

ESTUDO DE UMA ESTRATÉGIA PARA CONTROLE FUZZY DE AMBIENTES CONDICIONADOS COM O SISTEMA UFAD

**Thais Aya Hassan Inatomi (1); Fabio Kenji Motezuki (1);
Brenda Chaves Coelho Leite (2); Liang-Yee Cheng (2)**

- (1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil e Urbana - Escola Politécnica
Universidade de São Paulo. e-mail: thais.inatomi@poli.usp.br, fabio.motezuki@poli.usp.br
(2) Departamento de Engenharia de Construção Civil - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo
Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, nº 83 – CEP 05508-900 – Cidade Universitária
São Paulo - SP - Tel/Fax +55 11 3091-5438
e-mail: brenda.leite@poli.usp.br; cheng.yee@poli.usp.br

RESUMO

Ao se comparar sistemas de condicionamento de ar com insuflação pelo teto e sistemas de condicionamento de ar com insuflação pelo piso (UFAD - *Underfloor Air Distribution*) nota-se que o controle de sistemas UFAD requer uma mudança de paradigmas em relação à quantidade e posicionamento de sensores, e tratamento e interpretação dos dados de leitura dos mesmos. Esta pesquisa tem como objetivo identificar os melhores parâmetros para um controle baseado num método de inferência nebuloso (*fuzzy logic*) e estabelecer regras para inferência dos dados num sistema UFAD. O intuito é reduzir o consumo de energia e manter o conforto térmico, visto que controladores e sensores estão diretamente relacionados à estes. As etapas para a elaboração desta foram: definição dos parâmetros de entrada e saída; definição da escala de valores (fuzzyficação dos dados); estabelecimento das regras; verificação das regras. Os resultados afirmam a escolha dos parâmetros de entrada para o sistema de controle proposto, indicam a necessidade de *fuzzyficação* de outros parâmetros que trabalhem de forma integrada, e sugerem a necessidade de pesquisas que avaliem como devem ser considerados os desconfortos térmicos local e geral no que se refere ao controle do conforto térmico em sistemas UFAD.

ABSTRACT

When comparing ceiling air distribution with Under Floor Air Distribution (UFAD) air-conditioning systems it can be noticed that UFAD systems require paradigm changes related to the quantity and location of sensors, and treatment and interpretation of measured data. This research intends to identify the more feasible parameters for a UFAD fuzzy logic control and to establish rules for data inference. The objective is to reduce energy consumption and keep thermal comfort, since sensors and controllers are direct associated to these subjects. The steps to elaborate this work were: parameters definition; data fuzzyfication; rules definition; rules verification. The results affirm the chosen parameters, indicate the necessity of other parameters fuzzyfication, and suggest the necessity of new researches to evaluate how must be considered the local and general thermal discomfort for controlling thermal comfort in UFAD systems.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de lógica *fuzzy* em controladores de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC -Heating Ventilating Air Conditioning Systems) foi bastante difundida nos últimos anos, visto que o conforto térmico é um conceito nebuloso por natureza, e a implementação de

controlador nebuloso (*fuzzy controller*) é eficiente e produtiva. Segundo Zhang et al. (2003), no início da década de 1990 o controle nebuloso (*fuzzy control*) foi sistematicamente estudado e utilizado em sistemas HVAC. Em 1991, experimentos realizados com um controlador nebuloso desenvolvido por Matsuoka (1991, apud Zhang et al., 2003) resultaram em operação mais suave do compressor do ar-condicionado do que um controle PID (Proporcional Integral Derivativo), 24% de redução no consumo de energia, temperaturas internas mais estáveis, e respostas mais rápidas do sistema. Desde então, pesquisas e implementações de controle nebuloso em sistemas HVAC não cessaram.

Apesar da freqüente implementação de controles nebulosos em equipamentos e sistemas HVAC, tais como em *fan-coils*, aparelhos de ar-condicionado, sistemas de ar-condicionado central e sistemas de aquecimento (Jiang et al. 1995^a, 1995b, 1997; Zhang e Sun 1996; Haissig 2000; apud Zhang et al. 2003), estudos direcionados especificamente para sistemas de condicionamento de ar com insuflação pelo piso (UFAD - *Underfloor Air-Conditioning Distribution*) ainda são escassos e necessitam ser realizados. Isso porque, ao se comparar sistemas de condicionamento de ar com insuflação pelo teto e sistemas UFAD, nota-se que ambos possuem características diferentes, primariamente em função do tipo de fluxo de ar e temperaturas resultantes da insuflação dos mesmos, que sugerem que o controle de sistemas UFAD requer uma mudança de paradigmas em relação à quantidade e posicionamento de sensores, e tratamento e interpretação dos dados de leitura dos mesmos.

