

Operação Sustentável de Sistemas de Ar Condicionado Usando Tecnologia Adaptativa

R. M. Marè, M. F. Barros, M. A. Dota, C. E. Cugnasca e B. C. C. Leite

Abstract— It is possible to define activity scenarios for air conditioning systems associated with indoor environmental quality. It is necessary, for each scenario, set points adjustment and parameters calibration for a sustainable performance with energy efficiency. These adjustments are necessary during the implementation of the system and in every significant change in environment use. They require that tests be performed by a specialist. This work objective is to propose a technique for automatic classification of thermal comfort and even indoor air quality to allow the programming of set points and the recalibration of system parameters, whenever there are significant changes in environment use. Adaptive technologies such as Adaptive Decision Tree associated with Induction of Decision Trees tools are used to solve the problem. It is expected that the proposed technique is able to determine, without the specialist need, the class of the indoor environmental conditions once they change.

Keywords— Air Conditioning System, Decision Tree, Thermal Comfort, Indoor Air Quality, Adaptive Technology.

I. INTRODUÇÃO

A operação sustentável das edificações é um tema de relevância crescente, especialmente nos países desenvolvidos [1]. Um dos grandes desafios é compatibilizar consumo de energia e qualidade do ambiente interior (conforto térmico, qualidade do ar, conforto lumínico), que impacta diretamente no bem estar, saúde e produtividade dos ocupantes [2] [3]. No Brasil, estima-se que quase metade de toda energia produzida no país seja consumida pela operação e manutenção de sistemas prediais de iluminação, climatização e aquecimento de água [4]. No mercado europeu, o consumo de energia em edifícios devido aos sistemas de ar condicionado vem crescendo há décadas [5] e, nos Estados Unidos, os edifícios consomem mais de 70% de toda energia gerada, devido aos sistemas de resfriamento, aquecimento e iluminação [6].

Os edifícios necessitam de sistemas que os auxiliem em sua operação e sejam capazes de acompanhar as inúmeras mudanças de uso e ocupação ao longo de sua vida útil [7]. A base para que se estabeleçam estratégias eficientes na operação dos sistemas é a obtenção contínua de informação

sobre o comportamento da edificação, o que pode ser equacionado pela implantação de redes de sensores que monitorem parâmetros de interesse. Em se tratando de sistemas de ar condicionado, estratégias adaptativas ao contexto baseadas em informações relativas à ocupação, como teor de CO₂ e carga térmica nos ambientes interiores, condições climáticas externas e consumo de energia associado, podem ser de grande valia para a sua operação sustentável.

Apresenta-se neste trabalho uma proposta de uso de Árvores de Decisão Adaptativas (ADA) para a criação de um classificador das condições do ambiente interior relativas ao conforto térmico e à qualidade do ar, que auxiliará na definição de estratégias de operação sustentáveis de sistemas de ar condicionado central, minimizando-se operações manuais e intervenção humana.

Na seção II discute-se a qualidade de ambientes interiores bem como, a importância da eficiência energética em edifícios. Na seção III apresentam-se as ADA, indicando-se sua aplicação na concepção de um classificador para a qualidade do ambiente interior. Na seção IV apresentam-se os materiais e método empregados, discutindo-se um caso de aplicação das ADA no controle da qualidade de ambientes interiores, enquanto que na seção V, os principais resultados dessa aplicação são discutidos. Finalizando, na seção VI apresentam-se as conclusões, seguidas dos agradecimentos e relação de referências.

II. QUALIDADE DO AMBIENTE INTERIOR E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A baixa qualidade do ambiente interior de edificações pode causar grande impacto em seus usuários, a exemplo da Síndrome do Edifício Doente e das Doenças Relacionadas à Edificação, que comprometem sobremaneira o bem estar e a produtividade de seus usuários, tanto por problemas de saúde temporários como por infecções crônicas [8] [9] [2]. Nos Estados Unidos estima-se que cerca de 10 milhões de trabalhadores são afetados por esses problemas, resultando em prejuízos da ordem de bilhões de dólares em absenteísmo, queda na produtividade, ações trabalhistas e propaganda negativa [10].

