

INFLUÊNCIA DO CLIMA E DO CAUDAL DE AR VARIÁVEL EM FUNÇÃO DA DEMANDA PARA UM SISTEMA CENTRALIZADO TUDO-AR

M. Almeida¹, J. Monteiro² e O. Castro^{2*}

1: Departamento de Engenharia Eletrotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto,
Instituto Politécnico do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4249-015 Porto
e-mail: 1050383@isep.ipp.pt, web: <http://www.isep.pt>

2: Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto,
Instituto Politécnico do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4249-015 Porto
e-mail: jfmo@isep.ipp.pt, web: <http://www.isep.pt>

2*: Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto,
Instituto Politécnico do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4249-015 Porto
e-mail: orc@isep.ipp.pt, web: <http://www.isep.pt>

Resumo *Na perspetiva da melhoria da eficiência energética e da QAI dos edifícios de serviços existentes e que são climatizados com sistemas centralizados do tipo tudo-ar, foi desenvolvida uma aplicação informática que permite simular o comportamento dinâmico de situações reais de funcionamento relativas ao tratamento de ar. Com vista à redução do consumo energético associado à utilização dos sistemas técnicos de climatização, foi desenvolvido um modelo matemático para os diversos processos físicos que ocorrem numa unidade de tratamento de ar, implementado numa aplicação informática e validado o seu funcionamento através de experiências laboratoriais desenvolvidas numa sala de testes de climatização. O presente estudo permitiu determinar a influência das variáveis, clima e caudal de ar insuflado variável em função da demanda, no consumo energético associado às condições de conforto do ambiente interior para a estação de aquecimento. Foi estimado um aumento de 65% de consumo energético para o clima mais rigoroso de Bragança, acompanhado de um menor potencial de redução de consumo energético (6% em termos médios), relativamente aos outros climas. Relativamente à utilização de estratégias de ventilação controlada pela demanda (DCV), estimaram-se que os potenciais de redução de consumo energético máximos poderão atingir valores de 40% e 39% para Faro e Porto, respetivamente, e de 30% para Bragança. A ferramenta informática desenvolvida poderá ser uma ajuda em análises económicas a efetuar, nomeadamente para renovações de edifícios de serviços existentes.*

Palavras-chave: Eficiência energética, Sistemas tudo-ar, Climatização, Demanda

1. INTRODUÇÃO

A utilização de soluções de climatização centralizadas com sistemas do tipo ar-água é uma estratégia comum aplicada em edifícios de serviços, pois permite garantir as condições de Qualidade do Ar Interior (QAI), requeridas na atual legislação portuguesa [1]. Durante as últimas décadas assistiu-se em Portugal ao dimensionamento e à instalação de um elevado número de sistemas de climatização centralizados, que devido à indefinição relativa ao cumprimento de eficiências energéticas de equipamentos e a fatores económicos, originaram soluções de sistemas de climatização sobredimensionados com custos de operação elevados, ou, em outras inúmeras instalações em que os princípios base da eficiência energética não foram verificados. Uma das evidências que melhor caracteriza esta realidade é a inexistência de controlo do caudal de ar insuflado e a não utilização de estratégias de ventilação controlada pela demanda (DCV) em espaços que apresentam uma ocupação variável. Neste estudo apresentam-se os potenciais ganhos de eficiência energética em sistemas com unidades de tratamento de ar (UTA's) através da simulação do seu comportamento dinâmico em função da regulação do caudal de ar insuflado num espaço. Foi realizada uma modelação matemática de uma UTA existente na Sala de Estudos de Equipamentos de Climatização (SATEC) do Laboratório de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (LAVAC) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), através do *software LabVIEW*. Os resultados da simulação do comportamento dinâmico do sistema de climatização obtidos através da aplicação informática desenvolvida foram validados com os resultados experimentais obtidos através de experiências laboratoriais realizadas na SATEC. Foram avaliadas, a influência de clima e da utilização do controlo de caudal de ar insuflado em função demanda, no potencial de redução dos consumos energéticos (Pot. Red. Cons. Ener.) associados à garantia das condições de temperatura e humidade definidas.