Neste contexto, esta pesquisa tem como intenção identificar quais os melhores parâmetros e como podem ser estabelecidas as regras para inferência dos dados num sistema UFAD, no intuito de reduzir o consumo de energia de tais sistemas e manter o conforto térmico em função da implementação de controles nebulosos, visto que controladores e sensores estão diretamente relacionados à eficiência energética e ao conforto térmico de usuários de ambientes condicionados.

2. SISTEMAS UFAD

Introduzido em ambientes de escritório na década de 1970, na Alemanha Ocidental, atualmente o sistema UFAD é pesquisado no Brasil e no mundo, por promover a melhoria das condições de conforto térmico, eficiência de ventilação e qualidade do ar, eficiência energética, aumento de flexibilidade e consequente redução dos custos com ciclo de vida das edificações, redução do pé-direito nas novas edificações, e melhoria da produtividade e saúde dos usuários dos ambientes (Bauman e Webster, 2001). Suas características principais se baseiam no fato deste sistema condicionar parte do volume do ar do espaço e insuflá-lo a uma temperatura superior a que seria insuflada pelo sistema com distribuição pelo teto. O ar condicionado é insuflado num *plenum* (espaço entre o piso elevado e a laje) e distribuído por difusores instalados nas placas do piso elevado. Isso garante a flexibilidade do sistema em relação a mudanças de layout e cargas térmicas. Apesar do foco deste trabalho ser o controle do condicionamento geral do ambiente, há que se citar que no sistema UFAD, a distribuição do ar pode ser efetuada diretamente nas estações de trabalho (*task conditioning*), permitindo o controle individual da vazão de ar.

Um sistema UFAD bem projetado insufla ar a baixas velocidades e a temperaturas mais altas que em sistemas convencionais com insuflação pelo teto. Tais características geram duas diferentes camadas de ar, distribuídas verticalmente: a zona de ocupação (localizada na parte inferior do ambiente), e a zona não ocupada (localizada na parte superior do ambiente). As velocidades de insuflação do ar são tais que possibilitam a mistura do ar na zona de ocupação com o mínimo de turbulência possível, garantindo a estratificação do ar, principal responsável pela eficiência energética e de ventilação do sistema UFAD. A insuflação pelo piso permite que o condicionamento de ar seja dimensionado considerando apenas as cargas térmicas da zona de ocupação, o que diminui a solicitação dos equipamentos e permite diferentes soluções combinadas de funcionamento do sistema. De modo geral, a principal diferença entre os sistemas com insuflação pelo teto e os sistemas UFAD é que o primeiro trabalha com fluxo de ar turbulento e mistura completa do ar, e o segundo com pouca mistura na zona inferior do ambiente, fluxo de ar por deslocamento (*displacement ventilation*) e estratificação do ar. Nota-se, portanto, que a utilização de métodos convencionais de controle desenvolvidos para sistemas com insuflação pelo teto devem ser revistos para que possam atuar eficientemente em sistemas UFAD.

Os controladores são em grande parte responsáveis pelo bom desempenho dos sistemas de condicionamento de ar. Wang et al. (2002) analisaram a potencialidade de melhoria do desempenho energético do sistema UFAD em função do posicionamento e quantidade de sensores para o

monitoramento dos ambientes, mantendo as condições de conforto conforme a norma ASHRAE Standard 55-2004. As simulações executadas para um edifício típico de escritórios em Sacramento mostraram que a utilização de dois sensores para controle ao invés do sensor único reduziu em 8% o consumo de energia (Wang et al., 2002). Concluíram que uma rede de sensores para o monitoramento e controle da temperatura e vazão do ar insuflado reduziria significativamente o consumo energético de uma edificação, o que justificaria o investimento inicial e os custos de manutenções periódicas.

3. CONTROLE NEBULOSO

Controle nebuloso (*fuzzy control*) é uma das principais áreas de aplicação da Teoria dos Sistemas Nebulosos (Fuzzy Systems Theory). Constitui-se de um método de controle no qual as regras de controle são baseadas nos conhecimentos e nas experiências dos operadores, e formuladas em expressões verbais para a inferência na forma de Se ~ Então ~ Senão. Pesquisas como de Dounis et al. (1995) e Dounis e Manolakis (2001), aplicaram o controle nebuloso no desenvolvimento de sistemas de condicionamento de ar, utilizando exclusivamente variáveis de conforto para estabelecer regras de funcionamento do controlador. Pesquisas como de Alcalá et al. (2005) e Kolokotsa et al. (2005), buscam através do controle nebuloso não só o controle do conforto térmico no ambiente, mas também o gerenciamento e melhoria do desempenho energético.