Os benefícios econômicos obtidos com o incremento da qualidade do ambiente interior decorrem, principalmente, da melhora do desempenho dos ocupantes (tanto em qualidade como em velocidade das ações), redução do absenteísmo e redução nos custos com tratamentos de saúde [11].

Em relação à eficiência energética, apenas os sistemas de climatização são responsáveis por 50% dos gastos com energia em edifícios [12]. No entanto, estes sistemas são as

R. M. Marè, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, São Paulo, Brasil, renata.mare@usp.br

M. A. Dota, Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil, maraadota@gmail.com

M. F. Barros, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, São Paulo, Brasil, barros.mfb@gmail.com

C. E. Cugnasca, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, São Paulo, Brasil, carlos.cugnasca@poli.usp.br

B. C. C. Leite, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, São Paulo, Brasil, brendacclite@gmail.com

melhores ferramentas para proporcionar condições de conforto térmico, assim como renovação do ar com tratamento por meio dos sistemas filtrantes, especialmente em locais onde a ventilação natural é impraticável devido a problemas de segurança e poluição sonora, dentre outros fatores. Requerem, portanto, atenção especial desde a fase de projeto até a sua operação [13]. Edifícios energeticamente eficientes têm seu m² valorizado em 10%, comparativamente a edifícios convencionais e, mesmo entre edifícios verdes, aqueles que possuem maior eficiência térmica e energética ganham em valores de aluguéis e do próprio ativo [1].

III. ÁRVORES DE DECISÃO ADAPTATIVA

Sistemas de ar condicionado fazem uso de um ou mais *loops* de controle, cujas funções são previamente definidas. Alterações significativas no uso do ambiente interior ou mesmo na influência do ambiente exterior exigem também alterações nas funções de controle que em geral, são realizadas por meio de ajustes manuais em um conjunto de *setpoints* que definem a função de controle.

Este trabalho propõe o uso de tecnologia adaptativa para definir as novas funções de controle ou especificamente um novo conjunto de *setpoints* que, neste trabalho, serão qualificados como uma nova classe.

A técnica proposta neste estudo para a criação de um classificador da qualidade do ambiente interior é a Indução por Árvore de Decisão (IAD) [14]. A IAD tem um grande potencial para diversas aplicações, tais como: diagnóstico de falhas, detecção de eventos, e explicação e avaliação de fenômenos ambientais.

A Árvore de Decisão (AD) é um tipo de classificador treinado por seleção iterativa de características individuais mais relevantes em cada nó na árvore [15]. Um espaço de entrada X é dividido em subconjuntos repetidamente descendentes, começando com o próprio X. Existem vários métodos heurísticos para a construção de classificadores de AD. Eles são geralmente construídos de cima para baixo, começando no nó raiz e, sucessivamente, o conjunto vai sendo particionado de acordo com suas características. A construção envolve três etapas principais:

1. Selecionar uma regra de divisão para cada nó interno, ou seja, a determinação da funcionalidade, juntamente com um limiar, será usada para dividir o conjunto de dados em cada nó;
2. Determinar quais nós são nós terminais. Isso significa que para cada nó deve-se decidir pela continuidade ou não do processo de divisão;
3. Atribuir rótulos de classe para nós terminais, minimizando a taxa de erro estimada.

As AD possuem duas fases de trabalho: a aprendizagem e a execução. Árvores de Decisão Adaptativas (ADA) são AD que podem executar as duas tarefas na mesma fase [16]. Pode-se representar a ADA como uma Tabela de Decisão Adaptativa (TDA) dividida em duas camadas: camada de decisão convencional (formada pelas funções convencionais) e camada adaptativa (formada pelas funções adaptativas).

A fim de obter-se a classificação, utilizou-se a ferramenta Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA) para a execução do aprendizado [17]. Como a ferramenta usada não possui recursos de técnicas adaptativas, optou-se por considerar todo o IAD como uma única função adaptativa como na TDA representada pela Figura 1. Desta forma, pode-se incluir o aprendizado na mesma fase que a execução.

