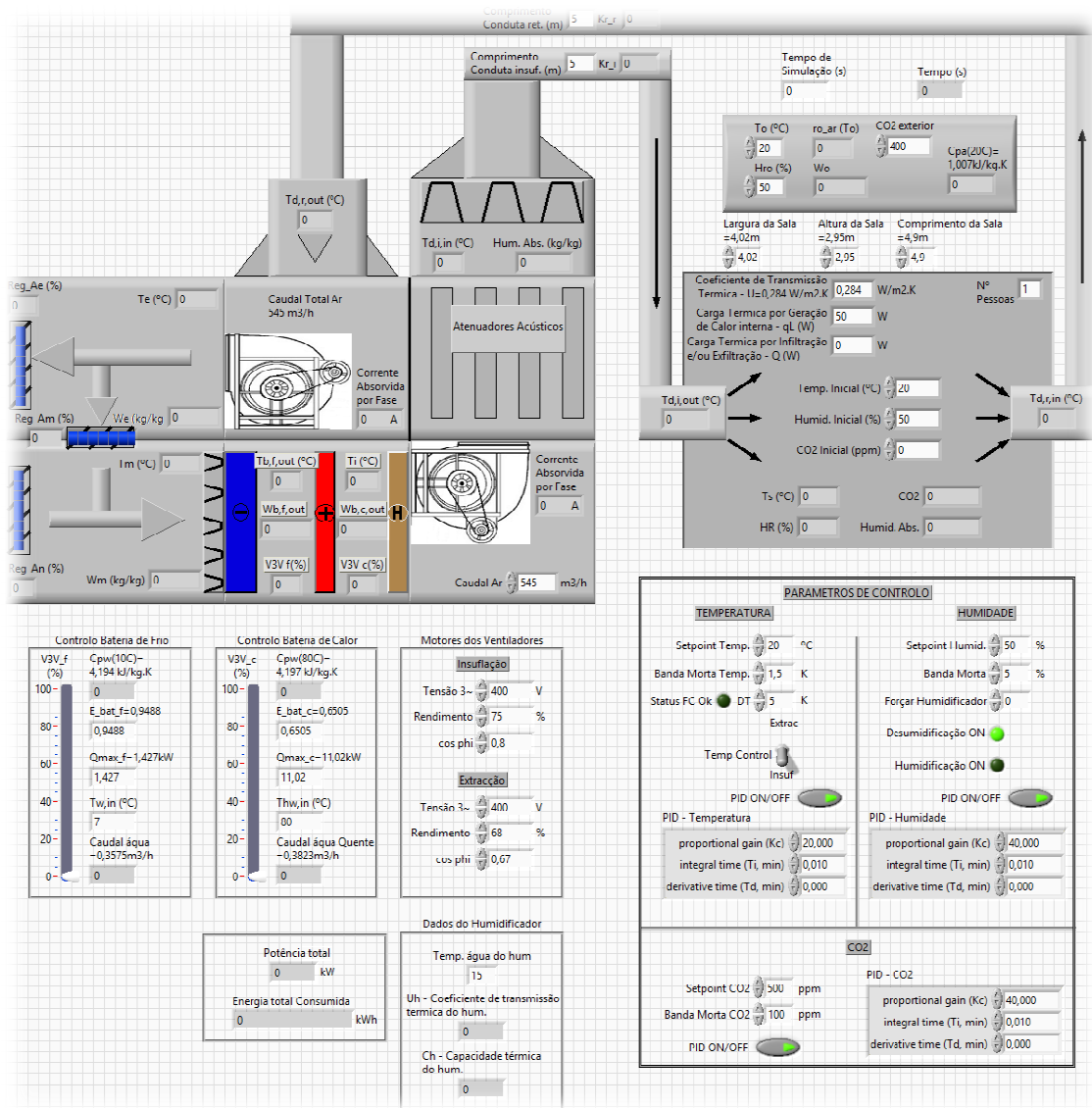


Figura 50. GUI do Simulador

## 4. ENSAIOS, SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS

Por forma a validar o simulador, foram efetuados oito ensaios reais na SATEC, com 1h10m, cada. Estes estão descritos no subcapítulo 4.1.

Posteriormente, foram simulados estes ensaios na aplicação desenvolvida. A apresentação destes está no subcapítulo 4.2.

### 4.1. Realização de Ensaios Experimentais

Para os ensaios, reais, foram definidos dois caudais de ar para verificar qual o comportamento do sistema, para vários valores inseridos:

- Um caudal de 250 m<sup>3</sup>/h para seis ensaios onde, posteriormente, são inseridos quatro *setpoints* para a temperatura do ar da SATEC: 18°C, 20°C, 25°C e 30°C;
- Um com 120 m<sup>3</sup>/h para dois ensaios, tendo sido definidos dois *setpoints* para a temperatura do ar da SATEC: 20°C e 30°C.

Para afinação dos caudais (através da velocidade do ar e da área das grelhas, com 0,02 m), utilizou-se o instrumento de medição AMI301, presente na Figura 7, com o anemómetro (ver Figura 51) e regularam-se os registos das grelhas de insuflação e de extração da sala (insuflação e de extração apresentados na Figura 28) por forma a obter os caudais definidos.



**Figura 51. Anemómetro**

Iniciaram-se os ensaios pelo arrefecimento e de seguida os de aquecimento.

Definiu-se que seriam efetuados os ensaios de arrefecimento em primeiro lugar para que a inércia térmica da BAQ não influenciasse os ensaios, ou seja, para que a água quente no interior da BAQ não fizesse um ligeiro aquecimento à temperatura levando a que os valores de insuflação fossem alterados.

Entre cada ensaio, foi feito um intervalo de, pelo menos, trinta minutos para estabilização da temperatura da SATEC.

Relativamente aos instrumentos de medição, foram utilizados os seguintes:

- KIMO AMI301 – para velocidade do ar. Precisão:  $\pm 2\%$  da leitura  $\pm 0,06$  m/s para o aparelho e  $\pm 2\%$  da leitura  $\pm 0,2$  m/s para o anemómetro;
- KIMO AMI301 – para temperatura e humidade da sala. Precisão:  $\pm 1\%$  da leitura  $\pm 1,5\%RH$  e  $\pm 2\%$  da leitura  $\pm 0,1$  °C para o Termo higrómetro;
- TESTO 435 com Sonda Temperatura IR NTC (ver Figura 52) – para temperatura de insuflação da sala. Precisão:  $\pm 0,2$  °C;
- KIMO AQ200 (ver Figura 53) – para temperatura, humidade e CO<sub>2</sub> exteriores. Precisão:  $\pm 0,3\%$  da leitura  $\pm 0,25$  °C para a temperatura,  $\pm 3\%$  da leitura ou 50ppm para o CO<sub>2</sub> e  $\pm 1,8\%RH$ <sup>21</sup>;
- KIMO KH110 *Datalogger* + Sensor CO<sub>2</sub> GE T8041 (ver Figura 54) – para medição de quatro pontos de CO<sub>2</sub> da sala: Precisão:  $\pm 40$  ppm +3% da leitura.

---

<sup>21</sup> Valor dependente da temperatura:  $\pm 0,04 \times (T-20)$  %RH (se  $T < 15^\circ C$  ou  $T > 25^\circ C$ ).



**Figura 52.** Testo 435 + Sonda NTC



**Figura 53.** KIMO AQ200



**Figura 54.** KIMO KH110 *Datalogger* + Sensor CO<sub>2</sub> GE T8041

Segundo recomendações de NTvvs 114, descrito por MONTEIRO, os sensores de CO<sub>2</sub> deverão estar em posições específicas. Estas estão presentes na Tabela 8 [MONTEIRO, 2013].

**Tabela 8** Posição, em altura, das sondas de CO<sub>2</sub> [MONTEIRO, 2013]

Sonda	Altura do chão
1	0,83
2	1,25
3	1,68
4	2,52

Os dois primeiros ensaios foram realizados com uma pessoa no interior e sem pessoas nos restantes.

#### 4.2. Simulações na Aplicação

Dada a impossibilidade de se conseguir saber como é que o PID está implementado no controlador, houve a necessidade de se proceder a várias simulações para o afinar, no simulador.

Após o *tunning* do PID procederam-se às simulações dos ensaios reais efetuados, com o controlo pela temperatura de extração da sala.

Para tal, foram inseridos os valores das condições ambientais exteriores, os valores das condições ambientais interiores da SATEC, o valor do caudal de ar e a quantidade de pessoas. Foram, ainda, confirmados os valores das cargas térmicas da sala e alterado o *setpoint*, conforme o ensaio.

Os valores dos ganhos Proporcional, Integral e Derivativos (PID) após o *tunning* foram de:

- Ganho Proporcional –  $K_p = 40$ ;
- Ganho Integral –  $K_I = 4,5$ ;
- Ganho Derivativo –  $K_D = 0$ .

Tornando o controlo do tipo PI.

### 4.3. Análise de Resultados

Com os dados resultantes dos ensaios e das simulações, pôde criar-se o Gráfico 6, o Gráfico 7 e o Gráfico 8, para a temperatura, para a humidade e para o CO<sub>2</sub> da SATEC, respetivamente. Nestas análises foram considerados os valores iniciais e finais de cada ensaio, sendo que no CO<sub>2</sub>, foi considerada a média dos valores dos quatro sensores, presentes no Anexo C.

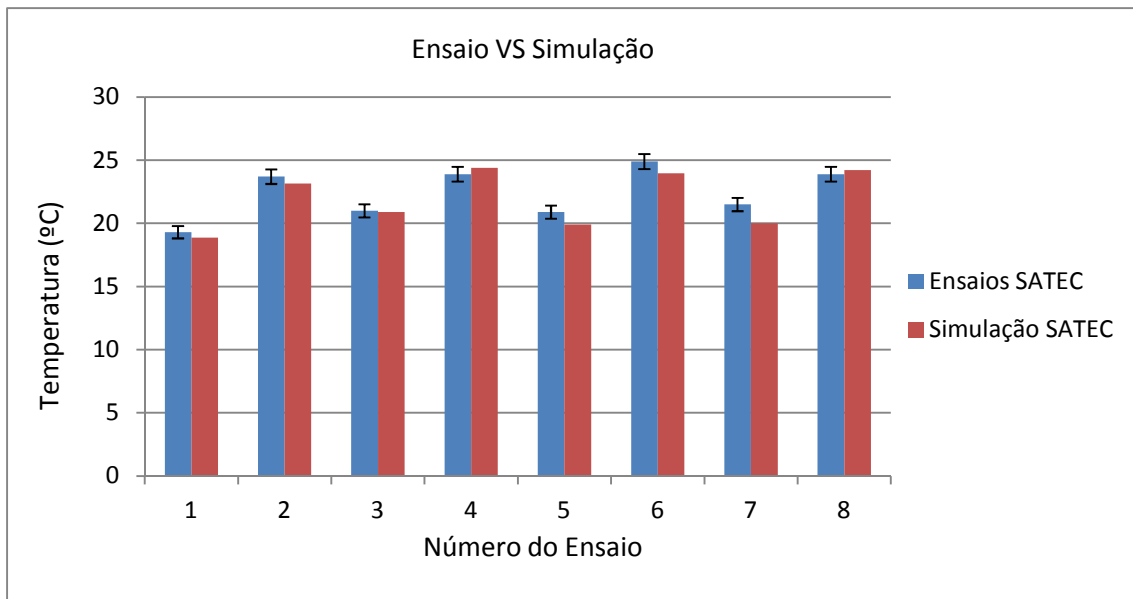


Gráfico 6. Ensaio VS Simulação da Temperatura da SATEC

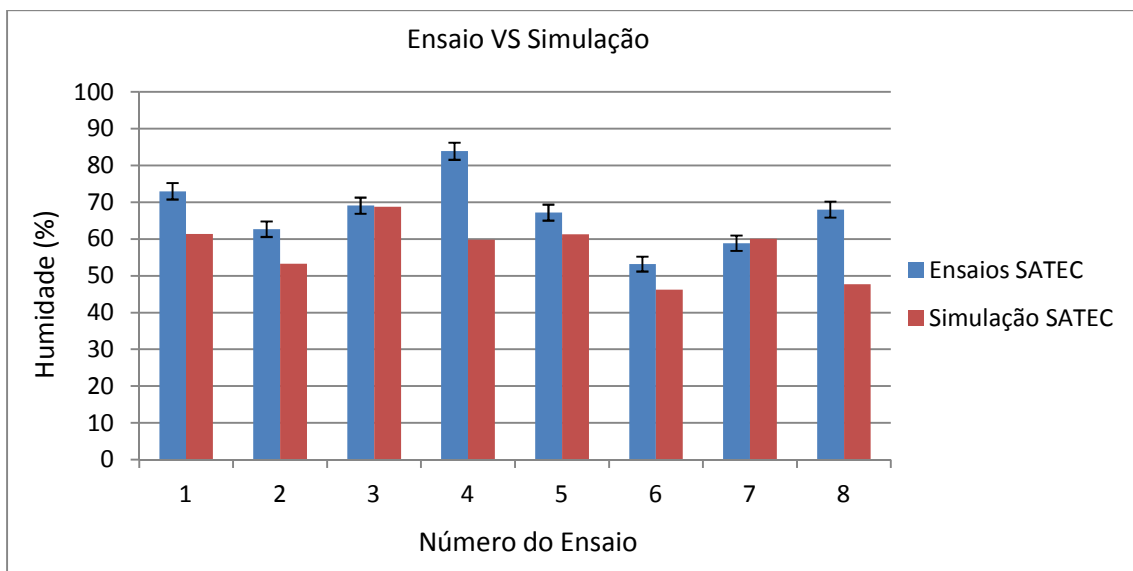
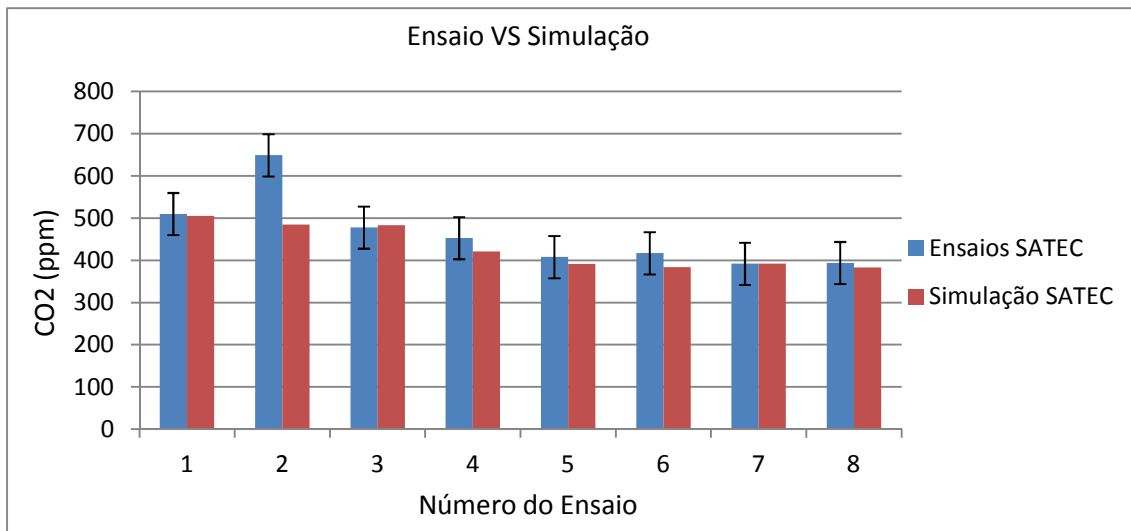


Gráfico 7. Ensaio VS Simulação da Humidade Relativa da SATEC



**Gráfico 8. Ensaio VS Simulação da concentração de CO<sub>2</sub> da SATEC**

A razão pela qual foram realizados ensaios com diferentes *setpoints* e diferentes caudais, prendeu-se com o facto de ser pretender verificar a validade do modelo, criado no simulador, em diferentes situações de controlo.

Analisando os gráficos, confirma-se claramente que o modelo é válido para temperatura e para o CO<sub>2</sub>, contudo não é tão válido para a humidade relativa. Existem dois grandes fatores para que a humidade relativa não esteja dentro dos valores previstos:

- Uma das razões prende-se com o tipo de circulação de ar na sala: a mistura de ar é deficientemente realizada e a climatização da sala não se torna homogénea. A Figura 55 apresenta a circulação de ar efetuada na SATEC. Segundo a ASHRAE, a este processo dá-se o nome de *Entrainment flow* (Fluxo de Arrastamento), onde o ar é insuflado por difusores ou grelhas e é extraído por grelhas. O fluxo de arrastamento é conhecido pela pobre mistura de ar na sala, uma vez que uma grande quantidade de ar que entra na sala é, diretamente, extraído devido ao facto deste percorrer o “caminho mais fácil e mais curto”. Este fenómeno designa-se por *short-circuiting flow* (fluxo de curto-circuito) [ASHRAE, 2009]. As simulações realizadas na aplicação apresentam valores numa perspetiva homogénea da sala. Para que se possa ter uma noção dos valores de humidade na sala em vários pontos, com este tipo de circulação, dever-se-ia

efetuar um estudo da mesma através de análise CFD<sup>22</sup>, que não é o objetivo deste trabalho.