4. MÉTODO DO TRABALHO

De maneira breve, pode-se resumir o procedimento de desenvolvimento de um controle nebuloso da seguinte forma: 1) seleção dos parâmetros de entrada e de saída das regras de controle; 2) estabelecimento da escala de valores dos parâmetros - os valores são expressos na forma de variáveis lingüísticas (conjuntos nebulosos); 3) as regras de controle são definidas por meio da análise das relações entre os parâmetros de entrada e de saída, e as possíveis respostas das combinações das variações dos mesmos; 4) teste e validação do sistema de controle.

Baseado no mecanismo supracitado, as etapas para a elaboração deste trabalho foram as seguintes, considerando as características, normas e pesquisas relacionadas a conforto térmico e sistemas UFAD: 1) definição dos parâmetros de entrada e saída; 2) definição da escala de valores (fuzzyficação dos dados); 3) estabelecimento das regras para o sistema proposto; 4) verificação das regras estabelecidas através de simulações, comparando-se os resultados com os dados experimentais.

Os processos de inferência dos casos analisados seguem o método de Mamdani. Para a *desfuzzyficação* foi utilizado o método do baricentro.

5. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

Segundo as normas estabelecidas para conforto térmico ISO 7730 e ASHRAE Standard 55-2004, os fatores que influenciam no conforto térmico geral são: metabolismo, vestimenta, temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar, umidade relativa do ar. E as principais causas do desconforto térmico localizado são: estratificação da temperatura, assimetria da temperatura radiante, temperatura do piso, e correntes de ar (*Draught Rate* – DR). Portanto, os parâmetros de controle definidos para o presente trabalho foram:

- Temperatura do ar a 1,10m do piso,
- Diferença vertical da temperatura do ar entre o nível da cabeça de uma pessoa sentada (1,10m) e o nível dos pés (0,10m), e
- Insatisfação com correntes de ar (DR) a altura de 1,10m do piso.

Segundo Olesen e Parsons (2002), em sua revisão da ISO 7730, a influência da umidade na preferência da temperatura do ambiente dentro da zona de conforto é muito pequena. Portanto, a umidade não foi considerada neste trabalho, entretanto ela deve ser controlada separadamente para manter a qualidade do ar e evitar problemas de condensação, principalmente no *plenum*. Recomenda-se que o ambiente apresente uma umidade de $12\text{g/kg}_{\text{ar seco}}$.

Variáveis de conforto térmico geral e local foram consideradas em virtude da correlação existente entre as mesmas, e da busca efetiva do conforto térmico. Espera-se através do uso de tais parâmetros

conseguir avaliar ou proporcionar o conforto geral e possível desconforto nos pés, provocado pela velocidade e temperatura do ar na altura dos tornozelos.

5.1 Temperatura do ar a 1,10m

Os sensores dos sistemas de condicionamento de ar em geral fazem a verificação da temperatura de bulbo seco do ar, o que justifica a escolha desse parâmetro, ao invés de temperaturas operativas. O controle da temperatura a 0,60m do piso é a mais significativa no conforto térmico dos usuários de ambientes com sistemas UFAD instalados, devido ao fato de nesta altura estarem localizados os maiores dissipadores de calor, e ser a região mais sensível em relação à temperatura das pessoas (Leite, 2003). Entretanto, a temperatura do ar à altura de 1,10m foi definida como parâmetro de controle no intuito de utilizar-se uma quantidade mínima de sensores de temperatura, e baseando-se nos resultados obtidos por Wang et al. (2002). A faixa de temperaturas de ar entre 22,5° e 27,5°C foi adotada como região de conforto a altura de 1,10m. Estes valores foram decorrentes de análises realizadas por Leite (2003), cujos resultados indicam que na região da pesquisa, sudeste do Brasil, a zona de conforto para temperatura operativa é deslocada aproximadamente 1°C para mais quente da zona proposta por Fanger (ISO 7730, 1994). Isso significa temperaturas operativas para conforto entre 22° e 27°C aproximadamente (Leite, 2003) para altura de 0,60m. Embora os valores de referência propostos por Fanger (1972) sejam relativos à temperatura operativa, Leite (2003) adotou em seus experimentos as temperaturas do ar para as análises de conforto. Isto ocorreu porque as diferenças entre temperaturas radiantes médias e temperaturas do ar se apresentaram muito pequenas (variação menor que 1°C). Neste trabalho, baseado na análise das medições das diferenças entre as temperaturas a 0,6m e 1,1m efetuadas por Leite (2003), para a altura de 1,10m, foi adicionado 0,5°C na faixa de temperaturas de ar proposta por Leite (2003).