As variáveis que disparam o aprendizado são as mesmas do processo normal, porém foram incluídas duas novas variáveis:

- **Aprendizado:** variável booleana que ativa manualmente o aprendizado e é disparada sempre que o usuário alterar significativamente o uso do ambiente, inclusive acrescentando ou retirando carga térmica expressiva do ambiente.
- **Manutenção:** variável booleana que indica que existem elementos do sistema inativos. Esta variável dispara automaticamente um novo aprendizado.

		REGRAS						
		r ₁	r ₂	...	r _i	...	r _n	
TABELA DE DECISÃO CONVENCIONAL	CONDIÇÕES	C ₁	C ₂	...	C _i	...	C _n	Valores das Condições
	AÇÕES	A ₁	A ₂	...	A _i	...	A _n	
CAMADA ADAPTATIVA	FA	IAD	Gerar Tabela de Decisão					

Figura 1. Elementos que compõem a TDA proposta. Fonte: Adaptação de [18].

A Figura 2 apresenta a representação gráfica da AD considerada.

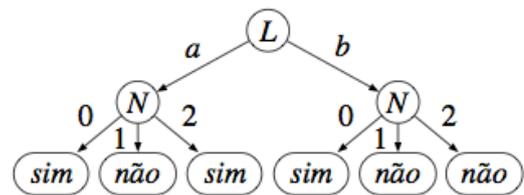


Figura 2. Exemplo de árvore de decisão. Fonte: [16].

A árvore apresentada representa a função

$$f : N \times L \rightarrow C$$

onde:

$$N = \{0,1,2\}$$

$$L = \{a,b\} e$$

$$C = \{sim,não\}$$

com os valores de C definidos na Tabela I.

Os vértices internos da árvore representam testes efetuados sobre variáveis que conduzem a cada possível valor a uma nova aresta, representando o resultado obtido. Parte-se da raiz da árvore submetendo-se exemplos de conjuntos de atributos, chegando-se a resultados da classificação representados nas folhas da árvore.

Tabela I. Definição da função $f: N \times L \rightarrow C$.

N	L	C
0	a	SIM
0	b	SIM
1	a	NÃO
1	b	NÃO
2	a	SIM
2	b	NÃO

Em relação ao classificador para a qualidade do ambiente interior, neste trabalho são consideradas as seguintes características: temperatura do ar e teor de CO₂. Essas características tornam-se atributos considerados para a construção da árvore.

As ADA possuem ampla gama de aplicações bem como, a ferramenta WEKA, que dispõe de uma biblioteca com inúmeras implementações de algoritmos de aprendizagem. Combinados, estes recursos revelaram o seu potencial em estudos anteriores [19].

IV. MATERIAIS E MÉTODO

Como estudo de caso, foram utilizadas duas salas de aula situadas no edifício de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Figura 3), que possuem uso e geometria similares. Cada uma é atendida por um sistema central de ar condicionado distinto: a Sala 17 possui um sistema com distribuição de ar pelo piso, enquanto a Sala 23 possui um sistema misto de insuflamento de ar pelo teto, com teto radiante frio.



Figura 3. Sala 17 (à esquerda) e Sala 23 (à direita). Fonte: autores.

Ambas vêm sendo monitoradas continuamente desde 2009, por uma rede de sensores e um sistema de monitoramento baseado em Internet. Monitoram-se - tanto internamente quanto externamente às salas - temperatura do ar, umidade relativa do ar e teor de CO₂. Este sistema permite a coleta

contínua de dados dos dois ambientes, enviando-os a um servidor *web* remoto onde são armazenados. Usuários autorizados podem acessá-los por meio de um *web site* dedicado, utilizando-se de um navegador padrão para a Internet.

Visto que as leituras nos sensores são efetuadas a cada 30 segundos, uma considerável massa de dados está disponível *online*. Com base nessas informações, podem-se realizar diversas análises, por exemplo: verificação da adequação das condições ambientais frente aos parâmetros vigentes em normas; comparação dos sistemas de ar condicionado a partir da eficiência na promoção de temperatura, umidade relativa do ar e teor de CO₂ conformes; identificação de padrões de variação das grandezas monitoradas em cada ambiente, ao longo do tempo, em função da ocupação e das estratégias de operação adotadas para cada sistema; análise cruzada de informações de qualidade do ambiente interior e consumo de energia para cada sistema de ar condicionado.