2. METODOLOGIA

O sistema de AVAC, composto pela SATEC e pela UTA está representado em diagrama de blocos, na Figura 1. Para cada um dos blocos foi desenvolvido o respetivo modelo matemático descrito em [2]. A sequência do desenvolvimento do modelo matemático iniciou-se na SATEC, em que as variáveis dinâmicas em estudo foram a temperatura seca do ar, humidade relativa e teor de CO₂, e concluiu-se com a modelação baseada em [3] dos diversos módulos presentes na UTA, foram utilizadas equações diferenciais de primeira ordem para o balanço térmico [4] e para o balanço de massa [5], e também, para o sistema de condutas de ar associado ao sistema AVAC.

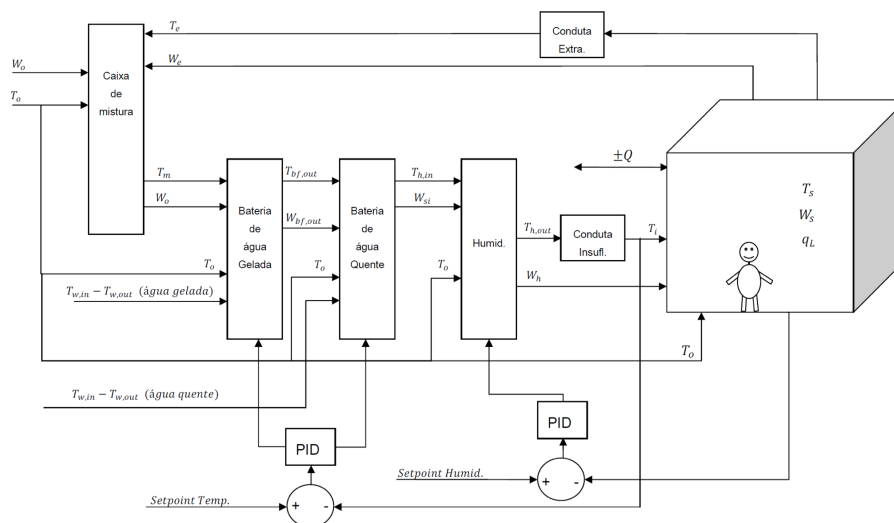


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema AVAC e da SATEC.

O sistema AVAC está apresentado na Figura 2, uma imagem da UTA (à esquerda), o esquema da UTA (ao centro) e uma imagem da geometria do interior da SATEC (à direita). Relativamente à modelação do sistema AVAC, foram desenvolvidos os modelos matemáticos para a caixa de mistura de ar novo e ar recirculado, baterias de água arrefecida e água aquecida, módulo de humidificação, e para o sistema de condutas de ar de insuflação e de extração. A descrição da modelação matemática referida foi efetuada de acordo com o exposto em [2] e em [6].

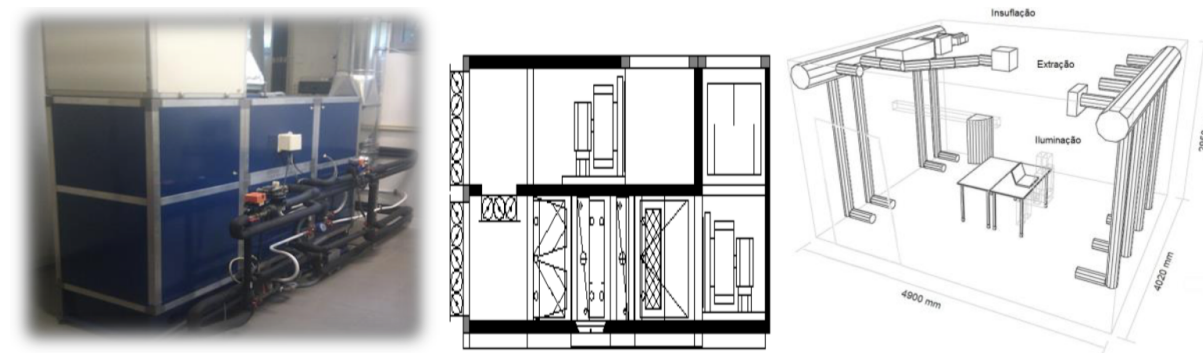


Figura 2. Foto da UTA (à esquerda), esquema da UTA (ao centro) e geometria da SATEC (à direita).