- A segunda razão diz respeito à possível evaporação de água que a BAG poderá conter devido ao fenômeno da condensação (ver início do subcapítulo 3.1.3) e que é evaporado devido ao diferencial entre  $P_w$  e  $P_{ws}$  (ver explicação do subcapítulo 3.1.5), fazendo humidificar o ar.

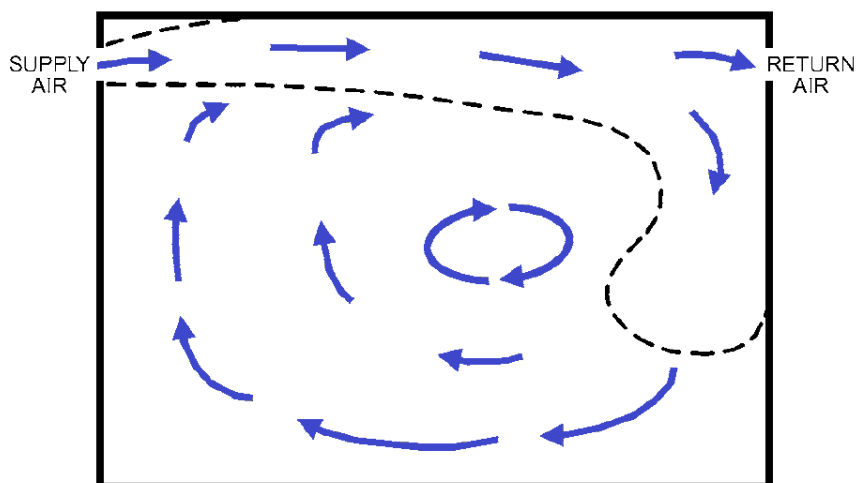


Figura 55. Fluxo de arrastamento de ar dentro de um espaço

Ainda na análise aos valores obtidos através dos gráficos, no que diz respeito à temperatura, pode verificar-se que o desvio, em relação à precisão do instrumento (erro de leitura da sonda), não ultrapassa os 7,5 %, que se traduz numa diferença de 1,5 °C entre o ensaio real e o simulado. Na Tabela 9, demonstra essas percentagens para cada simulação. Esta diferença não é uma diferença que se possa considerar exagerada, dada a incorreta circulação do ar e dado que o modelo está a prever situações de homogeneidade da sala. De uma forma geral, 75% dos valores estão dentro dos valores previstos, tendo em conta a precisão dos aparelhos de medida.

---

<sup>22</sup> Do inglês: *Computational Fluid Dynamics*. CFD é o termo usado para descrever uma série de métodos para calcular a temperatura, a velocidade e outras propriedades de um fluido, através do espaço.

**Tabela 9 Erros da sonda e desvio de registos na Temperatura**

Simulação	Ensaio SATEC	Simulação SATEC	Erro Sonda (+-)	Diferença de registos	Desvio (%)
1	19,3	18,93	0,486	0,37	2,0
2	23,7	23,49	0,574	0,21	0,9
3	21	21,19	0,52	-0,19	-0,9
4	23,9	24,50	0,578	-0,6	-2,4
5	20,9	19,88	0,518	1,02	5,1
6	24,9	25,13	0,598	-0,23	-0,9
7	21,5	20,00	0,53	1,5	7,5
8	23,9	24,24	0,578	-0,34	-1,4

Relativamente à humidade, verificou-se um desvio, na 4ª simulação, de 40,8%. Este desvio é justificado pelo não cumprimento do tempo estipulado para estabilização das condições atmosféricas da sala, nomeadamente os 30 min, anteriormente definidos. Isto deveu-se ao facto da sala estar requisitada para a realização de outros ensaios não relacionados com este. Por consequência, o escoamento das gotículas de água que se encontravam na BAG, devido ao ensaio anterior (ensaio nº. 3), não foi totalmente feito. Desta forma, as gotículas de água que permaneceram na BAG, evaporaram, provocando humidificação na sala.

Eventualmente, para o 8º ensaio, terá ocorrido o mesmo fenómeno de humidificação, embora tenha sido respeitado o tempo imposto. Aparte destes dois, o maior desvio deu-se no 6º ensaio, com um valor de 23,3%.

Da interpretação destes valores, pode-se concluir que as simulações executadas são ineficazes para validar o modelo. Para contrariar esta situação, teria sido necessário efetuar medidas em vários pontos da sala e através desses registos proceder-se ao cálculo da média dos valores.

Na Tabela 10 encontram-se os dados relativos ao referido anteriormente.

**Tabela 10 Erros da sonda e desvio de registos na Humidade Relativa**

Simulação	Ensaio SATEC	Simulação SATEC	Erro Sonda (+-)	Diferença de registos	Desvio (%)
1	73	61,2	2,23	11,79	19,3
2	62,7	52,3	2,127	10,4	19,9
3	69,1	68,4	2,191	0,7	1,0
4	83,9	59,6	2,339	24,3	40,8
5	67,2	61,4	2,172	5,8	9,4
6	53,2	43,2	2,032	10,05	23,3
7	58,9	60,1	2,089	-1,22	-2,0
8	68	47,6	2,18	20,43	42,9

Analisando o caso das emissões de dióxido de carbono, podemos verificar que 87,5 % dos ensaios validam o modelo em questão. Sendo que as simulações previstas respeitam a margem de erro dos sensores, nomeadamente os  $\pm 40$  ppm +3% da leitura.

No caso específico da simulação nº. 2 (ver Tabela 11), apesar da discrepância verificada, não foi possível determinar a causa que justificasse esse comportamento, sendo que, neste caso concreto, o desvio registado foi de 33,92 %.

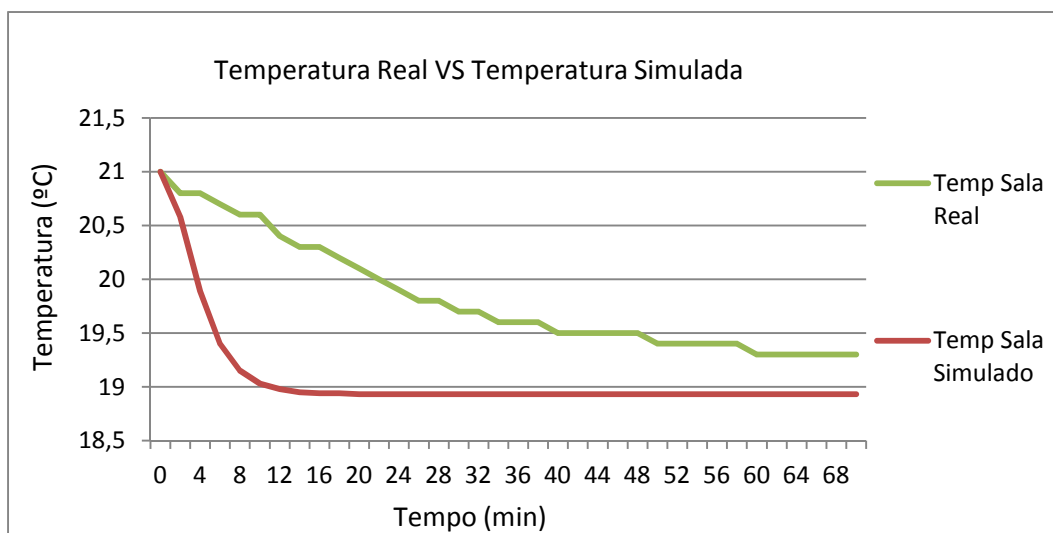
**Tabela 11 Erros da sonda e desvio de registos no Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)**

Simulação	Ensaio SATEC	Simulação SATEC	Erro Sonda (+-)	Diferença de registos	Desvio (%)
1	510	504,7	55,3	5,3	1,05
2	649	484,6	59,47	164,4	33,92
3	478	484,6	54,34	-6,6	-1,36
4	453	421,5	53,59	31,5	7,47
5	408	390,5	52,24	17,5	4,48
6	417	384,0	52,51	33	8,59
7	392	391,6	51,76	0,4	0,10
8	394	382,5	51,82	11,5	3,01

Os resultados dos ensaios reais podem ser encontrados no Anexo C, na Tabela 17, na Tabela 19, na Tabela 21, na Tabela 23, na Tabela 25, na Tabela 27, na Tabela 29 e na Tabela 31.

Analisando o comportamento do controlo PID, verifica-se que a resposta não ocorre de forma idêntica. Isto deve-se ao facto de não serem conhecidos os procedimentos que o controlador percorre, na sua programação. Todavia, em regime *steady-state*<sup>23</sup>, verifica-se que essa condição tende a aproximar-se.

O Gráfico 9 e o Gráfico 12 descrevem a variação da temperatura da sala em ensaios reais em sobreposição com os valores fornecidos pelo simulador. Da mesma forma, o Gráfico 10 e o Gráfico 13 descrevem a variação para a humidade. Para o CO<sub>2</sub>, está traduzido no Gráfico 11 e no Gráfico 14.

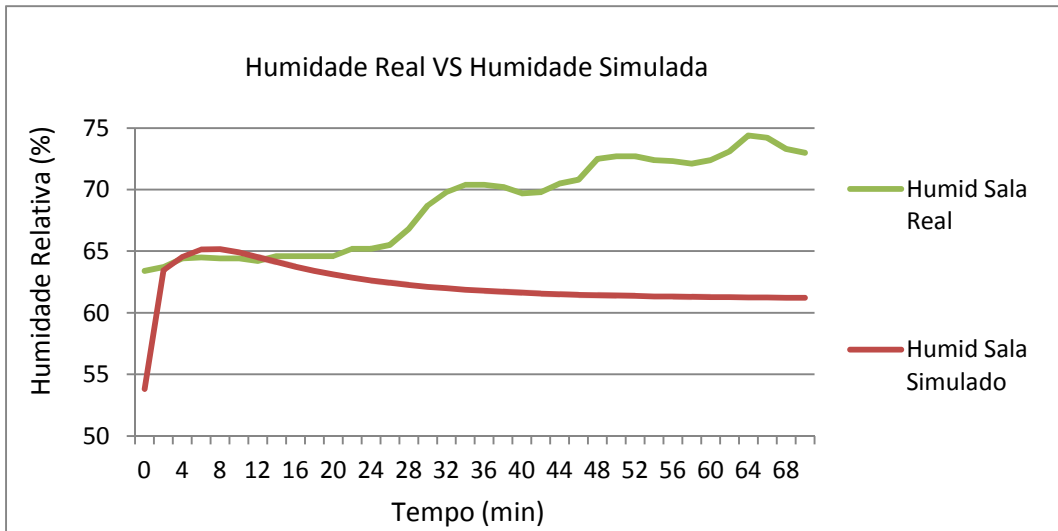


**Gráfico 9. Variação de temperatura da sala para o ensaio real e para a simulação, com setpoint de 18°C**

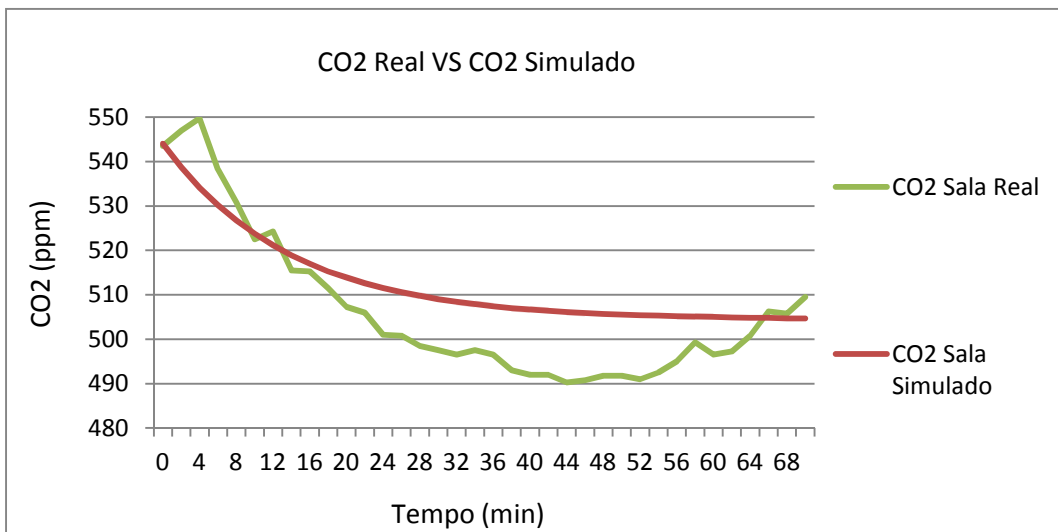
---

<sup>23</sup> Do inglês estado estacionário, é um regime onde os valores se mantêm estáveis durante um determinado período de tempo.

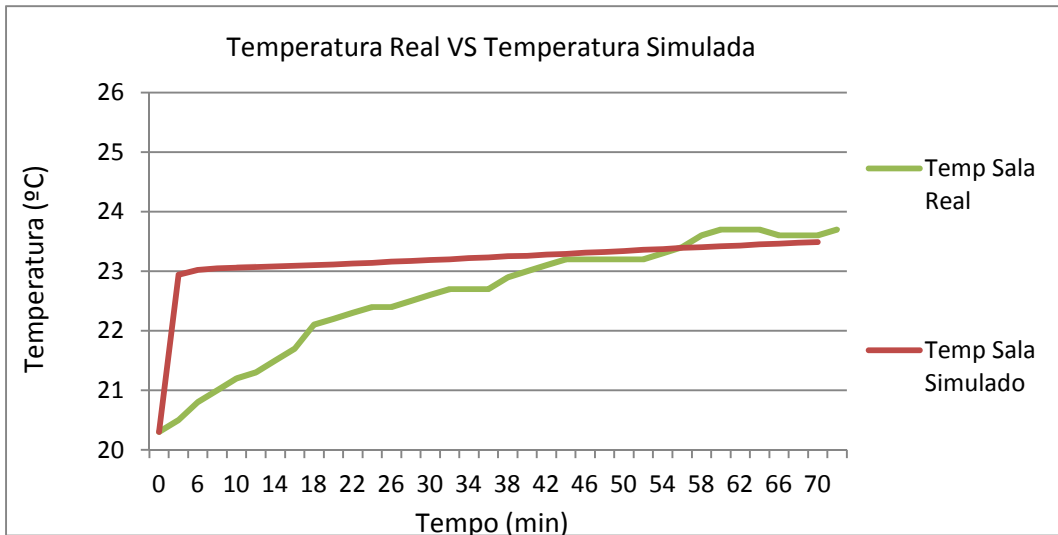
---



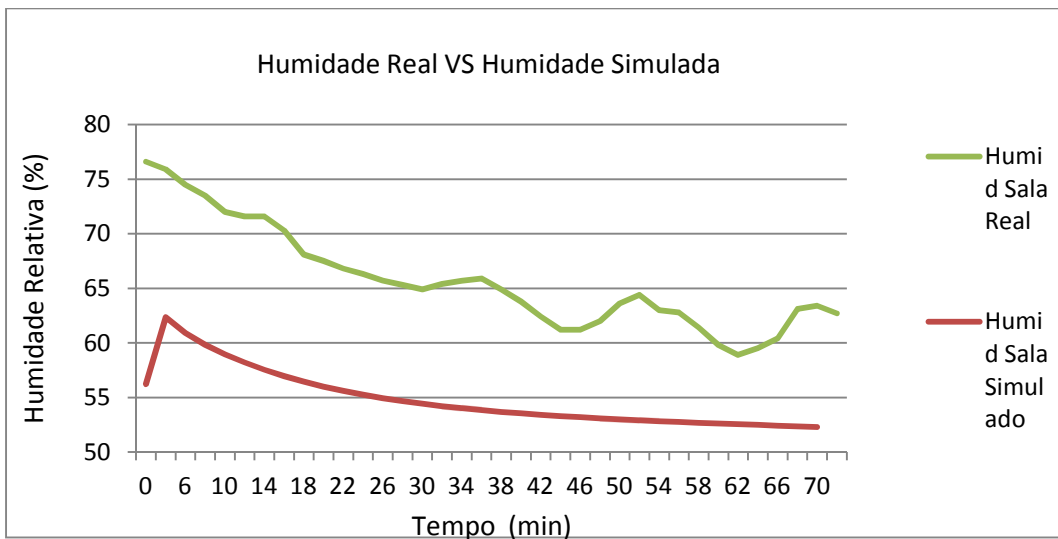
**Gráfico 10. Variação de umidade da sala para o ensaio real e para a simulação**