5.2 Diferença vertical da temperatura

A diferença vertical da temperatura do ar entre o nível da cabeça de uma pessoa sentada (1,10m) e o nível dos pés (0,10m) foi escolhida como parâmetro de controle, pois, diferenças de temperaturas entre as posições da cabeça e do tornozelo podem causar desconforto térmico (Olesen e Parsons, 2002). Segundo Leite (2003), se a diferença ultrapassar 3°C, pessoas em atividade leve, vestindo roupas com isolamento de 0,5 a 0,7clo, poderão sentir desconforto local, expresso por calor na cabeça e frio nos pés, embora o corpo como um todo possa estar em situação de conforto. Olesen e Parsons (2002) relacionam valores de diferença vertical de temperatura a categorias classificadas de A a C, de acordo com o nível de conforto térmico desejado no ambiente (Tabela 1).

Tabela 1 – Categorias de conforto térmico e diferença vertical de temperatura. Fonte: Olesen e Parsons (2002)

CATEGORIA	A	B	C
DIFERENÇA VERTICAL DE TEMPERATURA (°C)	< 2	< 3	< 4

Esta classificação em categorias possui relação com os índices PMV (*Predicted Mean Vote – Voto médio Previsto*) e PPD – (*Predicted Percentage of Dissatisfied – Porcentagem de Insatisfeitos*) propostos por Fanger (1972, apud Olesen e Parsons 2002).

5.3 Insatisfação com Correntes de Ar (*Draught Rate - DR*)

Segundo Olesen e Parsons (2002), a velocidade do ar e sua influência sobre o conforto térmico geral e local é extensamente estudada nos Estados Unidos, Europa e Japão. Isto porque a movimentação do ar no ambiente pode causar sensação de desconforto ou melhorar as condições de conforto em condições mais quentes. O índice de insatisfação com as correntes de ar (DR) representa a porcentagem de pessoas insatisfeitas em relação às correntes de ar em função da temperatura do ar t_a em °C, velocidade média do ar v em m/s, e intensidade de turbulência T_u em porcentagem, e pode ser determinada segundo a equação:

$$DR = [(34 - t_a)(v - 0,05)^{0,62}] (0,37 \cdot v \cdot T_u + 3,14) \quad [\text{Eq. 01}]$$

A CR 1752 (1998, apud Olesen e Parsons 2002) classifica os níveis de insatisfação com as correntes de ar (DR) em três categorias, de acordo com o nível de conforto térmico desejado no ambiente (Tabela 2).

Tabela 2 - Categoria de conforto térmico e insatisfação com as correntes de ar (DR).

Fonte: CR 1752 (1998, apud Olesen e Parsons 2002)

CATEGORIA	A	B	C
DRAUGHT RATE - DR (%)	< 15	< 20	< 25

A proposta é utilizar para o cálculo da insatisfação devido a correntes de ar a temperatura do ar na altura de 1,10m, no intuito de usar um número mínimo de sensores de leitura de temperatura.

6. PARÂMETRO DE SAÍDA

Ao invés de implementar um sistema de controle cuja saída são sinais a serem enviados a atuadores, a estratégia de controle foi estruturada num sistema de inferência nebulosa onde o parâmetro de saída é a percepção de conforto do usuário. Isso permite uma análise comparativa dos resultados obtidos da estratégia de controle com os dados experimentais de Leite (2003). Sendo assim, a resposta foi definida segundo a escala de sensação térmica da ASHRAE 55-2004 (Tabela 3).

Tabela 3 - Escala de Sensação Térmica (ASHRAE 55a, 1995)

+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
MUITO QUENTE	QUENTE	LIGEIRAMENTE QUENTE	NEUTRO	LIGEIRAMENTE FRIO	FRIO	MUITO FRIO

7. FUZZYFICAÇÃO DOS DADOS

Definidos os parâmetros de entrada e saída do controlador nebuloso há que se transportar seus valores para uma escala lingüística adequada. Ou seja, é necessário utilizar-se de variáveis lingüísticas, tais como 'negativo grande', 'negativo pequeno', 'satisfatório', 'positivo pequeno' e 'positivo grande', para transportar os valores reais dos parâmetros, no caso as temperaturas em Graus Celsius, Insatisfação com Correntes de Ar em porcentagem e Escala de Sensação Térmica variando de -3 a +3, para escalas que traduzam de forma nebulosa as respostas dos usuários com relação a tais parâmetros. As funções de pertinência (μ) indicam o grau que um elemento, por exemplo, um determinado valor de temperatura do ar, é membro de um conjunto nebuloso, por exemplo, 'negativo grande'. Quanto mais próximo de 1 maior será o grau de pertinência do elemento em relação ao conjunto.