Por meio do sistema, também são monitorados os consumos de energia dos dois *fan coils* e do *chiller*.

O sistema de monitoramento possui um modelo em camadas, assim como, um *middleware* capaz de receber dados remotamente por meio de várias tecnologias como *web services* [20; 21], conexões por soquetes, ftp, sftp ou WebDav [22]. Ele possui ainda uma camada opcional de segurança de dados, visando permitir diferentes níveis de criptografia e até assinatura digital de pacotes de dados, ou seja, a não-repudição de origem de dados poderá ser garantida.

Na Figura 4 apresenta-se a arquitetura simplificada do software.

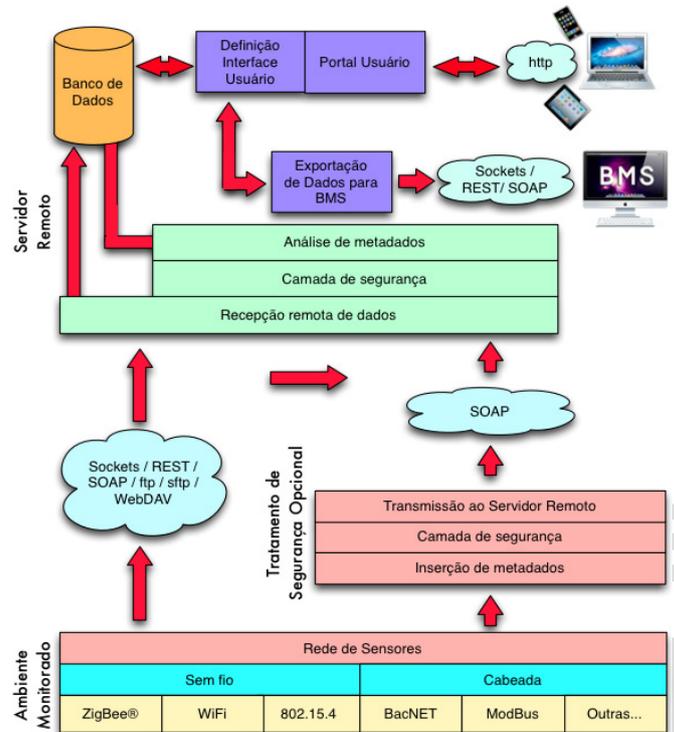


Figura 4. Arquitetura simplificada do software de monitoramento. Fonte: autores (onde BMS = *Building Management System*).

Já o sistema de controle proposto será baseado em um Controlador Lógico Programável, que receberá informações tanto dos sensores quanto do resultado da classificação do ambiente interior, agindo sobre os atuadores, acionando ventiladores, compressores, *dampers* e válvulas, dentre outros componentes do sistema de ar condicionado. Sempre que os resultados não forem compatíveis com o conforto esperado pelos ocupantes, uma nova ADA será desenvolvida, gerando novas classificações. Em função destas classes, o controle acionará o conjunto de pontos de operação (*setpoints*) mais adequados ao novo cenário, ou mesmo a estados emergenciais ou críticos (valores não-conformes das variáveis). Atualmente, um sistema supervisorio proprietário fornece informações do sistema de ar condicionado, permitindo a sua monitoração e intervenções manuais (Figura 5).

Neste trabalho será dado enfoque ao sistema de ar condicionado da Sala 17 (insuflamento de ar pelo piso). A estratégia de controle utilizada desde a sua implantação foi elaborada a partir de cinco *loops* descritos a seguir [13; 23]:

Loop 1: A frequência de rotação do ventilador do *fan coil* varia para manter constante o diferencial de pressão entre o *plenum* e o ambiente (ΔP). O ΔP é obtido a partir de leituras de três transdutores de pressão (no *plenum* e ambiente) instalados no local.

Loop 2: A frequência de rotação do ventilador do retorno varia para manter constante o diferencial de temperatura (ΔT) entre o ar de retorno e o ar de insuflamento (mistura). O ΔT é obtido com base em leituras feitas por sensores de temperatura instalados no duto de retorno e no ponto de descarga do ar de insuflamento.