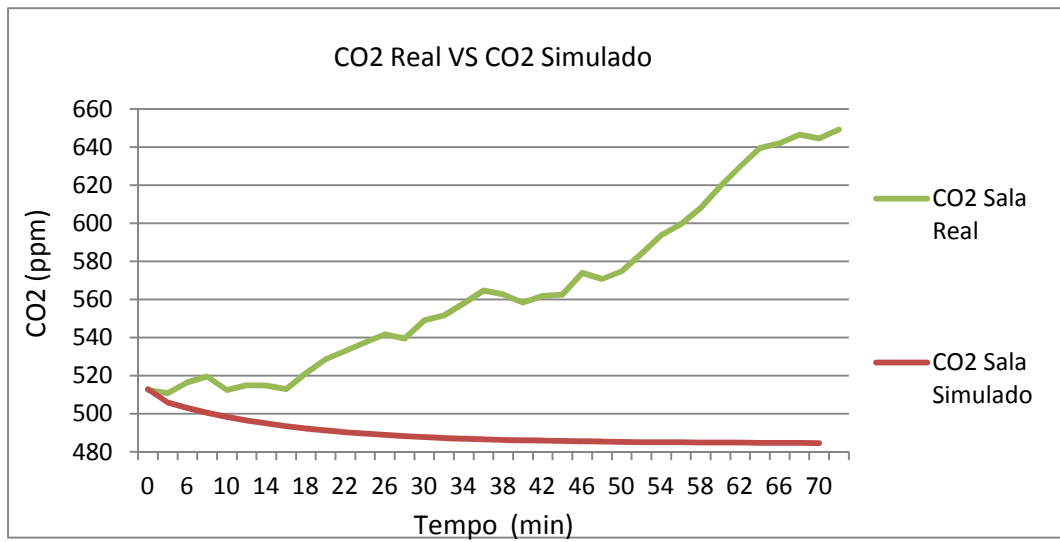
**Gráfico 11. Variação de CO<sub>2</sub> da sala para o ensaio real e para a simulação**



**Gráfico 12. Variação de temperatura da sala para o ensaio real e para a simulação, com setpoint de 25°C**



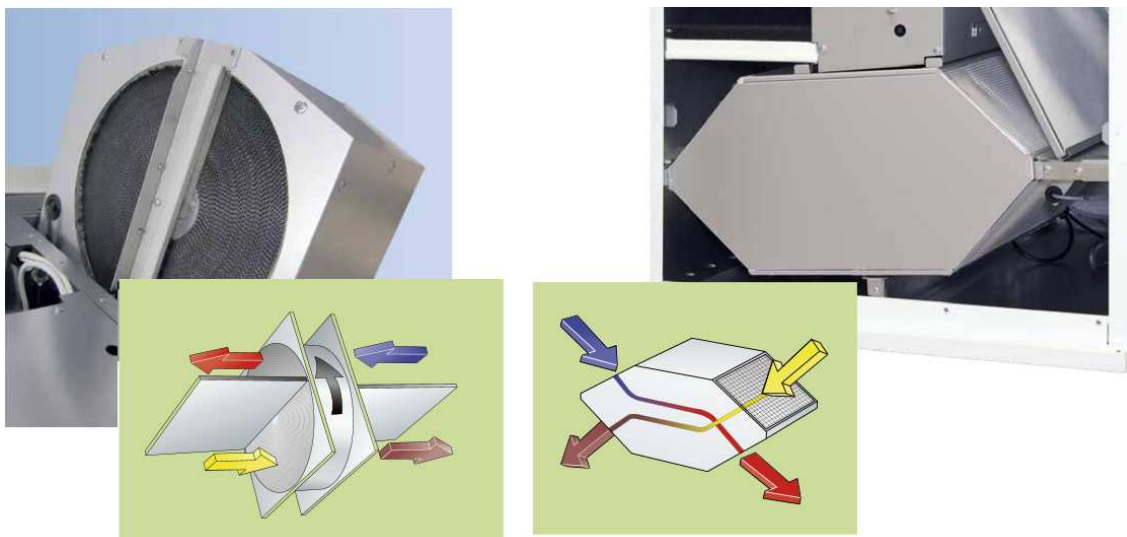
**Gráfico 13. Variação de humidade da sala para o ensaio real e para a simulação**



**Gráfico 14. Variação de CO<sub>2</sub> da sala para o ensaio real e para a simulação**

## 5. IMPLEMENTAÇÃO DE FUNCIONALIDADES NO SIMULADOR

Nos dias de hoje, com o extenso desenvolvimento da eletrónica a custos reduzidos e a sua aplicação no AVAC, existem imensas aplicações e funcionalidades para as UTA's. Entre elas destaca-se o controlo de variação de caudais e pressões de ar, controlo de sondas de temperatura para aproveitamentos de calor de extração (*free-heating*), através de rodas térmicas ou permutadores de fluxo cruzado (ver Figura 56) – estas possibilidades não estão disponíveis na UTA em estudo, pois não existem estes componentes.



**Figura 56. Componentes para aproveitamento de calor: Roda térmica (à esquerda); placa de fluxo cruzado (à direita)**

No entanto, o aproveitamento de temperatura do ar exterior, chamado de *free-cooling* (FC) é uma das opções mais comuns em UTA's, este processo consiste na abertura do RAN, de modo, a aproveitar a temperatura do ar exterior para arrefecer o espaço.

Outra aplicação que é utilizada, frequentemente, é o controlo de concentrações de CO<sub>2</sub> no interior de espaços em espaço com grande afluência humana, tais como centros comerciais, escolas, *open-space's*<sup>24</sup> de escritórios e *call-center's*<sup>25</sup>.

Neste trabalho, como parte do desenvolvimento, foram acrescentadas estas duas últimas funcionalidades (controlo de FC e controlo de CO<sub>2</sub>), acrescida da desumidificação.

Nos capítulos seguintes demonstram como foram aplicadas estas funcionalidades no simulador *LabVIEW*.

### 5.1. Inserção de módulo de controlo de *free-cooling*

Este módulo foi efetuado com base em seis variáveis:

- 1 *Setpoint*;
- 2 Temperatura exterior;
- 3 Temperatura da sala;
- 4 DT (Diferença de temperatura entre o exterior e a sala);
- 5 Humidade Relativa da Sala;
- 6 Pedido de frio do PID de temperatura.

Com base nestas variáveis, foi definido que o FC atuará sobre os registos de ar, fazendo-os variar de acordo com o PID de temperatura, caso:

- A temperatura de ar exterior seja inferior ao *setpoint*;

---

24 São escritório amplos onde, normalmente, a única divisão entre dois escritórios é um biombo ou uma placa decorativa.

25 Este é, praticamente, o mesmo do anterior, difere na sua utilização: este refere-se a atendimentos telefónicos num espaço amplo.

- A temperatura exterior seja inferior à temperatura da sala em  $X$  °C, definidos pelo utilizador na variável DT;
- A humidade relativa exterior esteja compreendida entre 30% e 60%, com base nas zonas de conforto apresentadas no Gráfico 1;
- Ocorra pedido para arrefecimento por parte do controlo de temperatura.

A Figura 57 representa o VI do FC, onde estão impostas as condições anteriores.

No que se refere ao bloco de condição:

- Em “True”, ou seja, se as condições para FC estiverem válidas, efetua a variação do RAN e por consequência no de ar extraído e do ar de mistura (estão, mecanicamente, interligados) e coloca a V3V da bateria de água gelada a 0%. Não faz sentido executar o aproveitamento de temperatura do ar exterior e, ao mesmo tempo, ter esta válvula de três vias a funcionar: é considerado desperdício de energia e não aproveitamento.
- Em “False”, ou seja, se uma ou mais condições não forem válidas, coloca o RAN no valor definido pelo utilizador e a saída para a V3V de água gelada passa a ser controlada pelo PID da temperatura.

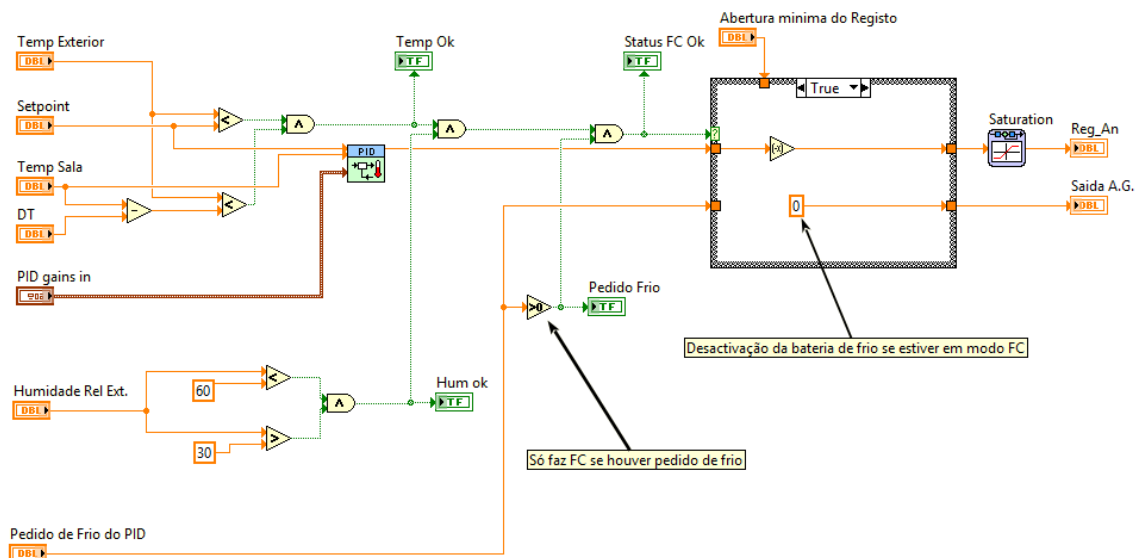


Figura 57. VI do módulo de FC

## 5.2. Inserção de módulo de controlo de CO<sub>2</sub>

Para este módulo, a sua implementação, foi mais simples. O valor de CO<sub>2</sub> da sala é definido num *setpoint* do GUI, assim com a banda morta e o PID (ver Manual de Utilizador do Simulador).

A Figura 58 apresenta o VI desta funcionalidade, onde este fará variar o RAN consoante a necessidade: se o CO<sub>2</sub> estiver acima do valor definido mais a banda morta, o registo abrirá, caso contrário fechará ou manterá, de acordo com a percentagem que o PID fornecer. Se por ventura houver a necessidade de arrefecer por FC, numa percentagem mínima de abertura do registo, e necessitar de renovar o ar devido a elevado CO<sub>2</sub>, o RAN responderá ao sinal que obtiver maior valor através do bloco presente na Figura 59.

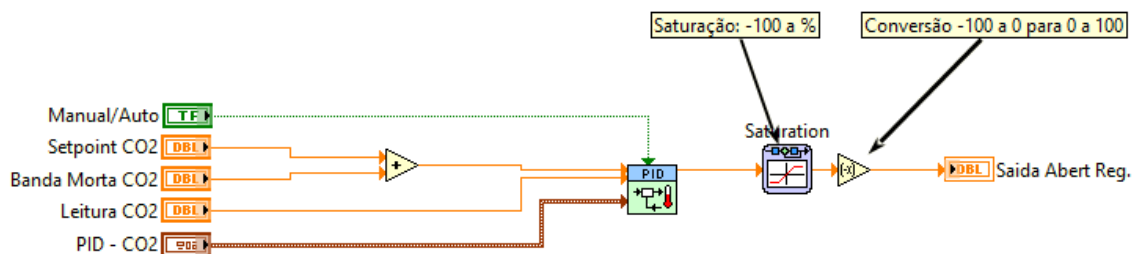


Figura 58. VI do módulo de CO<sub>2</sub>

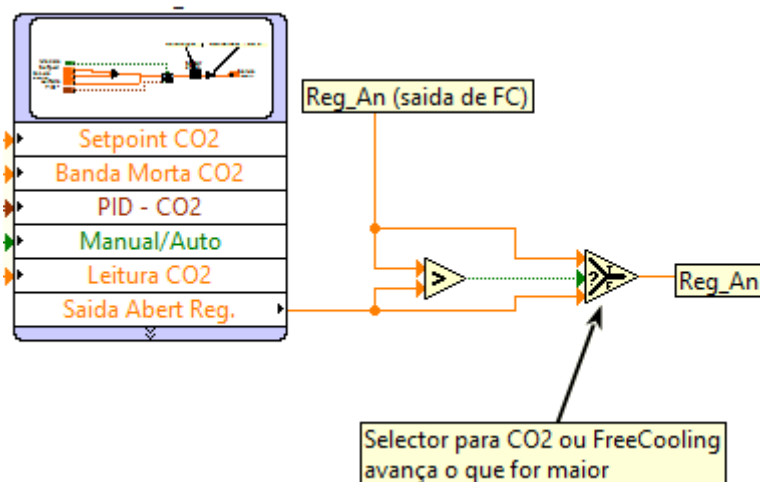


Figura 59. Sinais para o registo de ar novo

### 5.3. Inserção de módulo de controlo de desumidificação

De acordo com o explorado nos capítulos 2.3.2.2 e 3.1.3 sobre a BAG, o processo de desumidificação acontece com esta bateria em funcionamento.

Tendo isto em conta, bastou para tal a inserção de um controlo para a humedificação/desumidificação. O controlo deste processo funcionará conforme apresentado no Gráfico 15.

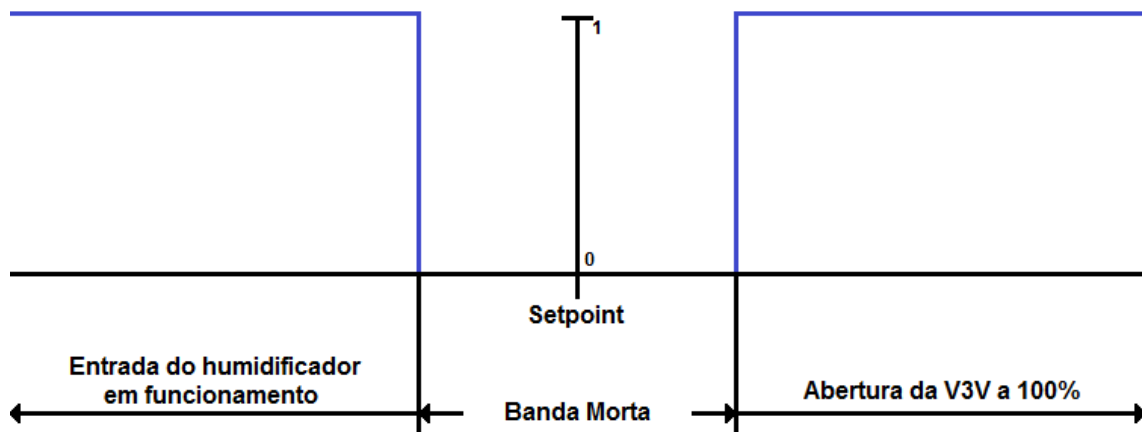
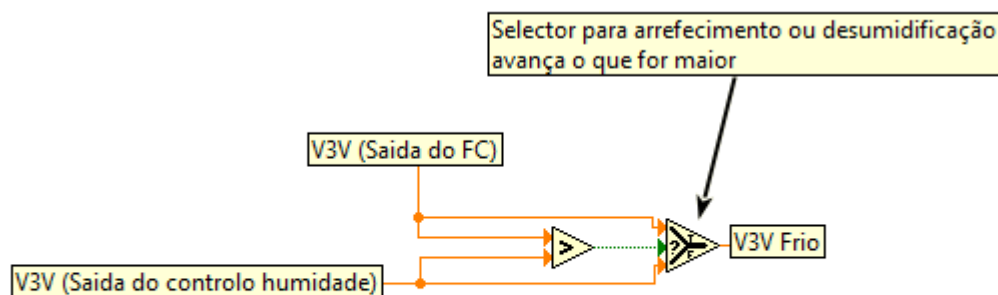


Gráfico 15. Processo de funcionamento do controlo de humidade

Semelhante ao referido na Inserção de módulo de controlo de CO<sub>2</sub>, a saída para a V3V da bateria de água gelada será feita de acordo o sinal de maior valor que chegar ao seletor presente na Figura 60. O controlo de humidade enviará um sinal ON/OFF quer para a humedificação, quer para a desumidificação, isto é, se houver a necessidade de humedificar, o humidificador ativará na sua totalidade; se houver necessidade de desumidificar, a V3V da BAG funcionará a 100%.



**Figura 60. Sinais para a V3V de água gelada**

Caso a desumidificação esteja ativa, é de prever uma descida de temperatura na sala, devido ao arrefecimento. Se este arrefecimento for inferior ao valor de *setpoint* de temperatura definido, a BAQ entrará em funcionamento para compensar aquele arrefecimento, devido à desumidificação.