A escala de valores dos parâmetros e as respectivas funções de pertinências (μ) foram estabelecidas conforme as definições apresentadas anteriormente. Funções de pertinência (μ) com formas triangulares e trapezoidais foram utilizadas pelo fato de serem de simples implementação (Dounis et al, 1995). Tabela 4 apresenta a escala de valores da temperatura do ar a altura de 1,10m. As Figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, as funções de pertinência das variáveis lingüísticas da temperatura do ar a altura de 1,10m, e diferença de temperatura entre 0,10m e 1,10m.

Tabela 4 – Escala de valores (variáveis lingüísticas) do parâmetro de entrada Temperatura do Ar (altura=1,10m).

NB	NS	ZERO	PS	PB
NEGATIVE BIG – NEGATIVO GRANDE	NEGATIVE SMALL – NEGATIVO PEQUENO	SATISFATÓRIO	POSITIVE SMALL – POSITIVO PEQUENO	POSITIVE BIG – POSITIVO GRANDE

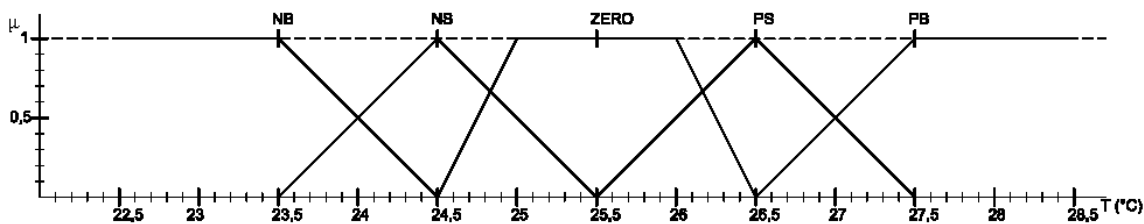


Figura 1- Função de pertinência das variáveis linguísticas da Temperatura do Ar (altura=1,10m).

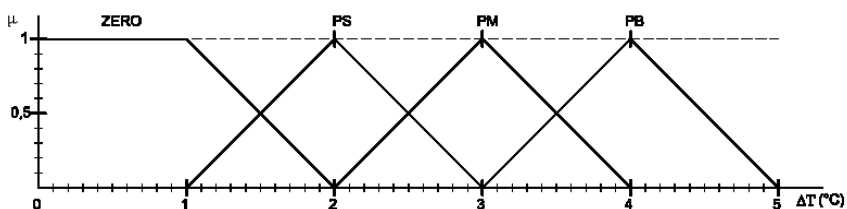


Figura 2 - Função de pertinência das variáveis linguísticas da Diferença de Temperatura entre 0,10m e 1,10m. Escala das variáveis linguísticas: Zero, Positive Small (PS), Positive Medium (PM) e Positive Big (PB).

7.1 Regras do Sistema de Lógica Fuzzy

Para a definição das Regras do Sistema de Lógica Fuzzy foram utilizados os dados de entrada: temperatura do ar a 1,10m (T em °C), diferença vertical da temperatura do ar entre o nível da cabeça de uma pessoa sentada (1,10m) e o nível dos pés (0,10m) (ΔT em °C), e insatisfação com correntes de ar (DR em %). A inferência dos dados de entrada gerou um número de 80 regras propostas no trabalho. As regras são mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 - Regras do Sistema de Lógica Fuzzy. Temperatura do ar a 1,10m (T), diferença vertical da temperatura do ar entre 1,10 e 0,10m (ΔT), e insatisfação com correntes de ar (DR).