Loop 3: A válvula de água gelada da serpentina do *fan coil* modula para que a temperatura do ar frio seja mantida em torno de um determinado *setpoint*. A temperatura do ar frio é medida por um sensor instalado na saída do *fan coil*.

Loop 4: O *damper* de *bypass* de retorno e o *damper* de retorno para o *fan coil* modulam inversamente para que se atinja o *setpoint* da temperatura de insuflamento (mistura de ar frio e um percentual de ar de retorno). Um sensor de temperatura instalado no ponto de descarga do ar de insuflamento no *plenum* e outro no duto de retorno do ar ao *fan coil* determinam o percentual de abertura dos dois *dampers*, de modo a que se atinja uma mistura de ar a uma temperatura mais próxima possível do *setpoint*.

Loop 5: Os *dampers* de expurgo e de ar externo modulam diretamente e de acordo com os valores de entalpia do ar de retorno e do ar externo calculados com base em sensores de temperatura e umidade instalados no duto de tomada de ar externo e no de retorno.

Observa-se pela descrição dos *loops*, a forte inter-relação entre variáveis, deixando claros tanto a complexidade da estratégia em questão, quanto o grande potencial de utilização de tecnologias adaptativas.

Diante deste contexto, definiram-se como condições de contorno para este trabalho a análise do conforto térmico no ambiente e, dentre as inúmeras variáveis associadas a esta condição, adotou-se a temperatura do ar.

Os padrões de conforto térmico encontram-se definidos em normas [24; 25], que apresentam a zona de conforto definida por uma combinação ótima de parâmetros físicos (a exemplo de temperatura do ar, velocidade do ar e umidade do ar) e fatores pessoais (tipo de vestimenta e nível de atividade), com os quais, ao menos 80% dos ocupantes se sintam satisfeitos [26].

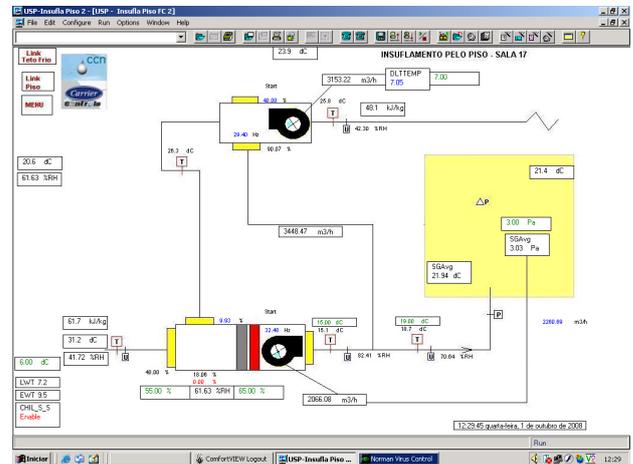


Figura 5. Tela de interface do Sistema Supervisorio ComfortView. Fonte: [13].

Para a atividade predominante no ambiente em questão (sala de aula), a temperatura deve ser verificada a 0,60 m de altura (zona de conforto para pessoas sentadas). O parâmetro dinâmico (adaptativo) em função da variação da carga térmica será a temperatura do ar de insuflamento, visando-se manter constante a temperatura do ar à cota 0,60 m.

Para verificar o acerto no uso da TA, simulações foram realizadas com dados do sistema de monitoramento obtidos em [13]. Estes dados são o resultado de medições contínuas de temperatura do ar e teor de CO_2 , realizadas por um conjunto de sensores fixados em cada parede lateral da sala (paredes opostas) a 2,35 m do piso, proporcionando cerca de 3000 leituras por variável, por ponto. Embora a cota das medições não seja a ideal (0,60 m), para fins de simulação estes dados mostraram-se satisfatórios. Além do mais, em condições reais de uso de um ambiente, medições contínuas a 0,60 m seriam praticamente inviáveis devido, por exemplo, a possível vandalismo junto aos sensores e distorções nas leituras causadas pela movimentação de pessoas.

Foram realizadas simulações com a ferramenta WEKA para a montagem da ADA com dados de quatro condições de uso do ambiente:

- Aula com alunos sentados utilizando computadores;
- Pós-aula (alunos em movimentação na sala);
- Sala inativa (vazia);
- Monitoria (monitor e alguns alunos).