Relembre-se que o processo de desumidificação só se dará caso a temperatura de ponto de orvalho for superior à temperatura da BAG.

## 6. CONCLUSÃO

Após os ensaios reais e as simulações na aplicação desenvolvida, foi possível comparar os resultados obtidos e chegar-se às conclusões apresentadas nos pontos a seguir:

- Foi possível validar a aplicação, a nível de temperatura, uma vez que se obteve 75% dos ensaios dentro dos valores dos ensaios reais, tendo em conta as precisões dos equipamentos de medida.
- Foi possível validar o modelo que traduz as emissões de dióxido de carbono após verificação de 87,5% dos casos dentro dos valores dos ensaios reais.
- A validação da temperatura e humidade é independente do caudal que se possa inserir, uma vez que se verificam registos positivos para os caudais de 120m<sup>3</sup>/h e 250m<sup>3</sup>/h; e independente da temperatura de *setpoint*.
- Os dados das simulações de humidade relativa traduziram-se em 25%, sendo que uma das simulações revelou-se em problema no ensaio devido à cedência da sala a terceiros. Esta situação provocou humedificação do ar devido às gotículas de água contidas na BAG, cujas não tiveram tempo de escorrer até ao tabuleiro de condensados. Para confirmação deste valor, seria de todo conveniente a sua repetição.
- O método adotado para ensaiar a humidade relativa não foi o mais adequado relativamente à circulação de ar escolhida e à metodologia para recolha de dados.

## 6.1. Recomendações de Trabalhos Futuros

Os valores de condições ambientais fornecidos pelo simulador traduzem-se em balanços da sala, isto é, fornece condições de temperatura, humidade e CO<sub>2</sub> como se estes fossem homogéneos no interior da sala. Na realidade, em qualquer espaço, estas condições não são homogéneas, sendo estas estratificadas horizontalmente. Por este facto, poderão ocorrer alguns valores com erros superiores aos das sondas que os estão a medir.

Futuramente, poder-se-á efetuar um estudo melhorado dos parâmetros da sala, através de uma análise CFD. Outra possibilidade será a leituras desses parâmetros através de um anel de sondas pela sala. Em ambos os casos, dever-se-á retirar uma média dos valores obtidos.

Uma vez que o controlo do simulador não é o mesmo do controlo da UTA, poder-se-á analisar o controlador e desta forma proceder-se à implementação desse controlo em *LabVIEW* e incrementá-lo no simulador para que este traduza um comportamento semelhante ao da UTA. Adicionando a este, realizar uma inserção de aquisição de dados de temperaturas, humidade e CO<sub>2</sub> da SATEC e do exterior.

Ainda referente às Unidade de tratamento de ar, apesar da UTA em que se baseou este trabalho não possuir variação de velocidade dos ventiladores, não impossibilita este desenvolvimento no simulador. Com esta nova tecnologia incrementa a possibilidade de se conseguir desempenhar novos tipos de simulação. Com a variação de velocidade dos ventiladores conseguir-se-á fazer variar o caudal de ar em consonância com a carga térmica do espaço a climatizar ou, até mesmo, para renovação de ar, respeitando as renovações de caudais mínimos de 30 m<sup>3</sup>/(h. ocupante) [Dec. Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril].

## 7. REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS

ADENE [Em linha]. [Consult. 10 Abril 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.adene.pt>>.

AIR Liquide - Ficha de Dados de Segurança - Dioxido de Carbono refrigerante – R744. Edição 1. Outubro. 2012.

ASHRAE, 2009 ASHRAE® Handbook Fundamentals.

ASHRAE: 2001 ASHRAE® Handbook Fundamentals.

CARRIER [Em linha]. [Consult. 10 Mar. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.carrier.pt>>.

CASTRO, Olga Sobral – O Impacto das opções de reabilitação para edifícios zero energy. Apresentação no Auditório da Câmara Municipal de Barcelos. Fevereiro de 2014.

CE [Em linha]. [Consult. 13 Julho 2014]. Disponível em WWW:<URL: <http://ec.europa.eu>>.

CELULOSE [Em linha]. [Consult. 8 Junho 2014]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.suapesquisa.com/pesquisa/celulose.htm>>.

MORGADO, Eduardo – Controlador PID-Transparências de apoio às aulas teóricas Cap. 8 – Controlador P-I-D. Instituto Superior Técnico. Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (DEEC). Novembro 2007

Decreto-Lei n.º 118/1998 de 7 de Maio – Aprova o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE).

Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril – Aprova o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) e revoga o Decreto-Lei n.º 118/1998 de 7 de Maio. Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de abril – Aprova o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).

DUBOIS D; Dubois EF – A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. Arch Intern Med. 1916.

EN 13779 – Ventilation for non-residential buildings – performance requirements for ventilation and room-conditioning systems, 2007.

ENGINEERINGTOOLBOX [Em linha]. [Consult. 8 Maio 2014]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.engineeringtoolbox.com> >.

EUROSTAT – [Em linha]. [Consult. 31 Maio 2014]. Disponível em WWW: <URL: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>>.

HONEYWELL – HONEYWELL ENGINEERING MANUAL of AUTOMATIC CONTROL for COMMERCIAL BUILDINGS. Honeywell Inc. 1997

INCROPERA, Frank; DeWitt, David – Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. Trad. Eduardo Mach Queiroz. 6.ª ed., Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2008. ISBN:978-85-216-1584-2.

ISO 7730 – Ergonomics of the thermal environment - analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.

LAB2GO [Em linha]. [Consult. 13 Julho 2014]. Disponível em WWW:<URL: [pt.lab2go.net](http://pt.lab2go.net)>.

LINDE Group – Ficha de Dados de Segurança - Dioxido de Carbono. Versão 2.5. Janeiro 2013.

MATOS, Manuel Arlindo Amador de – PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE ALGUNS GASES, SÓLIDOS E DA ÁGUA. Relatório Técnico. Universidade de Aveiro: Departamento de Ambiente e Ordenamento, 1998.

- MONTEIRO, Joaquim Fernandes – Experimental and numerical study on the evaluation of ventilation efficiency. Porto: Instituto Politécnico do Porto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013. Tese de mestrado.
- PARK, Soon Ja; Teruko Tamura – Distribution of Evaporation Rate on Human Body Surface. *Ann. Physiol. Anthropol.*, 1992.
- PARVARESH, Ahmad; Mohammadi, Seyed Mohammad Ali; Parvaresh, Ali – A new mathematical dynamic model for HVAC system components based on Matlab/Simulink. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, Volume-1, Issue-2, July 2012, ISSN: 2278-3075.
- PERFITEC – Revestimentos metálicos e perfilados, Lda. [Em linha]. [Consult. 1 Mar. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.perfitec.pt>>.
- PID [Em linha]. [Consult. 8 Maio 2014]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.ni.com>>.
- Portaria n.º 349-D/2013 de 2 de dezembro - Aprova o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços.
- SANTOS, Carlos A. Pina dos; Matias, Luís – Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios – ITE 50. Lisboa, LNEC, 2006.
- TASHTOUSH, Bourhan; Molhim, M.; Al-Rousan, M. – Dynamic model of an HVAC system for control analysis. Mechanical Engineering Department, P.O. Box 3030, JUST, Irbid 22110, Jordan. 27 April 2004.
- WHITE, Frank M. – Fluid Mechanics. 4th ed., McGraw-Hill, December 1998 ISBN: 0072281928.
- YAMAKAWA, Yuji [et al.] – Stability Analysis on Air Conditioning System. SICE-ICASE International Joint Conference 2006.
- YUNUS A. CENGEL – HEAT TRANSFER: A Practical Approach. 2nd ed., McGraw-Hill, 2002. ISBN: 0072458933.

## 8. ANEXOS

### 8.1. Anexo A

Tabela 12 Dados recolhidos no ensaio da Bateria de Água Gelada

Água - Bateria de Água Gelada								
V3V (%)	T <sub>in</sub> (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão - $\sigma$	Erro - e	T <sub>out</sub> (°C)	Média - $\mu$ (°C)	Desvio Padrão - $\sigma$	Erro - e
100	8,0	8,2	0,3	0,2	11,2	11,5	0,4	0,3
100	8,4				11,7			
75	8,6	8,2	0,6	0,5	12,0	12,0	0,0	0,0
75	7,7				12,0			
50	8,5	8,1	0,6	0,5	13,1	13,0	0,1	0,1
50	7,6				12,9			
25	8,3	8,6	0,4	0,3	13,6	14,3	0,9	0,7
25	8,8				14,9			
Ar - Bateria de Água Gelada								
V3V (%)	T <sub>in</sub> (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão - $\sigma$	Erro - e	T <sub>out</sub> (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão - $\sigma$	Erro - e
100	16,0	16,0	0,0	0,0	14,9	14,9	0,1	0,0
100	16,0				14,8			
75	16,0	16,0	0,0	0,0	14,6	14,6	0,0	0,0
75	16,0				14,6			
50	16,0	16,0	0,0	0,0	14,8	14,8	0,0	0,0

50	16,0				14,8			
25	16,0	16,0	0,0	0,0	15,2	15,3	0,1	0,1
25	16,0				15,3			
Caudal de Água Gelada								
V3V (%)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Média (m <sup>3</sup> /h)	Média (m <sup>3</sup> /s)	Desvio Padrão - $\sigma$	Erro - e			
100	0,3576	0,3574	9,928E-05	0,51	0,36			
100	0,3572							
75	0,2508	0,2504	6,954E-05	0,35	0,25			
75	0,2499							
50	0,1648	0,1629	4,524E-05	0,23	0,16			
50	0,1609							
25	0,0686	0,0687	1,908E-05	0,10	0,07			
25	0,0688							

**Tabela 13** Dados recolhidos no ensaio da Bateria de Água Quente

Água - Bateria de Água Quente								
V3V (%)	T <sub>in</sub> (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão - $\sigma$	Erro - e	T <sub>out</sub> (°C)	Média - $\mu$ (°C)	Desvio Padrão - $\sigma$	Erro - e
100	73,8	78,4	6,4	4,6	57,2	61,8	6,5	4,6
100	82,9				66,4			
75	79,8	75,1	6,7	4,8	62,9	59,5	4,8	3,4
75	70,3				56,1			
50	79,7	76,2	5,0	3,6	56,5	54,8	2,4	1,7
50	72,6				53,1			
25	74,8	78,0	4,5	3,2	46,1	43,5	3,7	2,7
25	81,1				40,8			

Ar - Bateria de Água Quente								
V3V (%)	T <sub>in</sub> (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão - $\sigma$	Erro - e	T <sub>out</sub> (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão - $\sigma$	Erro - e
100	17,6	17,6	0,1	0,1	33,7	35,7	2,8	2,0
100	17,5				37,7			
75	18,0	18,0	0,0	0,0	38,7	38,7	0,1	0,1
75	18,0				38,6			
50	18,0	18,1	0,1	0,1	37,0	37,2	0,2	0,1
50	18,1				37,3			
25	18,3	18,2	0,2	0,2	30,9	30,6	0,4	0,3
25	18,0				30,3			
Caudal de Água Quente								
V3V (%)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)		Média (m <sup>3</sup> /h)	Média (m <sup>3</sup> /s)	Desvio Padrão - $\sigma$	Erro - e		
100	0,3796		0,38225	1,062E-04	0,5	0,4		
100	0,3849							
75	0,2445		0,2430	6,750E-05	0,3	0,2		
75	0,2415							
50	0,1587		0,1593	4,424E-05	0,2	0,2		
50	0,1598							
25	0,0590		0,0588	1,633E-05	0,1	0,1		
25	0,0586							

Tabela 14 Dados recolhidos do Caudal de Ar nos ensaios das Baterias de Água

Caudal de Ar				
m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /s	Média (m <sup>3</sup> /s)	Desvio Padrão - $\sigma$	Erro - e
545	0,15139	0,1514	0,00	0,00
545	0,15139			

## 8.2. Anexo B

**Tabela 15 Leituras de transmissão térmica -  $U$  - das paredes da SATEC**

Registo	W/m <sup>2</sup> K	°C	°C	°C
1	0,251	18,1	17,8	26,1
2	0,296	18,1	17,8	25,9
3	0,259	18,1	17,8	25,9
4	0,272	18,1	17,8	26
5	0,272	18,1	17,8	26
6	0,275	18,1	17,8	26
7	0,253	18,1	17,8	26,1
8	0,274	18,2	17,8	26,1
9	0,268	18,1	17,8	26,2
10	0,268	18,2	17,8	26,2
11	0,287	18,1	17,9	26,2
12	0,263	18,2	17,9	26,3
13	0,266	18,2	17,9	26,3
14	0,285	18,2	17,9	26,3
15	0,267	18,2	17,9	26,3
16	0,261	18,2	17,9	26,4
17	0,264	18,2	17,9	26,4
18	0,282	18,2	17,9	26,4
19	0,282	18,2	17,9	26,4
20	0,279	18,2	17,9	26,5
21	0,281	18,2	17,9	26,5
22	0,279	18,2	17,9	26,5
23	0,279	18,2	17,9	26,5
24	0,279	18,2	17,9	26,5
25	0,279	18,2	17,9	26,5
26	0,276	18,2	17,9	26,6
27	0,276	18,2	17,9	26,6
28	0,277	18,2	17,9	26,6
29	0,259	18,2	17,9	26,6
30	0,274	18,2	17,9	26,7
31	0,274	18,2	17,9	26,7
32	0,275	18,2	17,9	26,7
33	0,275	18,3	17,9	26,7
34	0,275	18,3	17,9	26,8
35	0,289	18,3	17,9	26,8
36	0,272	18,3	17,9	26,8
37	0,27	18,3	17,9	26,8
38	0,29	18,3	17,9	26,8
39	0,287	18,3	18	26,9

40	0,284	18,3	18	26,9
41	0,287	18,3	18	26,9
42	0,27	18,3	18	26,9
43	0,27	18,3	18	26,9
44	0,284	18,3	18	27
45	0,284	18,3	18	27
46	0,303	18,3	18	27
47	0,298	18,3	18	27,1
48	0,298	18,3	18	27,1
49	0,296	18,3	18	27,1
50	0,301	18,3	18	27,1
51	0,298	18,3	18	27,1
52	0,296	18,3	18	27,1
53	0,295	18,3	18	27,2
54	0,295	18,3	18	27,2
55	0,296	18,3	18	27,2
56	0,295	18,3	18	27,2
57	0,295	18,3	18	27,2
58	0,292	18,3	18	27,3
59	0,313	18,4	18	27,2
60	0,33	18,4	18	27,2
61	0,314	18,4	18	27,2
62	0,298	18,4	18	27,2
63	0,301	18,4	18	27,1
64	0,318	18,4	18	27,1
65	0,304	18,4	18	27
66	0,308	18,4	18	26,9
67	0,325	18,4	18	26,9

**Tabela 16** Dados estatísticos das leituras de U

n	Média (W/m <sup>2</sup> K)	Desvio Padrão - $\sigma$	Erro - e
67	0,284	0,017	0,002

### 8.3. Anexo C

Tabela 17 Registos do ensaio efetuado em 11 de junho de 2014 com *setpoint* em 18°C

ENSAIO 1									
Caudal=250 m <sup>3</sup> /h		T <sub>o</sub> =19,7 °C		Hr <sub>o</sub> =58,7 %		CO <sub>2</sub> =430 ppm		1 Pessoa	11/06/2014
SETPOINT A 18°C									
Hora	Temp. da Sala (°C)	Hum. Rel. da Sala (%)	Temp. Insuf. (°C)	CO <sub>2</sub> Exterior (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 1 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 2 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 3 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 4 (ppm)	
9h00	21	63,4	17,8	430	517	525	571	561	
9h02	20,8	63,7	17,5		520	535	577	556	
9h04	20,8	64,4	17,3		517	541	578	563	
9h06	20,7	64,5	17,1		518	527	564	544	
9h08	20,6	64,4	16,9		512	524	559	528	
9h10	20,6	64,4	16,7		496	507	556	531	
9h12	20,4	64,2	16,5		497	511	551	538	
9h14	20,3	64,6	16,3		500	494	547	521	
9h16	20,3	64,6	16,2		496	502	547	516	
9h18	20,2	64,6	16		491	498	542	515	
9h20	20,1	64,6	16		483	495	538	513	
9h22	20	65,2	15,9		477	501	535	511	
9h24	19,9	65,2	15,8		480	484	530	510	
9h26	19,8	65,5	15,9		486	482	528	507	
9h28	19,8	66,8	16		481	483	526	504	
9h30	19,7	68,7	16,3		478	484	528	500	
9h32	19,7	69,8	16,4		477	487	525	497	
9h34	19,6	70,4	16,4		477	486	524	503	
9h36	19,6	70,4	16,3		469	493	526	498	
9h38	19,6	70,2	16,2		481	475	523	493	
9h40	19,5	69,7	16,1		474	478	521	495	
9h42	19,5	69,8	16,2		469	481	518	500	
9h44	19,5	70,5	16,3		472	473	518	498	
9h46	19,5	70,8	16,4		471	481	517	494	
9h48	19,5	72,5	16,6		467	480	517	503	
9h50	19,4	72,7	16,5		478	483	511	495	
9h52	19,4	72,7	16,4		479	478	516	491	
9h54	19,4	72,4	16,4		465	482	523	500	
9h56	19,4	72,3	16,3		474	483	522	501	
9h58	19,4	72,1	16,3		477	485	527	508	
10h00	19,3	72,4	16,5		477	489	522	498	
10h02	19,3	73,1	16,6		478	489	523	499	
10h04	19,3	74,4	16,7		489	487	521	506	
10h06	19,3	74,2	16,6		483	494	532	516	