Após a implementação da modelação do sistema AVAC para a SATEC, foi verificada a fiabilidade da aplicação informática desenvolvida no *software LabVIEW*, através da validação experimental dos resultados da simulação virtual. Procedeu-se à realização dos ensaios laboratoriais na SATEC de acordo com a informação presente na Tabela 1. Para efeitos de comparação relativamente aos valores finais das variáveis dinâmicas, optou-se por manter um caudal de ar novo constante e um ocupante na SATEC.

Tabela 1. Condições das experiências laboratoriais na SATEC.

Ensaio	Setpoint Temp. (°C)	Temp. inicial (°C)	Temp. final (°C)	Humid. inicial (%)	Humid. final (%)	CO ₂ inicial (ppm)	CO ₂ final (ppm)	Caudal Ar (m ³ /h)
Ens. 1	18,0	21,0	18,9	54,5	61,3	544	618	250
Ens. 2	25,0	20,3	24,0	68,2	53,5	513	484,6	250
Ens. 3	18,0	23,2	21,4	65,9	68,2	545	483,4	250
Ens. 4	25,0	21,6	24,2	67,2	60,2	491	421,5	250
Ens. 5	20,0	21,7	19,9	70,0	61,4	468	390,5	250
Ens. 6	30,0	20,9	23,9	62,6	46,5	406	384,1	250
Ens. 7	20,0	22,4	20,0	51,8	60,0	479	391,6	250
Ens. 8	30,0	21,1	24,1	60,6	48,1	388	383,4	250

Posteriormente à validação experimental efetuada ao funcionamento da aplicação informática desenvolvida para estudar o funcionamento dos sistemas de climatização centralizados do tipo tudo-ar, esta mesma foi aplicada para realizar simulações virtuais para três cidades portuguesas com climas diferentes, em termos das variáveis temperatura média do ar e humidade relativa média do ar [7] e número de graus dias de aquecimento [8], utilizando o caudal de 120 m³/h, determinado através do

método prescritivo para 4 ocupantes [9]. Com vista ao estudo do efeito da variação do caudal de ar insuflado em função da demanda (variação do número de ocupantes no espaço), utilizaram-se os valores dos caudais de ar novo determinados em função do método analítico descritos em [1]. No total, foram realizadas oito simulações para a estação de aquecimento para cada cidade e com os dados obtidos foi possível determinar a redução do consumo energético do sistema de climatização centralizado em função do clima e em função da demanda. A redução do consumo energético foi determinada relativamente à situação em que o caudal de ar novo é constante, e avaliado o potencial de redução de consumo energético de cada clima.

3. RESULTADOS

Os resultados referentes à validação do funcionamento da aplicação informática desenvolvida em [2], estão representados na Figura 3 e Figura 4. Relativamente à figura 3, são comparados os resultados do ensaio experimental e da simulação virtual na SATEC para os valores das variáveis físicas do ar, nomeadamente, a temperatura seca, a humidade relativa e o teor de CO₂, assim como, são representados os erros de incerteza associados aos ensaios experimentais. Para a temperatura seca do ar, verificou-se que os desvios entre as simulações virtuais e os ensaios experimentais foram validados em 75%, pois o desvio absoluto entre os valores referidos foi inferior ao erro máximo de incerteza experimental da sonda de medição desta variável dinâmica (0,6°C). Quanto à humidade relativa, verificou-se que os desvios entre as simulações virtuais e os ensaios experimentais foram validados em apenas 25%, tendo sido o desvio absoluto entre os valores referidos inferior ao erro máximo de incerteza experimental da sonda de medição desta variável dinâmica (2,4%).

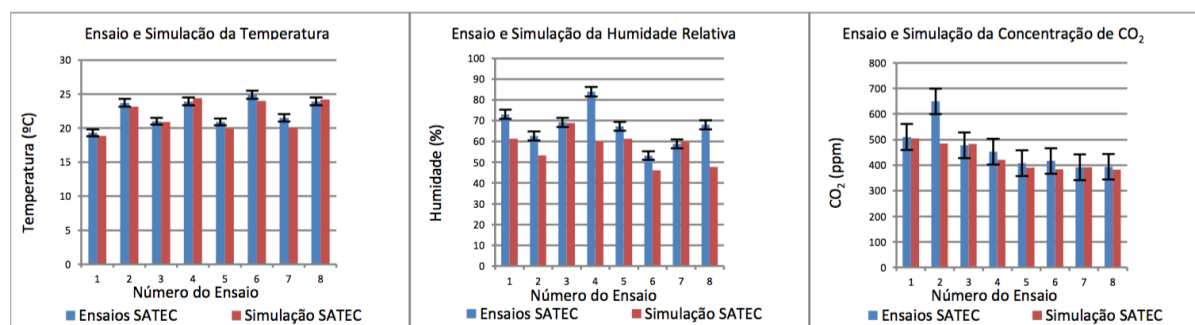


Figura 3. Ensaio vs. simulações virtuais.