Com a árvore montada foi possível confrontar-se a classificação gerada com os horários de uso de cada tipo de atividade da sala.

V. RESULTADOS

Visando-se avaliar a coerência da classificação, os dados foram submetidos ao algoritmo Functional Trees (implementado no WEKA), sendo utilizado o procedimento

experimental *cross-validation* (*k-fold-cross-validation*) com $k = 10$. A execução utilizando o *cross-validation* consiste em dividir a amostra em k vezes de teste, usualmente com $k = 10$. Considerando-se $k = 10$, a amostra é dividida em 10 partes, sendo 9 delas utilizadas para treino e uma para teste, repetindo-se o procedimento 10 vezes e calculando-se ao final a média das 10 execuções. O objetivo é criar um modelo para prever a produção de outros conjuntos de dados diferentes dos utilizados para a sua construção. O arquivo de dados de treino é utilizado para construir um modelo, enquanto o arquivo de dados de teste é utilizado para verificar se o modelo construído apresenta e mantém coerência (precisão) com diferentes conjuntos de dados. Desta forma, garante-se que o modelo será capaz de analisar dados novos e classificá-los de acordo com o conjunto de dados utilizado previamente.

A Figura 6 mostra a árvore gerada pelo algoritmo.

Um resultado interessante da execução foi o valor de Kappa. Ele é um índice análogo a um coeficiente de correlação, sendo que igual a zero, indica ausência de relação estatística entre as instâncias de uma classe e próximo a 1, uma forte relação. O Kappa do teste realizado resultou em 0,9184, muito próximo a 1, demonstrando uma forte relação estatística entre as diferentes instâncias dentro de uma mesma classe corretamente classificada.

Outros resultados relevantes foram os relativos às Instâncias Corretamente Classificadas (ICC) e às Instâncias Incorretamente Classificadas (IIC). Uma instância nesse caso é um conjunto de leituras em um determinado intervalo de tempo do monitoramento. O valor de ICC indica quantas instâncias foram classificadas de forma apropriada à sua classe, e o IIC indica quantas foram classificadas de forma incorreta. Os valores de ICC e IIC para o teste realizado foram 94,8% e 5,2% respectivamente. O ICC resultante indicou coerência da árvore gerada, representando o modelo real.

Estes resultados mostram que a classificação proposta é coerente, ou seja, demonstram uma forte relação estatística entre as instâncias dentro da classe.

No entanto, outros testes com análises mais aprofundadas mostram-se necessários para que se possam responder a questões como:

- É possível determinar-se um conjunto de classes para a qualidade do ambiente interior, de modo que cada classe corresponda a um cenário de atuação do sistema de ar condicionado?
- Genericamente, quais seriam estas classes?
- Dentro de limites pré-estabelecidos para cada variável, é possível determinar-se a classe da qualidade do ambiente interior por meio de Tabelas de Decisão?
- A TDA proposta permite a configuração automática dos *setpoints* do sistema de ar condicionado com insuflamento de ar pelo piso, mesmo quando instalado em um novo ambiente, sem a necessidade de um técnico especialista?
- O sistema reagirá automaticamente a uma mudança de uso do ambiente, “aprendendo” e se reconfigurando?
- O sistema responderá automaticamente à inclusão de novas variáveis ou sensores, “aprendendo” e se reconfigurando?

```
N2#1 <= 0.340644
| N1#2 <= 0.743126
| | T-1 <= 26.8
```

```

| | N1#4 <= 0.229765
| | | N1#5 <= 0.208509
| | | | N2#6 <= 0.026964
| | | | | T-2 <= 24
| | | | | CO2-1 <= 776
| | | | | | N0#9 <= 0.781024: FT_1:15/150 (70)
| | | | | | N0#9 > 0.781024: Class=0
| | | | | | CO2-1 > 776: Class=0
| | | | | | T-2 > 24: FT_4:15/120 (617)
| | | | | | N2#6 > 0.026964: Class=0
| | | | | N1#5 > 0.208509
| | | | | | CO2-2 <= 626: Class=0
| | | | | | CO2-2 > 626: Class=1
| | | | N1#4 > 0.229765
| | | | | N1#18 <= 0.264423: Class=2
| | | | | N1#18 > 0.264423
| | | | | | N1#20 <= 0.681701
| | | | | | T-1 <= 22: Class=1
| | | | | | T-1 > 22
| | | | | | CO2-2 <= 707
| | | | | | T-2 <= 22.1
| | | | | | | N0#25 <= 0.814639
| | | | | | | CO2-1 <= 502: Class=0
| | | | | | | CO2-1 > 502
| | | | | | | | N0#28 <= 0.420307: Class=1
| | | | | | | | N0#28 > 0.420307: Class=0
| | | | | | | N0#25 > 0.814639: Class=0
| | | | | | T-2 > 22.1
| | | | | | CO2-1 <= 775
| | | | | | | N1#33 <= 0.360909: Class=0
| | | | | | | N1#33 > 0.360909
| | | | | | | | N0#35 <= 0.197423: Class=1
| | | | | | | | N0#35 > 0.197423
| | | | | | | | | N0#37 <= 0.259154: Class=0
| | | | | | | | | N0#37 > 0.259154
| | | | | | | | | T-1 <= 23.9
| | | | | | | | | | N0#40 <= 0.14392: Class=1
| | | | | | | | | | N0#40 > 0.14392: FT_18:15/240 (34)
| | | | | | | | | | T-1 > 23.9
| | | | | | | | | | | N0#43 <= 0.355772: FT_19:15/240 (41)
| | | | | | | | | | | N0#43 > 0.355772: FT_20:15/240 (45)
| | | | | | | | | | CO2-1 > 775: Class=0
| | | | | | | | | CO2-2 > 707: Class=0
| | | | | | | | N1#20 > 0.681701: FT_23:15/105 (205)
| | | | | | T-1 > 26.8: Class=1
| | | | | N1#2 > 0.743126: Class=1
| | N2#1 > 0.340644
| N1#51 <= 0.157046
| | N0#52 <= 0.276217
| | | N2#53 <= 0.91625
| | | | N1#54 <= 0.164136
| | | | | T-1 <= 24.7: Class=2
| | | | | T-1 > 24.7: FT_27:15/105 (41)
| | | | | N1#54 > 0.164136: Class=2
| | | | | N2#53 > 0.91625: Class=2
| | | N0#52 > 0.276217
| | | | T-1 <= 24.7: Class=2
| | | | T-1 > 24.7
| | | | | T-2 <= 24.4: FT_31:15/90 (95)
| | | | | T-2 > 24.4: Class=2
| | N1#51 > 0.15704
| | | N1#65 <= 0.63318: FT_33:15/60 (60)
| | | N1#65 > 0.63318: Class=1

```

Figura 6. Árvore de Decisão obtida pelo WEKA.

VI. CONCLUSÕES

A proposta deste artigo, de criar uma metodologia para que sistemas de ar condicionado central com insuflamento de ar pelo piso possam se autoconfigurar por meio de técnicas adaptativas, mostra-se promissora e útil ao mercado.

A proposta de utilizar ferramentas IAD como única função adaptativa de uma ADA mostra-se como uma solução simples, de fácil implementação e eficaz. Porém, esta solução consome mais recursos computacionais e aumenta o tempo de execução, comparativamente a uma ADA típica.

Como trabalho futuro, pretende-se analisar as condições ambientais proporcionadas (temperatura, umidade relativa e teor de CO₂), frente ao consumo de energia correspondente, para cada sistema de ar condicionado do estudo de caso. A partir dessa análise prévia, pretende-se incluir na estratégia adaptativa de operação faixas de consumo de energia aceitáveis, tanto para os *fan coils* como para o *chiller*, concomitantes às condições ambientais internas conformes. Desta forma, espera-se chegar a estratégias de operação

efetivamente sustentáveis para os sistemas de ar condicionado em questão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa de doutorado concedida; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e Financiadora de Estudos e Projetos pelo apoio ao projeto de desenvolvimento do sistema de monitoramento mencionado.