10h08	19,3	73,3	16,5		480	488	538	517
10h10	19,3	73	16,4	410	484	499	535	520

**Tabela 18 Média das sondas de CO<sub>2</sub> para o primeiro e último registo, do Ensaio 1**

Médias CO <sub>2</sub> (ppm)	
Primeiro Registo	Último Registo
544	510

**Tabela 19 Registos do ensaio efetuado em 11 de junho de 2014 com *setpoint* em 25°C**

ENSAIO 2									
Caudal=250 m <sup>3</sup> /h		T <sub>o</sub> =22,4 °C		Hr <sub>o</sub> =55,4 %		CO <sub>2</sub> =410 ppm		1 Pessoa	11/06/2014
SETPOINT A 25°C									
Hora	Temp. da Sala (°C)	Hum. Rel. da Sala (%)	Temp. Insuf. (°C)	CO <sub>2</sub> Exterior (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 1 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 2 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 3 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 4 (ppm)	
10h24	20,3	76,6	27,3	410	498	498	541	513	
10h26	20,5	75,9	27,7		492	506	537	508	
10h28	20,8	74,5	27,2		494	502	539	531	
10h30	21	73,5	26,4		497	511	538	532	
10h32	21,2	72	25,5		496	499	538	517	
10h34	21,3	71,6	27,4		488	505	546	521	
10h36	21,5	71,6	29,2		499	503	543	514	
10h38	21,7	70,3	29,1		500	498	538	516	
10h40	22,1	68,1	27,6		493	513	544	535	
10h42	22,2	67,5	27		505	514	550	545	
10h44	22,3	66,8	26,3		512	526	560	534	
10h46	22,4	66,3	25,6		513	525	568	544	
10h48	22,4	65,7	25,1		523	528	571	545	
10h50	22,5	65,3	24,8		519	524	572	543	
10h52	22,6	64,9	24,5		518	540	577	561	
10h54	22,7	65,4	28,2		526	534	585	561	
10h56	22,7	65,7	28,5		532	549	592	559	
10h58	22,7	65,9	28,6		531	554	599	575	
11h00	22,9	64,9	28		545	556	594	556	
11h02	23	63,8	26,8		543	543	590	557	
11h04	23,1	62,4	25,3		538	542	599	568	
11h06	23,2	61,2	24,1		539	540	599	572	

11h08	23,2	61,2	23,4		538	561	603	594
11h10	23,2	62	24,3		544	553	606	580
11h12	23,2	63,6	25,5		551	566	608	574
11h14	23,2	64,4	27,8		552	569	623	592
11h16	23,3	63	28		568	584	631	592
11h18	23,4	62,8	27,9		572	582	633	611
11h20	23,6	61,4	26		577	596	638	621
11h22	23,7	59,8	24,5		593	603	656	626
11h24	23,7	58,9	23,7		598	616	669	636
11h26	23,7	59,5	23		612	620	689	637
11h28	23,6	60,4	23,1		620	621	685	642
11h30	23,6	63,1	25,2		608	633	696	649
11h32	23,6	63,4	27,6		618	623	692	645
11h34	23,7	62,7	28,3	387	619	638	689	651

**Tabela 20 Média das sondas de CO<sub>2</sub> para o primeiro e último registo, do Ensaio 2**

Médias CO <sub>2</sub> (ppm)	
Primeiro Registo	Último Registo
513	649

**Tabela 21 Registos do ensaio efetuado em 13 de junho de 2014 com setpoint em 18°C**

ENSAIO 3									
Caudal=250 m <sup>3</sup> /h		T <sub>o</sub> =22,2 °C		Hr <sub>o</sub> =65,9 %		CO <sub>2</sub> =483 ppm		0 Pessoa	13/06/2014
SETPOINT A 18°C									
Hora	Temp. da Sala (°C)	Hum. Rel. da Sala (%)	Temp. Insuf. (°C)	CO <sub>2</sub> Exterior (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 1 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 2 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 3 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 4 (ppm)	
9h10	23,2	69,2	22,9	483	519	548	574	539	
9h11	23,2	69,2	22,9		522	541	564	525	
9h12	23,3	69,8	23		514	533	565	527	
9h13	23,3	70	23		502	548	558	529	
9h14	23,3	70,4	22,8		507	528	556	525	
9h15	23,3	70,4	22,4		500	523	560	517	
9h16	23,3	70,4	22,1		491	532	552	524	
9h17	23,3	70,4	21,8		495	525	546	513	

9h18	23,3	70,4	21,5		493	527	539	501
9h19	23,3	70,4	21,3		488	513	544	518
9h20	23,3	70,1	21		488	519	534	501
9h21	23,3	70,1	20,9		492	512	533	496
9h22	23,2	70,1	20,7		489	518	534	507
9h23	23,2	70,1	20,5		492	505	531	504
9h24	23,2	70,1	20,3		483	516	527	495
9h25	23,1	70,1	20,2		480	516	522	501
9h26	23,1	70,1	20		482	506	522	506
9h27	23	70,1	19,8		479	501	528	503
9h28	23	70,1	19,6		478	506	526	505
9h29	23	69,3	19,4		474	513	526	498
9h30	22,9	68,8	19,3		478	500	524	491
9h31	22,8	68,8	19,1		474	497	528	505
9h32	22,8	68,6	19		470	507	521	497
9h33	22,7	68,5	18,8		476	495	517	487
9h34	22,7	68,3	18,6		467	496	519	490
9h35	22,6	67,7	18,5		471	487	519	495
9h36	22,6	67,4	18,3		466	503	507	482
9h37	22,5	67	18,1		468	496	512	493
9h38	22,4	66,4	18		465	499	513	495
9h39	22,4	66,4	17,8		467	492	509	484
9h40	22,4	65,9	17,7		465	494	504	486
9h41	22,3	65,2	17,6		459	501	508	487
9h42	22,2	65	17,6		467	481	510	477
9h43	22,2	64,8	17,6		462	491	507	484
9h44	22,2	64,8	17,6		457	488	507	486
9h45	22,1	64,8	17,6		456	487	500	469
9h46	22,1	64,8	17,6		455	476	504	483
9h47	22	65,3	17,5		451	476	503	487
9h48	22	65,6	17,5		449	488	494	469
9h49	21,9	65,7	17,4		453	479	493	470
9h50	21,9	65,7	17,4		450	477	496	484
9h51	21,9	65,7	17,3		450	480	489	469
9h52	21,8	65,7	17,2		451	482	486	472
9h53	21,7	65,7	17,1		448	475	495	477
9h54	21,7	65,9	17,1		455	465	490	467
9h55	21,6	65,8	17,2		449	478	485	474
9h56	21,6	65,8	17,2		446	473	487	472
9h57	21,6	65,8	17,3		445	471	480	467
9h58	21,6	65,9	17,3		449	463	486	471
9h59	21,5	66,4	17,3		444	480	481	461
10h00	21,5	66,8	17,3		446	471	483	467
10h01	21,5	66,9	17,2		448	467	482	462

10h02	21,4	67,3	17,2		440	478	482	467
10h03	21,4	67,6	17,2		438	469	481	469
10h04	21,4	67,7	17,1		442	472	475	462
10h05	21,3	67,7	17		442	464	483	466
10h06	21,3	67,7	17		445	477	476	462
10h07	21,3	67,7	16,9		450	469	481	476
10h08	21,2	67,7	17		449	468	485	465
10h09	21,2	67,5	17		450	466	490	477
10h10	21,1	67,5	17,1		450	476	491	476
10h11	21,1	67,5	17,1		451	485	490	474
10h12	21,1	68	17,1		456	475	501	493
10h13	21,1	68,8	17,1		457	479	495	474
10h14	21,1	68,9	17,1		454	483	499	483
10h15	21	69,1	17,1		454	484	502	480
10h16	21	69,3	17,1		460	473	498	474
10h17	21	69,3	17		455	484	497	476
10h18	21	69,3	17		457	486	491	470
10h19	21	69,3	16,9		460	480	495	480
10h20	21	69,1	16,9	427	455	487	492	476

**Tabela 22 Média das sondas de CO<sub>2</sub> para o primeiro e último registo, do Ensaio 3**

Médias CO <sub>2</sub> (ppm)	
Primeiro Registo	Último Registo
545	478

**Tabela 23 Registos do ensaio efetuado em 13 de junho de 2014 com *setpoint* em 25°C**

ENSAIO 4									
Caudal=250 m <sup>3</sup> /h		T <sub>o</sub> =24,9 °C		Hr <sub>o</sub> =59,2 %		CO <sub>2</sub> =421 ppm		0 Pessoa	13/06/2014
SETPOINT A 25°C									
Hora	Temp. da Sala (°C)	Hum. Rel. da Sala (%)	Temp. Insuf. (°C)	CO <sub>2</sub> Exterior (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 1 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 2 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 3 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 4 (ppm)	
11h13	21,6	77	26,1	421	477	496	508	482	
11h14	21,7	76,5	25,7		476	492	513	490	
11h15	21,7	76,1	25,4		470	498	508	483	
11h16	21,6	75,1	25		466	494	504	480	
11h17	21,6	76,2	24,8		465	486	507	492	

11h18	21,5	78,3	24,5		465	491	502	479
11h19	21,5	81	24,3		464	486	505	487
11h20	21,6	83,7	24,7		461	493	499	478
11h21	21,6	85,3	25,6		456	483	506	487
11h22	21,6	85,6	26,7		456	480	507	492
11h23	21,6	86	27,7		459	489	494	474
11h24	21,7	86,5	28,3		460	484	496	485
11h25	21,8	86,8	28,3		463	485	497	476
11h26	21,9	87	28		461	475	500	486
11h27	22	87,3	27,6		458	490	495	472
11h28	22,1	87,3	27,2		459	484	498	477
11h29	22,2	87,2	26,8		459	481	493	480
11h30	22,3	87,2	26,4		462	471	490	473
11h31	22,3	87	26,1		453	481	492	477
11h32	22,4	86,8	25,8		454	481	485	467
11h33	22,4	86,8	25,5		451	478	491	479
11h34	22,5	86,8	25,2		452	473	492	479
11h35	22,5	86,7	25		451	477	490	475
11h36	22,6	86,7	24,8		450	485	490	479
11h37	22,6	86,8	24,6		453	479	493	470
11h38	22,7	86,9	24,4		451	470	495	477
11h39	22,7	87,7	24,3		452	474	488	465
11h40	22,8	88,3	24,1		448	474	490	472
11h41	22,7	88,8	24		443	483	486	466
11h42	22,8	89,3	24,2		451	461	486	464
11h43	22,9	89,5	25,1		446	474	481	471
11h44	22,9	86,5	26,2		442	471	483	462
11h45	23	89,5	27,4		443	472	475	462
11h46	23,1	89,1	28		448	458	479	462
11h47	23,1	88,8	28,1		442	463	483	472
11h48	23,2	88,2	27,9		439	471	477	465
11h49	23,2	88	27,6		445	461	477	460
11h50	23,2	87,8	27,2		441	473	475	466
11h51	23,3	87,8	26,7		445	457	473	461
11h52	23,4	87,7	26		441	471	474	469
11h53	23,4	87,7	25,3		440	467	475	458
11h54	23,4	87,6	24,6		436	475	473	459
11h55	23,4	87,6	24,2		443	458	475	465
11h56	23,5	87,6	24		447	456	474	460
11h57	23,5	87,7	23,9		438	482	474	466
11h58	23,5	87,7	23,7		442	465	477	462
11h59	23,5	87,9	23,6		440	469	477	475
12h00	23,4	88	23,4		443	458	483	469
12h01	23,5	88,2	23,4		443	470	479	459

12h02	23,5	88,9	23,7		440	464	482	467
12h03	23,5	89,5	24,7		442	468	480	460
12h04	23,5	90,1	26,1		441	461	486	474
12h05	23,6	90,1	27,3		446	452	482	457
12h06	23,6	90,1	28,1		438	474	476	465
12h07	23,7	90,1	28,2		435	463	479	463
12h08	23,7	89,7	28		440	460	473	455
12h09	23,7	89	27,7		443	456	474	465
12h10	23,8	88,1	27,2		442	470	471	458
12h11	23,9	87,1	26,5		437	462	475	464
12h12	23,9	84,5	25,7		441	459	469	445
12h13	23,9	83,1	24,9		439	453	471	466
12h14	23,9	81,7	24,3		433	454	474	463
12h15	23,9	80,9	24		432	462	464	441
12h16	23,9	80,9	23,8		430	451	467	455
12h17	23,9	80,9	23,6		431	464	465	452
12h18	23,9	80,9	23,4		435	453	467	458
12h19	23,9	80,9	23,3		433	464	464	443
12h20	23,9	81,2	23,1		430	461	471	465
12h21	23,9	81,6	23,2		430	466	468	459
12h22	23,9	82,8	24		439	447	466	447
12h23	23,9	83,9	25,3	415	433	448	472	460

**Tabela 24 Média das sondas de CO<sub>2</sub> para o primeiro e último registo, do Ensaio 4**

Médias CO <sub>2</sub> (ppm)	
Primeiro Registo	Último Registo
491	453

**Tabela 25 Registos do ensaio efetuado em 26 de junho de 2014 com *setpoint* em 20°C**

ENSAIO 5									
Caudal=250 m <sup>3</sup> /h		T <sub>o</sub> =17,3 °C		Hr <sub>o</sub> =72,1 %		CO <sub>2</sub> =390 ppm		0 Pessoa	26/06/2014
SETPOINT A 20°C									
Hora	Temp. da Sala (°C)	Hum. Rel. da Sala (%)	Temp. Insuf. (°C)	CO <sub>2</sub> Exterior (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 1 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 2 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 3 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 4 (ppm)	
8h45	21,7	63,6	19,1	390	446	482	476	466	
8h46	21,7	63,5	18,8		440	472	486	468	

8h47	21,6	63,5	18,7		436	480	491	467
8h48	21,6	63,4	18,6		442	466	480	465
8h49	21,6	63,4	18,6		441	482	478	463
8h50	21,5	63,4	18,6		437	471	479	461
8h51	21,5	63,9	18,6		436	453	471	462
8h52	21,5	64,5	18,7		434	462	470	459
8h53	21,4	65,3	18,7		428	459	476	457
8h54	21,4	65,9	18,7		429	458	468	452
8h55	21,4	66,4	18,8		428	441	463	448
8h56	21,4	66,9	18,8		421	466	463	447
8h57	21,4	67,3	18,9		423	445	459	443
8h58	21,3	67,6	19		419	439	461	443
8h59	21,3	67,8	19,2		414	453	456	442
9h00	21,3	68	19,3		414	442	451	438
9h01	21,3	68,1	19,5		414	449	450	433
9h02	21,3	68,1	19,7		415	430	448	431
9h03	21,3	68,1	19,8		413	447	441	435
9h04	21,3	68,1	20		414	431	439	430
9h05	21,3	68,1	19,9		406	436	444	434
9h06	21,3	67,8	19,8		407	436	440	434
9h07	21,3	67,3	19,5		410	430	436	429
9h08	21,3	66,5	19,3		401	443	438	433
9h09	21,3	66	19,1		405	419	436	426
9h10	21,3	65,2	18,9		399	438	433	423
9h11	21,3	64,6	18,7		395	427	430	424
9h12	21,3	64,3	18,5		398	426	429	422
9h13	21,3	63,9	18,4		401	419	430	423
9h14	21,2	63,8	18,3		402	427	431	421
9h15	21,2	63,8	18,4		400	438	431	425
9h16	21,2	63,8	18,4		404	417	430	423
9h17	21,1	64,1	18,5		397	428	433	428
9h18	21,1	64,9	18,5		396	424	433	424
9h19	21,1	65,6	18,5		397	420	426	416
9h20	21,1	66,5	18,6		394	414	428	422
9h21	21,1	66,9	18,6		396	425	427	418
9h22	21,1	67,5	18,6		395	432	427	421
9h23	21,1	67,7	18,8		397	418	425	421
9h24	21,1	68	18,9		393	431	428	417
9h25	21,1	68,1	19,1		394	423	426	422
9h26	21	68,2	19,2		395	425	423	418
9h27	21,1	68,2	19,4		395	415	424	417
9h28	21,1	68,2	19,6		400	417	418	415
9h29	21	68,2	19,8		397	428	427	416
9h30	21,1	68,2	20		394	422	429	419