Relativamente à variável teor de CO₂, verificou-se que os desvios entre as simulações virtuais e os ensaios experimentais foram validados em 87,5%, tendo sido o desvio absoluto entre os valores referidos inferior ao erro máximo de incerteza experimental da sonda de medição desta variável dinâmica (59,5ppm). A resposta dinâmica do sistema foi analisada para os oito ensaios efetuados, e a título de exemplo, neste estudo é apenas analisado o Ensaio 1. Na figura 4 são apresentados os resultados obtidos referentes à resposta dinâmica das variáveis temperatura seca, humidade relativa e teor de CO₂, para um caudal de ar novo de 250 m³/h, um *setpoint* de temperatura seca de 18°C, um *setpoint* de humidade relativa de 50% e para um ocupante. Verificou-se que para a temperatura seca do ar, o valor da simulação virtual entra na zona de erro de incerteza do valor do ensaio experimental ao fim de 40 minutos, atingindo-se o regime estacionário. Relativamente à humidade relativa, verificou-se que o valor da simulação virtual se mantém na zona de erro de incerteza do valor do ensaio experimental durante os primeiros 20 minutos, sendo que a partir deste instante, ocorre um desvio que atinge o valor de 13,1% relativamente ao valor medido ao fim dos 70 minutos de duração do Ensaio 1. No que respeita à variável teor de CO₂, verificou-se que o valor da simulação virtual se encontra na zona de erro de incerteza do valor do ensaio experimental, durante toda a duração do Ensaio 1.

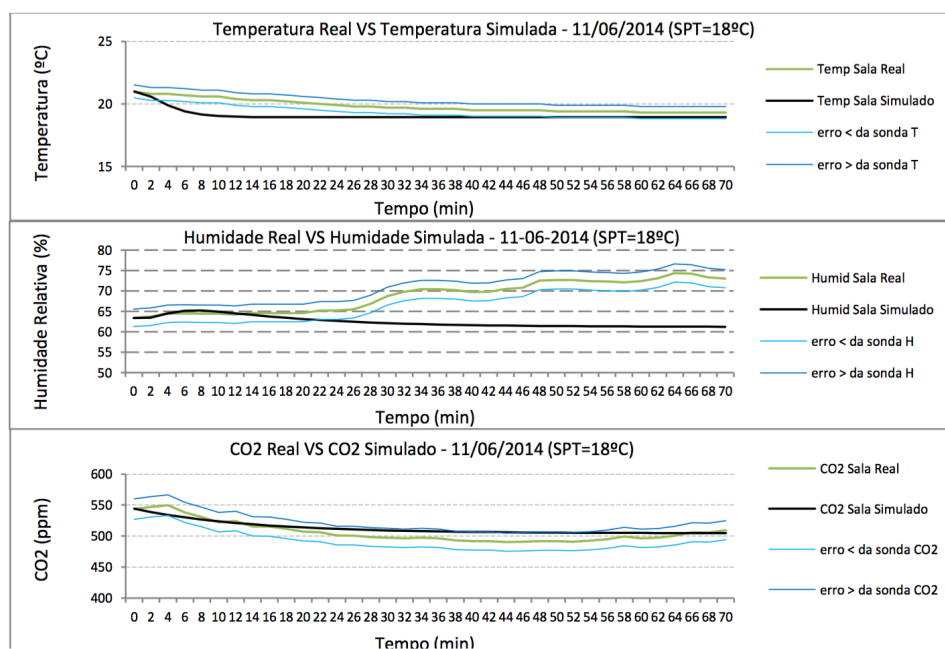


Figura 4. Resposta dinâmica do conjunto SATEC e sistema AVAC.