DR = ZERO					
ΔT \ T	NB	NS	ZERO	PS	PB
ZERO	-2	-1 (R1)	0 (R2)	0	2
PS	-2	-1 (R3)	0 (R4)	0	3
PM	-2	-2	1	1	3
PB	-3	-2	1	2	3

DR = PS					
ΔT \ T	NB	NS	ZERO	PS	PB
ZERO	-2	-1	0	0	2
PS	-2	-1	0	0	2
PM	-3	-2	0	1	3
PB	-3	-2	-1	2	3

DR = PM					
ΔT \ T	NB	NS	ZERO	PS	PB
ZERO	-2	-2	0	0	2
PS	-2	-2	0	0	2
PM	-3	-3	-1	1	3
PB	-3	-3	-1	2	3

DR = PB					
ΔT \ T	NB	NS	ZERO	PS	PB
ZERO	-3	-2	-1	0	0
PS	-3	-3	-2	0	1
PM	-3	-3	-2	-1	1
PB	-3	-3	-2	-1	2

8. SIMULAÇÃO

Leite (2003) através de questionários aplicados a usuários em laboratório representativo de um ambiente de escritórios com sistema de condicionamento de ar com insuflação pelo piso (UFAD), avaliou qualitativamente as condições de conforto térmico dos usuários. Alguns casos considerados em sua pesquisa foram selecionados (Tabela 6) para verificação das regras aqui estabelecidas (Tabela 5). Foi mantida a mesma nomenclatura utilizada por Leite (2003) em seu experimento no intuito de facilitar ao leitor possíveis consultas a esta referência. Os códigos C_x referem-se às condições térmicas do ambiente durante a realização do experimento, e os códigos S_x referem-se ao posicionamento dos usuários no ambiente durante a pesquisa qualitativa. Na Tabela 6 são apresentados: os casos selecionados; os dados experimentais relevantes de cada condição (Leite, 2003); as médias das respostas dos usuários com relação à sensação de desconforto térmico geral e local, medidos na escala

de sensação térmica (ASHRAE 55-2004), obtidos na pesquisa qualitativa realizada por Leite (2003); e os resultados das simulações para os sete casos.

As simulações realizadas neste trabalho têm como objetivo avaliar os parâmetros escolhidos e as regras propostas, usando os casos apresentados na Tabela 6. Vale ressaltar que em virtude do objetivo de Leite (2003), as insatisfações com relação às correntes de ar e o gradiente de temperatura obtidos em seu experimento foram pequenos. Por isso, experimentos adicionais são necessários para a real verificação das regras aqui definidas.

Tabela 6 – Comparação de resultados das simulações com resultados experimentais de Leite (2003)

Casos	Resultados Fuzzy	Respostas dos usuários na Escala de Sensação Térmica (ASHRAE 55-2004) obtidas por Leite (2003)			Dados medidos (Leite, 2003)		
		Média relativa à Temperatura do ar	Média relativa à Diferença de Temperatura	Média relativa à insatisfação com correntes de ar	Temperatura ar (°C)	ΔT (°C)	DR (%)
C5-S1	-2	-0,12	-1	-0,5	21,6	0,26	3,3
C4-S1	-2	-1	-0,55	-0,55	22,4	0,4	3,46
C3-S2	-1,52	-0,44	-0,77	-0,11	23,97	0,69	4,96
C2-S1	-1,1	-0,37	-0,12	0	24,43	0,4	2,06
C3-S4	-0,48	+0,44	-0,22	-0,11	24,87	1,03	1,2
C2-S2	-0,44	-0,44	-0,22	-0,44	24,96	0,96	4,1
C1-S3	0,32	+0,5	-0,5	0	26,6	0,7	3,66

Os cálculos do Caso C3-S4 serão apresentados para exemplificar as simulações. As regras R1 a R4 que definem as respostas na Escala de Sensação Térmica podem ser visualizadas na Tabela 5.

8.1 Caso C3-S4

Regra 1(R1). Resposta na Escala de Sensação Térmica= -1

$$T = NS \rightarrow \mu=0,63 \quad \Delta T = ZERO \rightarrow \mu=0,97$$

$$DR = ZERO \rightarrow \mu=1 \quad \min(0,63, 0,97, 1) = 0,63$$

Regra 2 (R2). Resposta na Escala de Sensação Térmica= 0

$$T = ZERO \rightarrow \mu=0,74 \quad \Delta T = ZERO \rightarrow \mu=0,97$$

$$DR = ZERO \rightarrow \mu=1 \quad \min(0,74, 0,97, 1) = 0,74$$

Regra 3 (R3). Resposta na Escala de Sensação Térmica= -1

$$T = NS \rightarrow \mu=0,63 \quad \Delta T = PS \rightarrow \mu=0,03$$

$$DR = ZERO \rightarrow \mu=1 \quad \min(0,63, 0,03, 1) = 0,03$$

Regra 4 (R4). Resposta na Escala de Sensação Térmica = 0

$$T = ZERO \rightarrow \mu=0,74 \quad \Delta T = PS \rightarrow \mu=0,03$$

$$DR = ZERO \rightarrow \mu=1 \quad \min(0,74, 0,97, 1) = 0,03$$

$$d_t = \frac{A_{R1} \times d_{R1} + A_{R2} \times d_{R2} + A_{R3} \times d_{R3} + A_{R4} \times d_{R4}}{A_{R1} + A_{R2} + A_{R3} + A_{R4}} = \frac{(0,86 \times -1) + (0,058 \times -1) + (0,94 \times 0) + (0,058 \times 0)}{1,92}$$

$$d_t = -0,48$$

Sendo: A = área da regra e d = distância do baricentro da regra ao conforto ótimo