9h31	21,1	68,2	20,1		398	416	421	416
9h32	21,1	68,2	20,3		393	420	427	416
9h33	21,1	68,1	20,4		391	427	424	414
9h34	21,1	68,1	20,5		391	409	421	417
9h35	21,1	68	20,4		394	414	426	415
9h36	21,1	67,7	20,2		392	434	427	415
9h37	21,1	66,9	19,9		393	416	420	419
9h38	21,1	66,1	19,6		394	407	421	418
9h39	21,1	65,6	19,3		388	419	425	420
9h40	21,1	64,5	19,1		394	426	417	413
9h41	21,1	64	18,9		391	413	422	414
9h42	21,1	63,6	18,7		387	409	423	415
9h43	21,1	63,3	18,5		392	423	414	410
9h44	21,1	63,1	18,5		390	411	418	413
9h45	21,1	63,1	18,5		387	408	420	417
9h46	21,1	63,1	18,5		388	417	417	413
9h47	21	63,5	18,5		390	420	417	411
9h48	21	64,1	18,6		386	407	419	416
9h49	21	64,8	18,6		389	406	414	412
9h50	21	65,7	18,6		389	427	412	409
9h51	21	66,2	18,6		384	416	418	414
9h52	21	66,8	18,7		389	407	417	409
9h53	21	66,8	18,8		388	415	421	410
9h54	21	67,1	19		388	424	422	412
9h55	20,9	67,2	19,2	388	392	407	421	411

**Tabela 26 Média das sondas de CO<sub>2</sub> para o primeiro e último registo, do Ensaio 5**

Médias CO <sub>2</sub> (ppm)	
Primeiro Registo	Último Registo
468	408

Tabela 27 Registos do ensaio efetuado em 26 de junho de 2014 com *setpoint* em 30°C

ENSAIO 6									
Caudal=250 m <sup>3</sup> /h		T <sub>o</sub> =19,8 °C		Hr <sub>o</sub> =59,6 %		CO <sub>2</sub> =384 ppm		0 Pessoa	26/06/2014
SETPOINT A 30°C									
Hora	Temp. da Sala (°C)	Hum. Rel. da Sala (%)	Temp. Insuf. (°C)	CO <sub>2</sub> Exterior (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 1 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 2 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 3 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 4 (ppm)	
10h18	20,9	62,8	18,5	384	384	416	411	413	
10h19	21	63,6	18,5		387	406	411	411	
10h20	21	64,3	19,1		386	411	414	416	
10h21	20,9	65	20,1		388	402	412	415	
10h22	20,9	65,5	21,7		387	424	414	412	
10h23	20,9	68,4	23,2		387	412	416	414	
10h24	21	70	24,5		384	409	419	419	
10h25	21	70,2	25,6		388	420	417	415	
10h26	21	70,1	26,4		391	413	416	412	
10h27	21,1	68,5	27,3		386	421	418	419	
10h28	21,2	68,9	28,3		391	403	418	416	
10h29	21,3	68,5	29,5		392	425	420	412	
10h30	21,3	68,2	30,6		391	411	415	415	
10h31	21,4	67,9	31,5		389	404	416	414	
10h32	21,5	67,6	32,1		386	417	418	412	
10h33	21,5	67,2	32,6		388	411	415	416	
10h34	21,6	66,7	32,9		388	421	418	415	
10h35	21,8	65,9	33,3		391	404	413	414	
10h36	21,9	65,2	33,5		388	429	417	416	
10h37	22	64,6	33,6		386	418	421	418	
10h38	22,1	64,1	33,8		393	412	420	414	
10h39	22,2	63,5	33,9		396	414	418	419	
10h40	22,3	62,8	33,8		393	416	419	422	
10h41	22,4	62,2	33,5		393	426	421	415	
10h42	22,5	61,7	33		392	409	416	419	
10h43	22,6	61,1	32,5		391	427	423	421	
10h44	22,7	60,3	32,1		393	418	422	419	
10h45	22,8	59,8	32,4		396	419	417	418	
10h46	22,9	59,2	33		390	414	422	421	
10h47	22,9	59,1	33,6		394	417	419	420	
10h48	23	59,1	34		390	430	420	421	
10h49	23,1	59,1	34,3		391	418	422	424	
10h50	23,1	58,9	34,4		392	406	426	422	
10h51	23,2	58,4	34,4		393	418	426	422	
10h52	23,3	57,9	34,1		394	425	421	426	

10h53	23,4	57,6	33,7		391	420	426	423
10h54	23,5	57,1	33,1		393	409	423	422
10h55	23,6	56,7	32,5		392	424	424	426
10h56	23,6	56,2	31,9		391	420	427	431
10h57	23,7	55,9	31,4		396	423	419	422
10h58	23,7	55,6	31,6		394	408	417	425
10h59	23,7	55,3	32,4		392	423	416	427
11h00	23,8	55,1	33,1		395	418	420	421
11h01	23,9	54,9	33,7		397	426	417	423
11h02	23,9	54,9	34,1		394	416	425	428
11h03	23,9	54,9	34,3		394	412	424	426
11h04	24	54,9	34,1		396	429	420	422
11h05	24	54,9	33,6		395	417	423	427
11h06	24,1	54,7	33,1		397	417	421	426
11h07	24,1	54,4	32,5		395	408	427	426
11h08	24,2	54,2	31,9		395	430	422	425
11h09	24,2	54	31,3		392	418	427	424
11h10	24,3	53,9	30,9		394	415	426	423
11h11	24,3	53,8	31,3		397	405	424	420
11h12	24,3	53,6	32,2		392	420	427	430
11h13	24,4	53,6	33,1		394	425	422	428
11h14	24,4	53,6	33,8		392	418	424	424
11h15	24,4	54,1	34,2		394	417	421	426
11h16	24,5	54,2	34,2		392	410	423	425
11h17	24,5	54,2	33,8		390	428	421	425
11h18	24,6	54,2	33,4		393	415	422	419
11h19	24,6	54,2	32,8		392	425	424	421
11h20	24,7	54,2	32,2		395	409	417	418
11h21	24,7	54	31,6		392	424	423	417
11h22	24,8	53,8	31,1		393	433	422	420
11h23	24,8	53,6	30,5		398	415	423	423
11h24	24,8	53,5	30,2		396	416	425	426
11h25	24,9	53,5	30,7		395	415	427	423
11h26	24,9	53,3	31,6		393	441	429	424
11h27	24,9	53,2	32,6		398	418	424	423
11h28	24,9	53,2	33,4	395	393	422	431	423

**Tabela 28 Média das sondas de CO<sub>2</sub> para o primeiro e último registo, do Ensaio 6**

Médias CO <sub>2</sub> (ppm)	
Primeiro Registo	Último Registo
468	408

Tabela 29 Registos do ensaio efetuado em 27 de junho de 2014 com *setpoint* em 20°C

ENSAIO 7								
Caudal=120 m <sup>3</sup> /h		T <sub>o</sub> =19,4 °C	Hr <sub>o</sub> =61,4 %	CO <sub>2</sub> =383 ppm		0 Pessoa	27/06/2014	
SETPOINT A 20°C								
Hora	Temp. da Sala (°C)	Hum. Rel. da Sala (%)	Temp. Insuf. (°C)	CO <sub>2</sub> Exterior (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 1 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 2 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 3 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 4 (ppm)
8h31	22,4	60	20,6	383	454	475	494	493
8h32	22,4	59,2	20,5		456	484	487	480
8h33	22,4	59,2	20,3		459	478	493	487
8h34	22,4	59,1	20,2		458	478	494	485
8h35	22,4	58,7	20,1		460	467	496	480
8h36	22,3	58,4	20		450	483	488	468
8h37	22,3	58,4	19,9		451	472	488	479
8h38	22,3	58	19,8		448	469	491	478
8h39	22,3	57,9	19,7		449	457	475	456
8h40	22,3	57,6	19,6		444	464	477	471
8h41	22,2	57,2	19,5		437	474	478	461
8h42	22,2	57,1	19,4		440	446	471	449
8h43	22,2	57,1	19,3		435	459	469	455
8h44	22,2	56,8	19,2		430	457	476	462
8h45	22,2	56,7	19,2		428	456	461	446
8h46	22,1	56,4	19,1		428	440	456	449
8h47	22,1	56,2	19		425	445	462	460
8h48	22,1	56,1	19		425	451	447	432
8h49	22,1	56	18,8		426	434	443	437
8h50	22,1	56	18,8		423	440	450	446
8h51	22,1	55,9	18,7		423	437	440	429
8h52	22	55,6	18,6		417	441	436	429
8h53	22,1	55,6	18,7		417	430	436	427
8h54	22	55,6	18,6		420	423	446	430
8h55	22	55,6	18,5		416	433	437	423
8h56	21,9	55,6	18,5		416	426	435	429
8h57	21,9	55,5	18,5		410	433	440	427
8h58	21,9	55,5	18,5		413	413	428	414
8h59	21,9	55,5	18,4		404	429	427	428
9h00	21,9	55,4	18,4		403	430	436	431
9h01	21,8	55,4	18,4		403	424	425	421
9h02	21,8	55,2	18,4		403	418	428	424
9h03	21,8	55,2	18,3		403	423	423	417
9h04	21,8	55,2	18,2		399	425	417	409
9h05	21,8	55,2	18,3		400	413	418	409

9h06	21,8	55,2	18,3		396	422	429	424
9h07	21,7	55,2	18,2		395	423	427	416
9h08	21,7	55,2	18,2		400	414	407	410
9h09	21,7	55,2	18,3		396	411	418	416
9h10	21,7	55,2	18,4		394	404	420	404
9h11	21,7	55,2	18,4		392	418	412	411
9h12	21,7	55,3	18,4		394	408	412	411
9h13	21,7	55,5	18,5		390	409	421	412
9h14	21,7	55,9	18,5		390	408	409	407
9h15	21,7	56,2	18,5		391	411	398	398
9h16	21,7	56,7	18,5		387	415	415	411
9h17	21,7	56,8	18,5		390	400	404	403
9h18	21,7	57,1	18,5		386	412	409	409
9h19	21,6	57,1	18,5		385	410	414	403
9h20	21,6	57,1	18,5		387	406	405	406
9h21	21,6	57,1	18,4		389	401	408	405
9h22	21,6	57,1	18,4		385	413	402	391
9h23	21,6	57,1	18,3		383	404	407	403
9h24	21,6	57,1	18,4		386	397	395	391
9h25	21,6	57	18,4		381	402	405	402
9h26	21,6	56,9	18,3		380	405	408	405
9h27	21,6	56,9	18,4		383	399	393	392
9h28	21,6	56,9	18,5		383	395	403	398
9h29	21,5	57	18,5		380	403	400	400
9h30	21,6	57,2	18,6		380	399	398	401
9h31	21,5	57,5	18,6		384	399	391	390
9h32	21,5	58	18,7		382	398	406	409
9h33	21,5	58,4	18,7		381	399	394	392
9h34	21,5	58,8	18,7		382	398	391	380
9h35	21,5	59	18,7		378	402	403	401
9h36	21,5	59,3	18,6		383	392	396	390
9h37	21,5	59,3	18,6		378	401	400	396
9h38	21,5	59,3	18,5		378	406	397	397
9h39	21,4	59,2	18,5		382	391	396	397
9h40	21,4	59	18,5		378	394	399	395
9h41	21,5	58,9	18,4	387	375	404	393	394

**Tabela 30 Média das sondas de CO<sub>2</sub> para o primeiro e último registo, do Ensaio 7**

Médias CO <sub>2</sub> (ppm)	
Primeiro Registo	Último Registo
479	392

Tabela 31 Registos do ensaio efetuado em 27 de junho de 2014 com *setpoint* em 30°C

ENSAIO 8									
Caudal=120 m <sup>3</sup> /h		T <sub>o</sub> =18,4 °C		Hr <sub>o</sub> =67,7 %		CO <sub>2</sub> =382 ppm		0 Pessoa	27/06/2014
SETPOINT A 30°C									
Hora	Temp. da Sala (°C)	Hum. Rel. da Sala (%)	Temp. Insuf. (°C)	CO <sub>2</sub> Exterior (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 1 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 2 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 3 (ppm)	CO <sub>2</sub> Sonda 4 (ppm)	
10h34	21,1	60,7	18,8	382	372	394	398	388	
10h35	21,1	61,2	18,8		370	388	396	399	
10h36	21,1	61,8	19		369	392	377	372	
10h37	21,1	62,6	19,7		370	389	389	385	
10h38	21,1	62,8	20,4		374	385	390	390	
10h39	21,2	62,9	21,3		377	390	393	397	
10h40	21,1	64,3	22,4		376	391	396	389	
10h41	21,1	66,5	23,5		373	403	398	394	
10h42	21,1	69,1	24,7		375	387	396	398	
10h43	21,1	69,5	25,9		376	392	390	378	
10h44	21,2	70,4	26,8		371	398	400	402	
10h45	21,2	71,3	27,7		380	387	384	382	
10h46	21,3	71,9	28,5		377	388	396	390	
10h47	21,4	69,9	29,2		372	399	395	397	
10h48	21,4	69,9	29,7		374	395	387	380	
10h49	21,5	70,4	29,9		375	386	396	390	
10h50	21,5	70,7	30		373	397	393	390	
10h51	21,6	70,7	29,9		374	392	386	391	
10h52	21,6	70,7	29,8		374	392	383	380	
10h53	21,7	71,2	29,6		374	394	401	402	
10h54	21,8	71,3	29,3		374	400	391	397	
10h55	21,8	70,9	29,1		375	399	387	379	
10h56	21,9	70,9	29		375	399	397	395	
10h57	21,9	70,6	29,4		378	390	392	393	
10h58	22,1	70,6	30		378	396	395	395	
10h59	22,1	70,5	30,8		374	401	390	392	
11h00	22,1	70,5	31,4		375	393	398	399	
11h01	22,2	70,4	31,8		375	395	398	403	
11h02	22,2	70,4	32,1		374	404	389	386	
11h03	22,3	70,8	32,1		376	403	401	407	
11h04	22,3	70,9	32		382	394	385	390	
11h05	22,3	70,9	31,7		380	391	400	398	
11h06	22,3	71,1	31,3		373	407	396	402	
11h07	22,4	71,3	31		378	390	390	397	
11h08	22,4	71,1	30,5		378	393	393	401	
11h09	22,5	71,4	30		376	393	397	397	

11h10	22,5	71	29,6		379	395	392	402
11h11	22,6	70,6	29,1		377	397	385	389
11h12	22,7	70,5	28,7		374	394	402	400
11h13	22,8	70,2	28,4		371	403	399	404
11h14	22,8	68,5	28,6		377	392	389	391
11h15	22,9	68	29,1		374	402	392	398
11h16	23	67	29,8		379	393	400	399
11h17	23	66,6	30,4		379	392	401	406
11h18	23,1	66,6	30,8		375	404	389	390
11h19	23,1	66,9	31,3		377	401	403	402
11h20	23,2	67,5	31,6		380	397	391	400
11h21	23,2	67,9	31,6		382	388	394	396
11h22	23,2	67,9	31,5		378	412	397	399
11h23	23,2	68,2	31,3		383	393	393	391
11h24	23,2	68,2	31		378	394	402	403
11h25	23,2	68,4	30,8		380	390	403	401
11h26	23,2	68,4	30,4		379	399	399	395
11h27	23,3	68,2	30,1		379	404	393	398
11h28	23,3	68,1	29,7		380	395	398	398
11h29	23,4	68,1	29,4		375	400	407	414
11h30	23,4	67,6	29,1		379	394	384	395
11h31	23,5	67,3	28,7		372	404	396	406
11h32	23,6	67	28,4		377	400	406	405
11h33	23,6	66,6	28,6		379	389	405	402
11h34	23,7	66,3	29		380	397	401	405
11h35	23,7	66,2	29,6		382	398	400	399
11h36	23,8	66	30,2		377	407	400	404
11h37	23,8	66	30,8		383	389	392	396
11h38	23,9	66	31,3		380	396	402	406
11h39	23,8	67,7	31,4		379	405	404	408
11h40	23,9	68	31,5		385	399	392	400
11h41	23,9	68	31,3		382	398	401	406
11h42	23,9	68	31,2		381	394	407	414
11h43	23,9	68	30,9		382	403	399	409
11h44	23,9	68	30,6	389	384	396	394	400