Na Tabela 2 são apresentados os valores do consumo energético para cada clima e os potenciais de redução de consumo energético em função da demanda.

Tabela 2. Quadro comparativo das simulações para as três cidades portuguesas.

	GD	Zona Clim.	Cons. Ener. Sem. (kWh)	Pot.Red. Con.Ene. 4 Ocup.	Pot.Red. Con.Ene. 3 Ocup.	Pot.Red. Con.Ene. 2 Ocup.	Pot.Red. Con.Ene. 1 Ocup.
Faro	987	I1	40	5 %	32 %	40 %	28 %
Porto	1250	I1	40	9 %	33 %	39 %	26 %
Bragança	2015	I3	66	18 %	30 %	21 %	14 %

Os resultados do consumo energético foram obtidos para a segunda semana de janeiro, considerando um perfil de utilização contínuo entre as 9h e as 17h, para um caudal constante de 120 m³/h. Os resultados dos potenciais de redução de consumo energético da UTA foram estimados relativamente à situação de caudal constante de 120 m³/h. Verifica-se um aumento de 65% do consumo energético para o clima mais rigoroso relativamente aos outros que são mais semelhantes entre si. Relativamente ao potencial de redução de consumo energético, é possível verificar que a cidade de Bragança apresenta um menor potencial de redução de consumo energético do que as outras duas cidades (em termos médios, 6% abaixo de Faro e Porto). Verifica-se que a redução do caudal de ar novo em função da redução da demanda tem implicações significativas no consumo energético, nomeadamente, verificaram-se valores máximos de Pot. Red. Cons. Ener. de 40% e 39% para Faro e Porto, respetivamente, e de 30% para Bragança.

4. CONCLUSÕES

A aplicação informática desenvolvida que permite simular de forma virtual o comportamento dinâmico de situações reais de funcionamento relativas ao tratamento de ar foi validada para os valores dos ensaios laboratoriais atingidos para regime estacionário, com 75% dos ensaios válidos para a temperatura seca do ar, com 25% dos ensaios válidos para a humidade relativa, e com 87,5% dos ensaios válidos para a variável teor de CO₂, tendo em conta a exatidão dos equipamentos de medição utilizados. Relativamente à validação da resposta dinâmica, pode concluir-se que para a temperatura seca do ar e para a variável teor de CO₂, existe uma boa concordância entre as simulações e os ensaios na SATEC, sendo menos boa para a humidade relativa, com um desvio de 13,1%. Os resultados da aplicação da ferramenta informática mostraram que se verifica um aumento de 65% do consumo energético para o clima mais rigoroso de Bragança, acompanhado de um menor potencial de redução de consumo energético (6% em termos médios), relativamente aos outros climas que são mais semelhantes entre si. Relativamente à utilização de estratégias de ventilação controlada pela demanda (DCV) estimou-se que Pot. Red. Cons. Ener. máximos poderão atingir valores de 40% e 39% para Faro e Porto, respetivamente, e de 30% para Bragança. A ferramenta informática desenvolvida poderá ser uma ajuda em análises económicas a efetuar, nomeadamente para renovações de edifícios de serviços existentes.

REFERÊNCIAS

- [1] Portaria nº353A/2013 – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Requisitos de Ventilação e Qualidade do Ar Interior. Diário da República, 1ª Série – N.º 235 – 4 de dezembro de 2013.
- [2] ALMEIDA, Marco T. – Modelação de um Sistema de AVAC, em Software LabVIEW. Porto: Instituto Politécnico do Porto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014. Tese de mestrado.
- [3] ASHRAE, 2001 ASHRAE® Handbook Fundamentals.
- [4] YAMAKAWAL, Yuji [et al.] – Stability Analysis on Air Conditioning System. SICE-ICASE International Joint Conference 2006.
- [5] 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.
- [6] MONTEIRO, Joaquim F. – 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.
- [7] CLIMAS-SCE - Software para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios, <http://www.lneg.pt/servicos/328/2263/>
- [8] Despacho nº15793-F/2013, Diário da República, 2ªsérie, nº 234, 3 de dezembro de 2013.
- [9] Ferramenta de cálculo para aplicação da regulamentação de eficiência energética de edifícios de 2013, <http://www.lnec.pt/pt/servicos/ferramentas/aplicacoes-informaticas/eficiencia-energetica/>