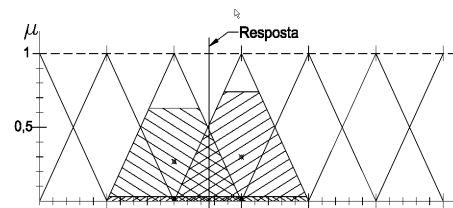


Figura 3 - Gráfico do resultado de simulação do Caso C3-S4

9. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para analisar os dados da Tabela 6 foram calculadas as diferenças entre os resultados obtidos na simulação das Regras do Sistema de Lógica Fuzzy e as respostas dos usuários na Escala de Sensação Térmica (ASHRAE 55-2004) obtidas por Leite (2003). Tais diferenças são apresentadas graficamente na Figura 4. Nota-se que nos casos C3-S4 e C2-S2 a discrepância entre os resultados é menor. Ao mesmo tempo, as discrepâncias aumentam para os casos mais frios ou mais quentes, existindo uma tendência a uma discrepância maior entre os resultados para as temperaturas mais frias, visto que os casos estão dispostos em ordem crescente de temperatura (vide Tabela 6). Nota-se também que as diferenças entre os resultados *fuzzy* e as médias das respostas dos usuários com relação à temperatura do ar, diferença vertical de temperatura e insatisfação com as correntes de ar acompanham esta tendência.

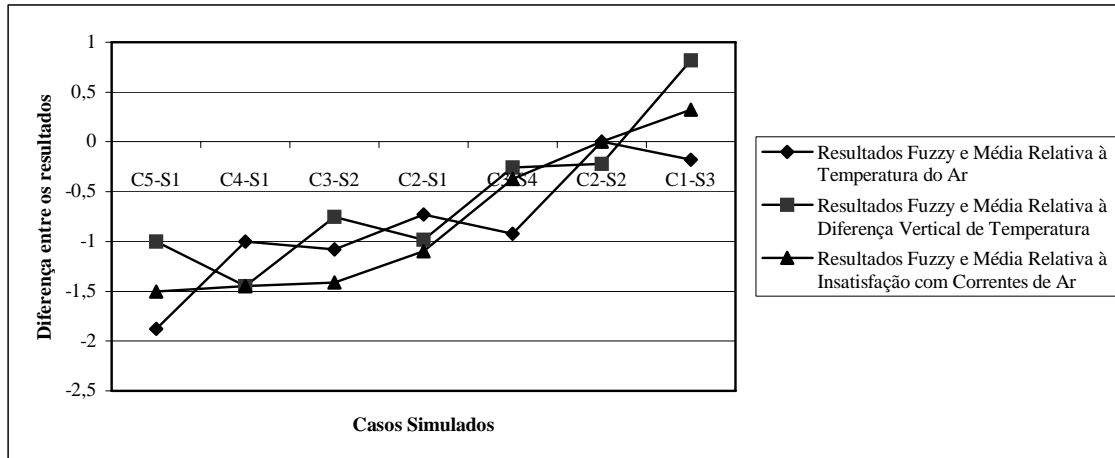


Figura 4 - Discrepâncias entre resultados Fuzzy e resultados obtidos por Leite (2003)

10. CONCLUSÃO

As seguintes considerações podem ser feitas:

- A discrepância entre os resultados sugere que a função de pertinência adotada para as variáveis lingüísticas dos dados de entrada possam estar superestimando situações de desconforto para a região mais fria, ou subestimando a tolerância dos usuários em relação ao conforto térmico na região mais fria.
- Verifica-se a necessidade de pesquisas que avaliem como devem ser considerados os desconfortos térmicos local e geral no que se refere ao controle do conforto térmico em sistemas UFAD. Tais avaliações possibilitariam a calibração do controle nebuloso permitindo a ponderação da influência de cada parâmetro de desconforto geral e local.
- A calibração do controle nebuloso aqui proposto foi limitada em função da restrição do número de pesquisas que possuem dados quantitativos e qualitativos de avaliação de sistemas UFAD. A pesquisa realizada por Leite (2003) obteve resultados favoráveis de avaliação do conforto térmico de sistemas UFAD. Portanto seus resultados experimentais de índices de insatisfação em relação às correntes de ar e diferenças verticais de temperatura foram baixos, sendo isto um limitante para a calibração do controle, visto que para tal, condições pré-definidas de desconforto precisam ser avaliadas.
- A *fuzzyficação* de outros parâmetros que trabalhem de forma integrada ao sistema proposto é necessária. Pode-se citar de pronto a *fuzzyficação* das variáveis consideradas na equação que resulta no índice de insatisfação com correntes de ar (*Draught Rate* –DR): a temperatura do ar e a velocidade do ar.