**Tabela 32 Média das sondas de CO<sub>2</sub> para o primeiro e último registo, do Ensaio 8**

Médias CO <sub>2</sub> (ppm)	
Primeiro Registo	Último Registo
394	388

8.4. Anexo D

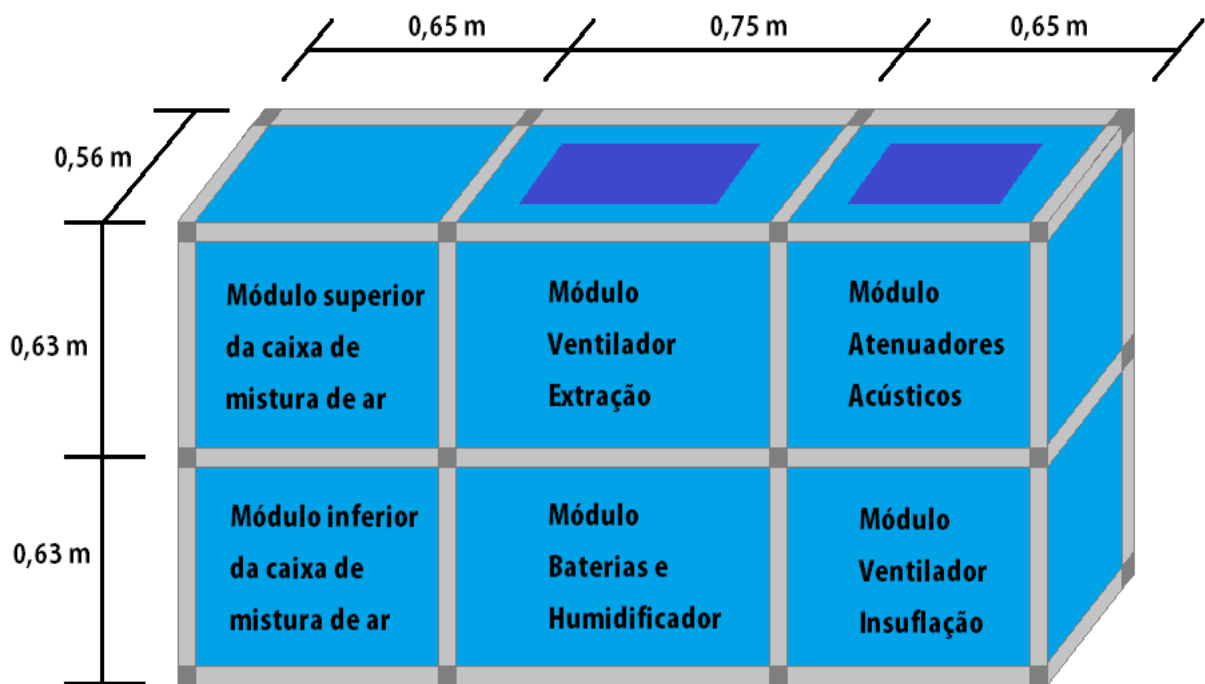
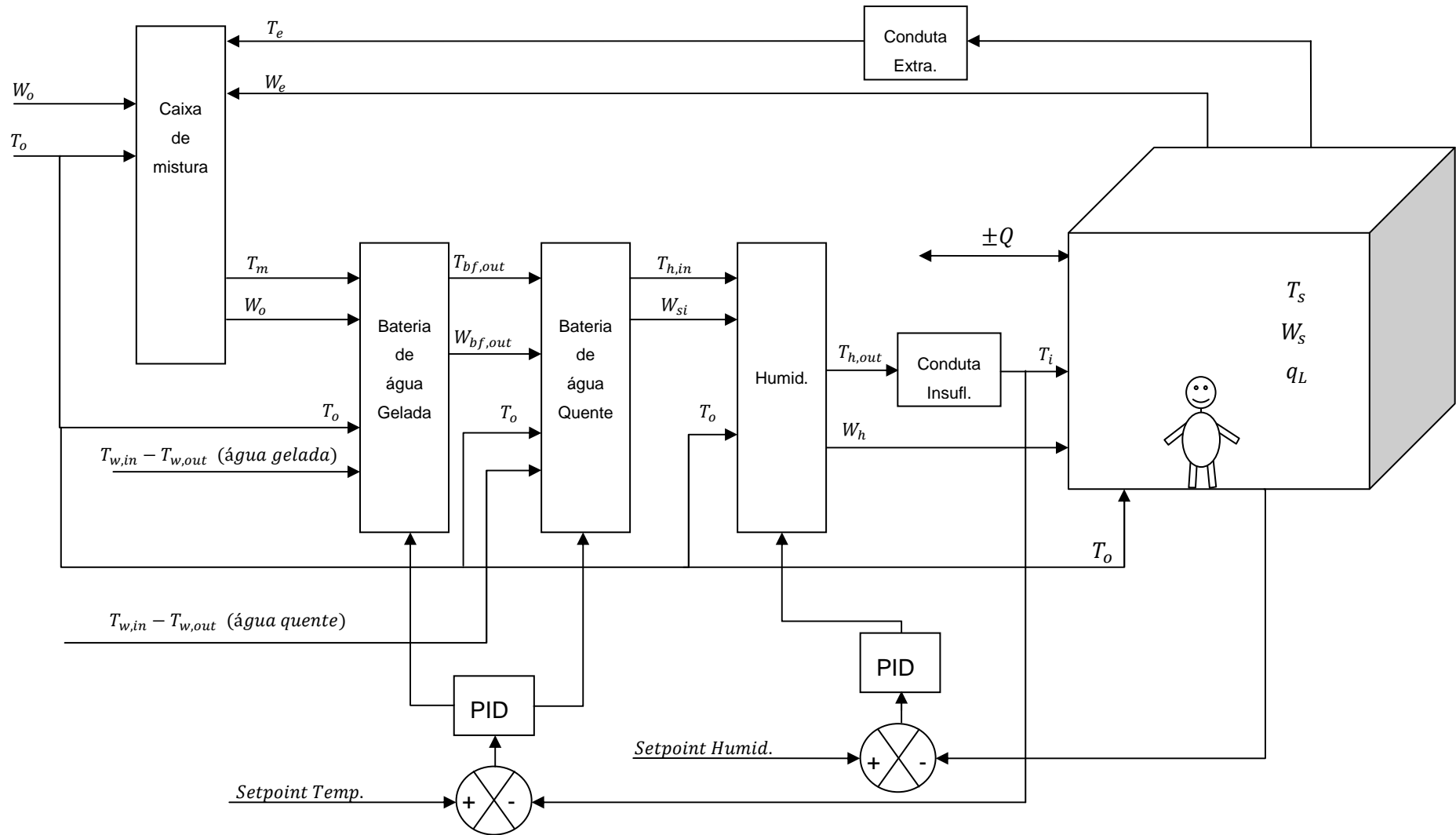


Figura 61. Dimensionamento da UTA

8.5. Anexo E



## 9. MANUAL DE UTILIZADOR DO SIMULADOR

Este capítulo visa dar a conhecer ao utilizador os passos básicos para que possa efetuar uma simulação do sistema estudado ou de um sistema semelhante.

### 9.1. Requisitos Mínimos do Sistema Informático

Para tal, é necessário possuir um computador com os seguintes requisitos mínimos:

- Processador: Pentium 4/M ou equivalente;
- Memória RAM: 1 GB;
- Resolução do Ecrã: 1024 x 768 pixéis;
- Sistema Operativo:
  - Windows: Windows 8.1/8/7/Vista (32 bits e 64 bits), Windows XP SP3 (32 bits), Windows Server 2003 R2 (32 bits) ou Windows Server 2008 R2 (64 bits);
  - Mac OS X 10.7, 10.8 ou 10.9,
  - Red Hat Enterprise Linux Desktop + Workstation 5 ou posterior, open SUSE 12.1 ou posterior e Scientific Linux 6 ou posterior;
- Espaço em Disco Rígido: 3,5 GB.

É necessário, também, a instalação do *software* de desenvolvimento *LabVIEW* 2013 com os seguintes módulos *LabVIEW*:

- *MathScript RT*;
- *Control Design and Simulation*;

- *Advanced Signal Processing Toolkit;*
- *PID and Fuzzy Logic Toolkit;*
- *Real-Time Development.*

## 9.2. Abertura do Simulador no Windows 8/8.1

Com os módulos anteriores instalados pode proceder-se à abertura do ficheiro do simulador partir da localização do computador onde o tiver guardado, por exemplo, se esta estiver em C:\Simulador AVAC, conforme a Figura 62.

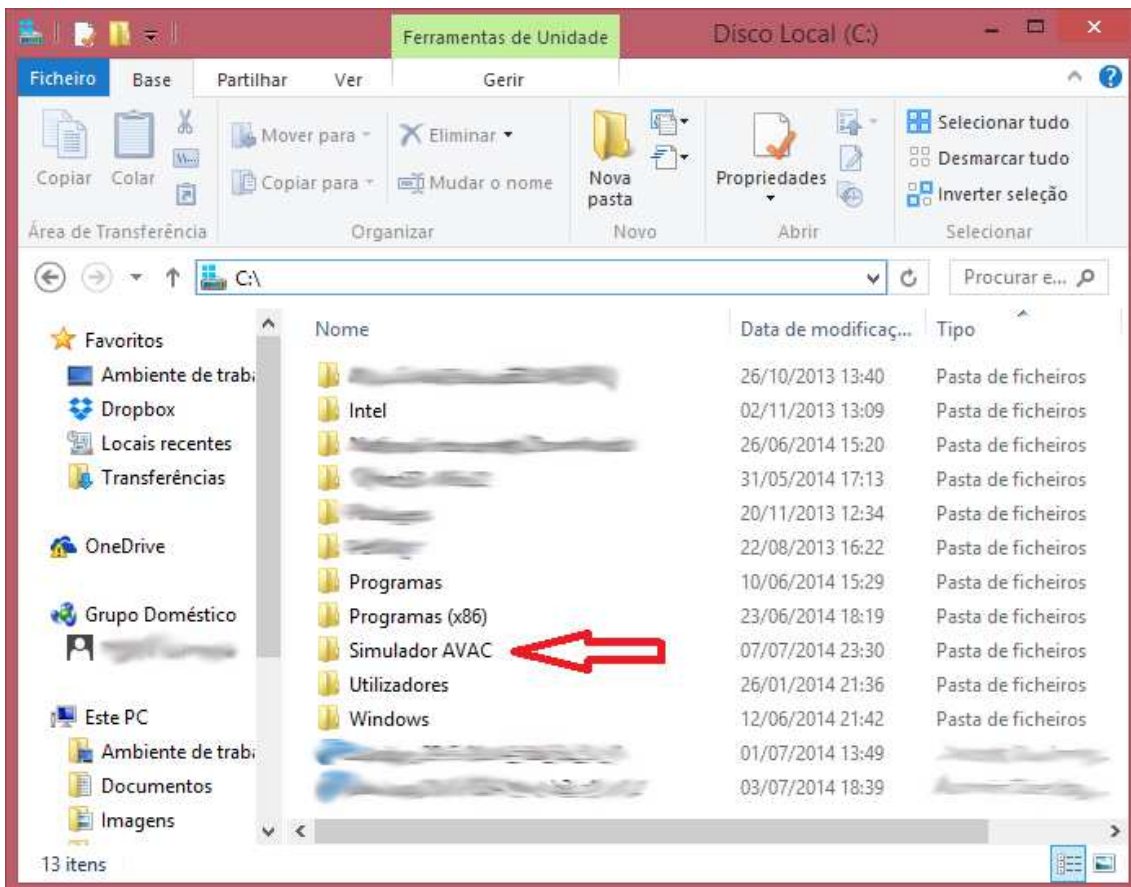
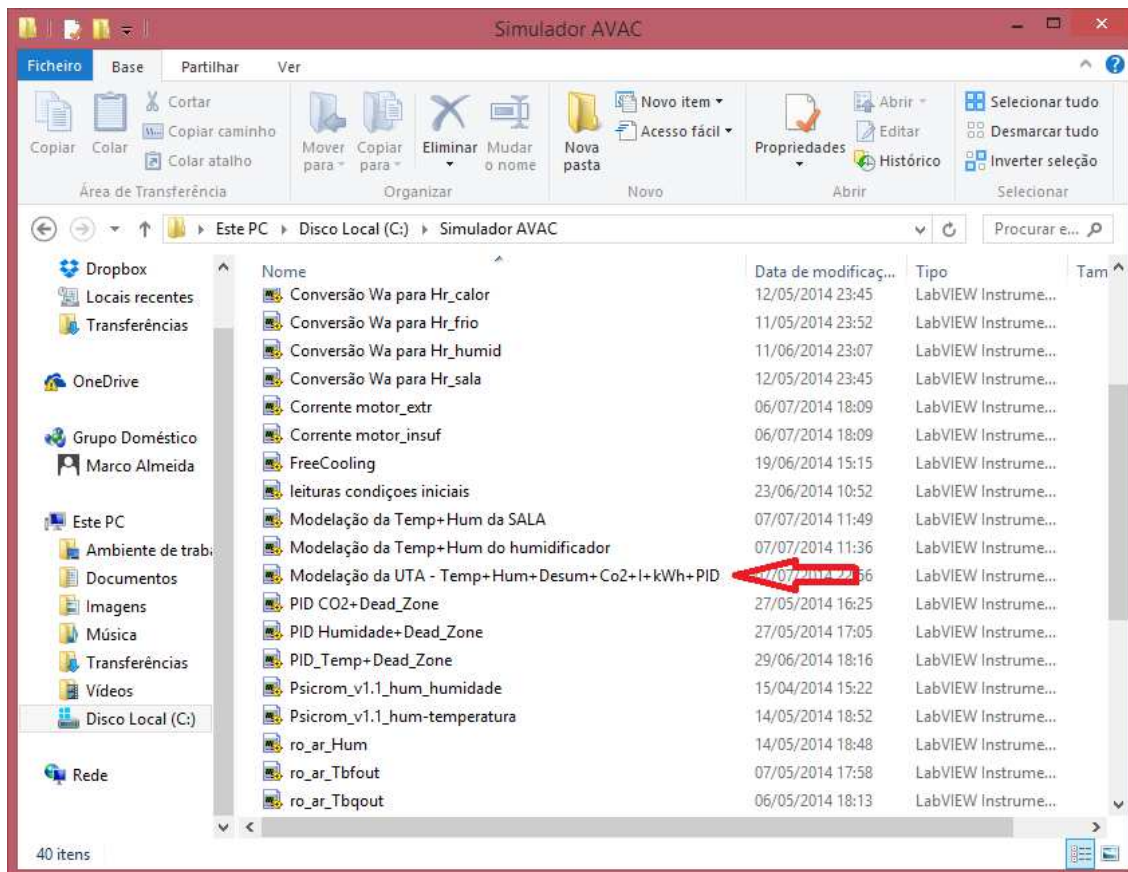


Figura 62. Localização do LabVIEW em C

Em seguida, abrir esta pasta do “Simulador AVAC” e aparecerá a caixa com a configuração da Figura 63:



**Figura 63. Abertura do ficheiro do simulador**

Aqui, abrir o ficheiro do *LabVIEW Modelação da UTA - Temp+Hum+Desum+Co2+I+kWh+PID.vi*.

O *LabVIEW* começará a fazer leituras de ficheiros adicionais para a abertura do ficheiro pretendido e abrirá uma janela igual à apresentada na Figura 64.

### 9.3. *Inputs no Graphic User Interface*

Os marcadores circulares a vermelho referem-se às caixas de texto que terão de ser preenchidas pelo utilizador (*inputs*) e que são os dados de entrada para a simulação, em que o marcador numerado como:

- 1 É tempo de simulação que se pretende efetuar, em segundos;
- 2 São os dados exteriores de temperatura, humidade relativa e CO<sub>2</sub>;
- 3 São as dimensões da sala, em metros;
- 4 São os dados relativos à sala (cargas térmicas e coeficiente de transmissão térmica);

- 5 É a quantidade de pessoas que se pretende simular dentro da sala;
- 6 São os valores de temperatura, humidade relativa e CO<sub>2</sub> iniciais da simulação;
- 7 São, respetivamente, o *setpoint* de temperatura, a banda morta de temperatura e a DT de *freecooling*;
- 8 São o *setpoint* e a banda morta de humidade e a opção para forçar o humidificador em funcionamento;
- 9 São o *setpoint* e a banda morta de CO<sub>2</sub>;
- 10 São os ganhos dos controladores PID de temperatura, humidade relativa e CO<sub>2</sub>;
- 11 É a ativação/desativação dos controladores PID referidos no nº 10;
- 12 São os dados referentes aos motores do ventilador de insuflação e extração (3 para cada);
- 13 É a temperatura de água que é introduzida no humidificador;
- 14 São os dados de potências e eficiências das baterias de água gelada e água quente, respetivamente;
- 15 É o comprimento das condutas de insuflação (em baixo) e de extração (em cima);
- 16 É o valor do caudal de ar total da instalação;
- 17 É o tipo de controlo de temperatura que se pretende: pela insuflação ou pela extração;
- L1 Sinalizador de *freecooling*: existem condições para o *freecooling*;
- L2 Sinalizador de desumidificação: a humidade é excessiva e é ativada a bateria de água gelada para desumidificação;
- L3 Sinalizador de humificação: a humidade está em falta e é ativado o humidificador para repor a humidade em falta;
- R1 Valor mínimo de abertura dos registos de ar novo e de extração.

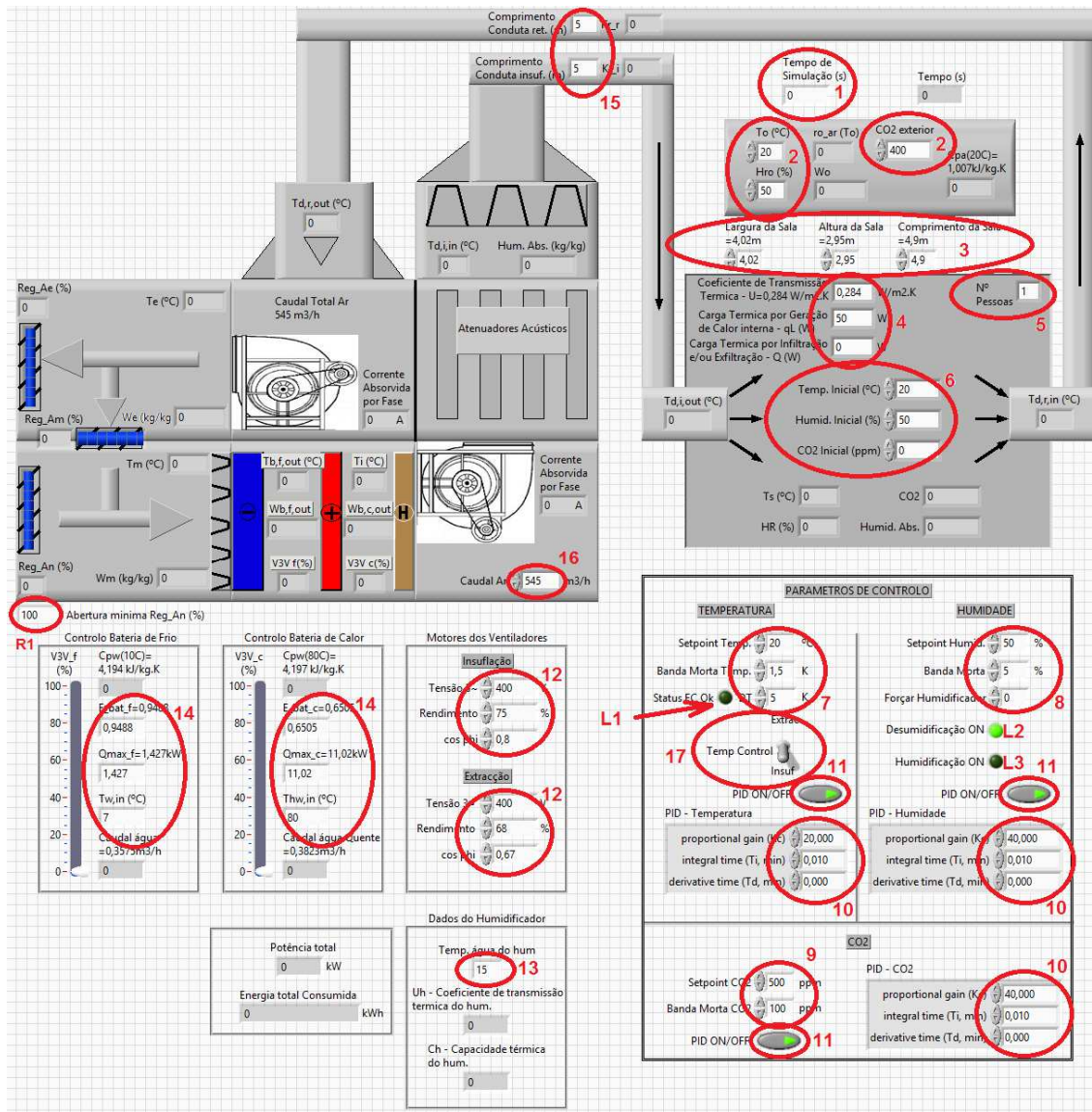


Figura 64. GUI do simulador com marcadores dos *inputs*

#### 9.4. Outputs no Graphic User Interface

As caixa de texto apresentadas na Figura 65 referem-se aos valores devolvidos pelo simulador, em que o quadrado com o n<sup>o</sup>:

18 Se refere à condutibilidade térmica do isolamento da conduta;

19 É o rácio de humidade calculada com base na temperatura e humidade relativa do exterior;

20 É a temperatura de saída de ar da conduta de insuflação (temperatura de ar insuflado na sala);

- 21 São os valores da temperatura, humidade relativa e absoluta e de emissões de CO<sub>2</sub> da sala, conforme referenciados no GUI;
- 22 São os valores de temperatura e rácio de humidade na entrada da conduta de insuflação, saída do humidificador;
- 23 São os valores da corrente elétrica dos motores dos ventiladores (em cima de extração, em baixo de insuflação);
- 24 São os valores de temperatura e rácio de humidade na saída da BAG e que servem de entrada na bateria de água quente;
- 25 São os valores de temperatura e rácio de humidade na saída da BAQ e que servem de entrada para o humidificador;
- 26 É a percentagem de abertura das válvulas de três vias de água que funcionam consoante a necessidade de arrefecer ou aquecer a sala;
- 27 São os valores de temperatura e rácio de humidade da mistura de ar, que servem de entrada a BAG;
- 28 É a percentagem de abertura dos registos de ar novo e de extração;
- 29 É a percentagem de abertura do registo de mistura de ar;
- 30 É o valor de saída da conduta de extração: a mesma que para a caixa de mistura;
- 31 São os valores de potência total que a máquina está a ter em determinado momento e o respetivo consumo de energia;
- 32 São os dados das características do humidificador.

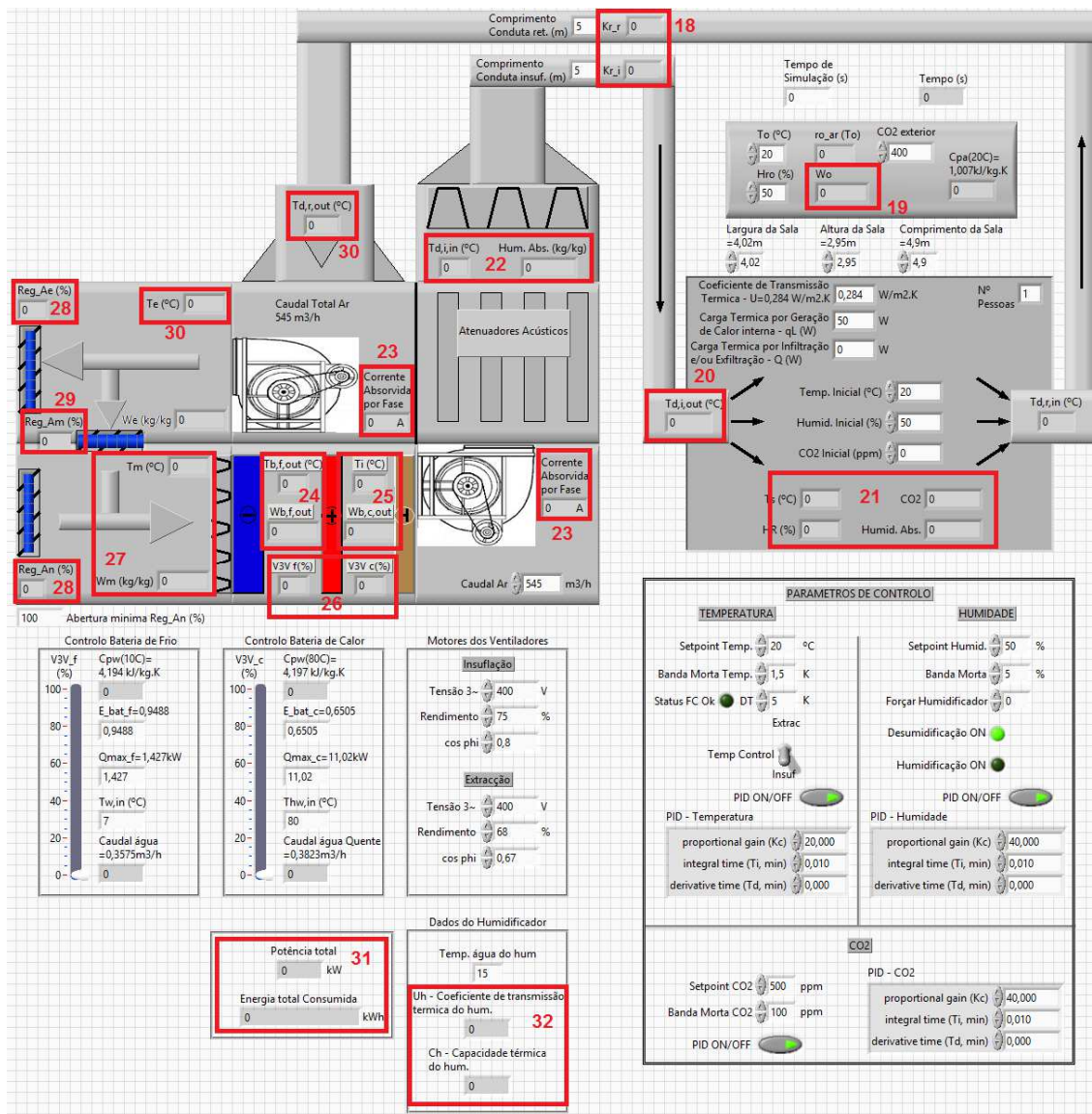
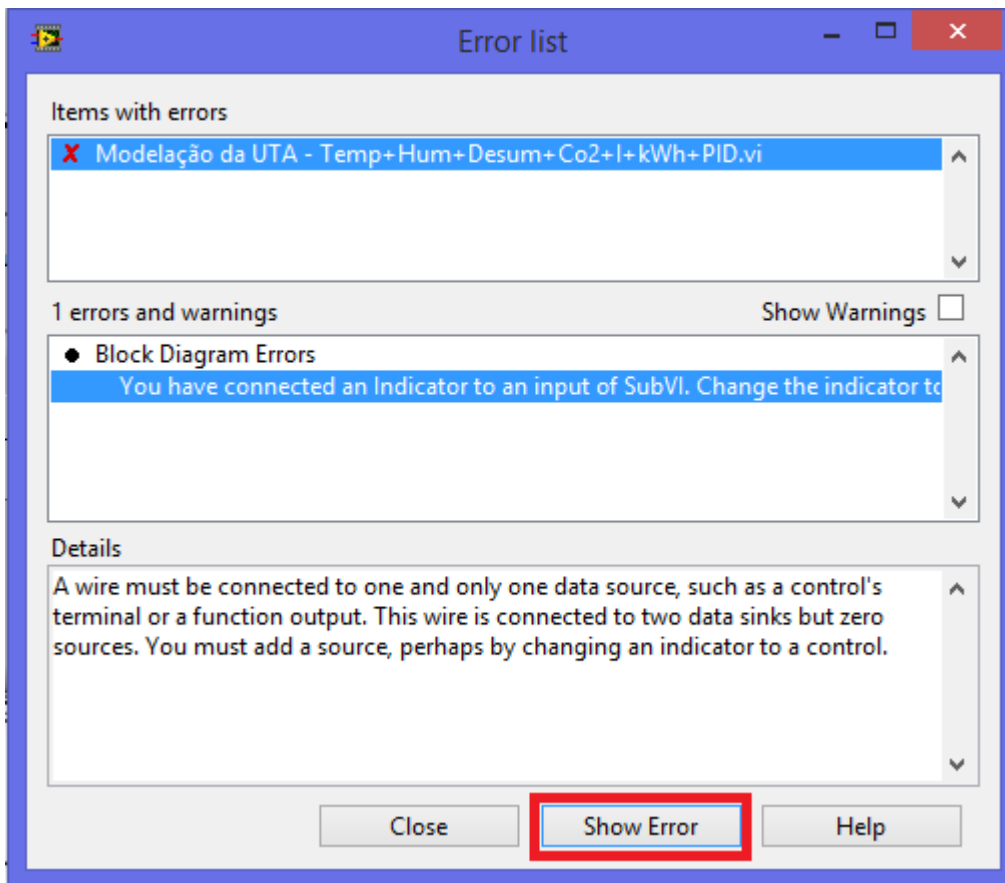


Figura 65. GUI do simulador com marcadores dos *outputs*

## 9.5. Erros de Compilação

O *LabVIEW* pode, por vezes, devolver erros de compilação. Quando se efetua uma simulação, o *software* verifica se o ficheiro foi alterado ou não. Caso tenha sido alterado e se tentar simular, este vai demorar alguns minutos (dependendo do tamanho do ficheiro em termos de blocos) a compilar todo o sistema desenvolvido. Durante ou no fim deste processo podem ocorrer erros de compilação como, por exemplo, o apresentado na Figura 66. Para verificar qual o motivo deste erro, basta clicar no botão da janela desta imagem onde diz: “Show Error”, apresentado com o retângulo a vermelho.



**Figura 66.** Erro de compilação devolvido pelo *LabVIEW*

Se ao clicar no botão não for identificado, pelo utilizador, qualquer erro, deve recorrer à ajuda da *National Instruments* através do sítio na internet: [www.ni.com](http://www.ni.com).

Muito frequentemente se pode esquecer de inserir alguns *inputs* no *Graphic User Interface*. O *input* mais importante, para que não ocorra erro, é o da caixa de texto referente ao tempo de simulação. Se este não for inserido (se for zero) aparecerá o erro apresentado na Figura 67. Para tal, deverá clicar no botão de “Stop” da janela de erro, inserir um valor válido de simulação (superior a zero) na caixa de texto 1, apresentado na Figura 64, e voltar a correr o simulador com clique no botão “Run”.

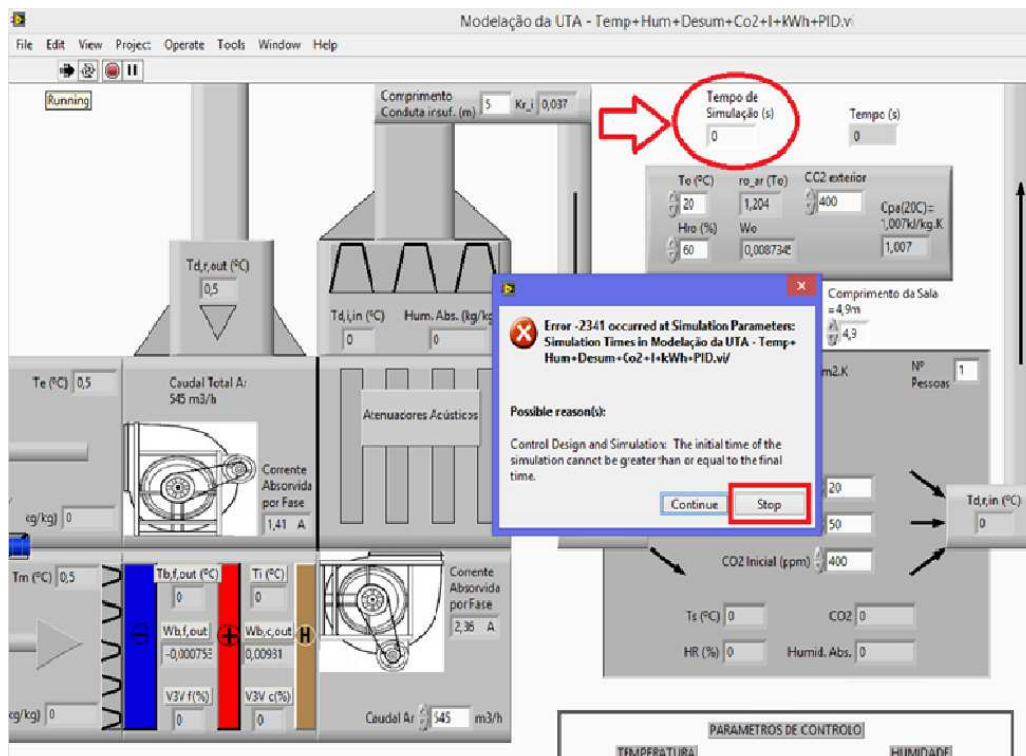


Figura 67. Erro de compilação devido à ausência do tempo de simulação

!!! Qualquer outro tipo de configuração/alteração deverá ser efetuado por pessoal experiente e com conhecimentos de *LabVIEW*, caso contrário poderá danificar o simulador.!!!

Para informações adicionais sobre o *LabVIEW*, desenvolvimento de aplicações e/ou simulações, consultar [www.ni.com](http://www.ni.com).