Este trabalho contribui com uma proposta para os controladores fuzzy de conforto térmico voltados para o sistema de condicionamento de ar com insuflação pelo piso (Underfloor Air-Conditioning Distribution – UFAD). Busca através da inferência nebulosa (fuzzy logic) definir regras que

considerem tanto o conforto térmico geral quanto o local no sistema de controle, visando também a economia de energia, e considerando a quantidade e posicionamento de sensores a serem instalados.

11. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a CAPES pelo financiamento e apoio a esta pesquisa.

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE Standard 55-92. (1992) "Thermal environmental conditions for human occupancy." ANSI/ASHRAE Standard. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta – USA.
- ALCALÁ, R.; CASILLAS, J.; CORDO´N, O.; GONZA´LEZ, A.; HERRERA, F. (2005) "A genetic rule weighting and selection process for fuzzy control of heating, ventilating and air conditioning systems." *Energy Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier science, v.18, 279-296.
- BAUMAN, F. S.; WEBSTER T. (2001) "Outlook for Underfloor Air Distribution." *ASHRAE Journal*, Junho, pp.18-25.
- BAUMAN, F. (2003) "Designing and Specifying Underfloor Systems: Shedding Light on Common Myths." *HPAC Engineering*.
- BAUMAN, F. S.; DALY, A. (2003B) "Underfloor Air Distribution (UFAD) Design Guide." ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, United States of America.
- CHENG, L.Y. (2005) *Aplicações a Teoria de Sistemas Nebulosos II. Controle Nebuloso. Quantificação de Variáveis Subjetivas no Projeto*. São Paulo, USP. Apostila de aula.
- DOUNIS, A.I. et al. (1995) "Design of a fuzzy set environment comfort system." *Energy and Buildings*, Lausanne : Elsevier science, v. 22, p. 81-87.
- DOUNIS, A.I; MANOLAKIS, D. E. (2001) "Design of a fuzzy system for living space thermal-comfort regulation." *Applied Energy*, London : Elsevier Applied Sciences, v. 69, p. 119-144.
- FANGER, P. O. (1972) "Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering." McGraw-Hill Book Company, New York,
- HAISSIG, C. (2000) "Adaptive fuzzy temperature control for hydronic heating systems." *IEEE Control Systems Magazine*, v.20 (2), p. 39-48.
- JIANG, Z.; JIANG, B.; SUN, B.; FANG, G. (1995a) "Research on the fuzzy controller of the fan-coil air conditioner." *Refrigeration Journal (P. R. China)*, v. 1, p. 24-29.
- JIANG, Z.; Wu, B.; SUN, B.; HE, B.; JIANG, B. (1995b) "The fuzzy control research on air conditioner in the car." *Refrigeration Journal (P. R. China)*, v. 4, p. 25-29.
- JIANG, Z.; SUN, B.; JIANG, B. (1997) "Design of a microprocessor controller for fan-coil units." *HV&AC (P. R. China)*, v. 27 (1), p. 39-41.
- KOLOKOTSA, D.; NIACHOU, K.; GEROS, V.; KALAITZAKIS, K.; STAVRAKAKIS, G.S., SANTAMOURIS, M. (2005) "Implementation of an integrated indoor environment and energy management system." *Energy and Buildings*, Lausanne : Elsevier science, v.37, p. 93-99.
- LEITE, Brenda C. C. (2003) *Sistemas de ar condicionado com insuflamento pelo piso em ambientes de escritórios: avaliação do conforto térmico e condições de operação*. São Paulo, 2003. 235 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EP-USP.
- MATSUOKA, F. (1991) *Refrigerating air conditioning fuzzy control technique*. Japanese Refrigeration Institute Transaction, v. 8 (1), p. 149-155.
- OLESEN, B. W.; PARSONS, K. C. (2002) "Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730." *Energy and Buildings*, Lausanne : Elsevier science, v. 34, p. 537-548.

WANG, D.; ARENS, E.; WEBSTER, T.; SHI, M. (2002) "How the Number and Placement of Sensors Controlling Room Air Distribution Systems Affect Energy Use and Comfort." In: International Conference for Enhanced Building Operations. Richardson, Outubro.

ZHANG, J.; SUN, D. (1996) "Study on the fuzzy control of the comfortable air-conditioning system." Refrigeration Journal (P. R. China), v. 3, p. 37-44.

ZHANG, J.; OU, J.; SUN, D. (2003) "Study on Fuzzy Control for HVAC Systems – Part one: FFSI and Development of Single-Chip Fuzzy Controller." ASHRAE Transactions, (1), p. 27-35.