REFERÊNCIAS

- [1] Eichholtz, P.; Kok, N.; Quigley, J. M. The economics of green building. *Review of Economics and Statistics*, 2011.
- [2] Mitchell, C. S. et al. Current State of the Science: Health Effects and Indoor Environmental Quality. *Environmental Health Perspectives*, v. 115, n. 6, p. 958-964, 2007.
- [3] Lan, L.; Wargocki, P.; Lian, Z. Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort. *Energy and Buildings*, v. 43, n. 5, p. 1057-1062, 2011.
- [4] Eletrobrás. *Procel - Apresentação*. Rio de Janeiro: 2013. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/procel/main.asp?TeamID=%7BA8468F2A-5813-4D4B-953A-1F2A5DAC9B55%7D>>. Acesso em: 05 Jan. 2013.
- [5] Hitchin, R.; Pout, C.; Riviere, P. Assessing the market for air conditioning systems in European buildings. *Energy and Buildings*, v. 58, n. 0, p. 355-362, 2013.
- [6] Gershenfeld, N.; Samouhos, S.; Nordman, B. Intelligent Infrastructure for Energy Efficiency. *Science*, v. 327, n. 5969, p. 1086-1088, 2010.
- [7] Zhu, W.; Rui, Y.; Lingfeng, W. Multi-agent intelligent controller design for smart and sustainable buildings. In: Systems Conference, 2010 4th Annual IEEE, 2010, *Proceedings*... 2010. p. 277-282.
- [8] Carmo, A. T.; Prado, R. T. A. Qualidade do Ar Interno. São Paulo, 1999. *Texto técnico/PCC/23*, 35pf. Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil.
- [9] Mendell, M. J. et al. Indoor Environmental Risk Factors for Occupant Symptoms in 100 U.S. Office Buildings: Summary of Three Analyses. *EPA Base Study*. Disponível em: <<http://eetd.lbl.gov/ied/pdf/LBNL-59659.pdf>>. Acesso em: 30 Nov. 2006.
- [10] Reynolds, S. J. et al. Indoor Environmental Quality in Six Commercial Office Buildings in the Midwest United States. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, v. 16, n. 11, p. 1065-1077, 2001.
- [11] Fisk, W.; Seppanen, O. Providing Better Indoor Environmental Quality Brings Economic Benefits. In: 9th REHVA World Congress Climate: Wellbeing Indoors, 2007, Helsinki. *Proceedings*... Helsinki: 2007.
- [12] Erickson, V. L. et al. Energy efficient building environment control strategies using real-time occupancy measurements. In: 1st ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings - BuildSys '09, 2009. *Proceedings*... Berkeley, California, New York, NY, USA: ACM, 2009. p. 19-24.
- [13] Marê, R. M. Estudo de Eficiência da Ventilação em Sistema de Climatização com Distribuição de Ar pelo Piso. São Paulo, 2010. *Dissertação de Mestrado*, 205 p. Escola Politécnica da USP.
- [14] Witten, I.H. et al. *Data mining: Practical machine learning tools and techniques*. 3ed. San Francisco: Morgan Kaufmann. 2011. [14]
- [15] Tarca, A. L. et al. Machine learning and its applications to biology. *PLoS Comput Biol*. 2007. [15]
- [16] Pistori, H.; Neto, J. J. AdapTree - Proposta de um Algoritmo para Indução de Árvores de Decisão Baseado em Técnicas Adaptativas. In: Conferência Latino Americana de Informática - CLEI 2002. *Anais*... 2002.
- [17] The University of Waikato *WEKA*. Disponível em: <<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>>. Acesso em: 20 Dez. 2014.
- [18] Tchemra, A.H. Aplicação da Tecnologia Adaptativa em Sistemas de Tomada de Decisão. *IEEE América Latina*. Vol. 5, Num. 7, ISSN: 1548-0992, p. 552-556, 2007.
- [19] Pistori, H.; Souza, K. P. Tecnologia Adaptativa Aplicada à Biotecnologia: Estudos de Caso e Oportunidades. In: 4o. Workshop de Tecnologia Adaptativa. *Anais*... São Paulo, p. 16 – 21, 2010.
- [20] World Wide Web Consortium. SOAP Specifications. Cambridge: 2007. Site Internet da especificação do protocolo SOAP, mantido pelo W3C.

Disponível em: <<http://www.w3.org/TR/soap/>>. Acesso em: 01 Ago. 2007.

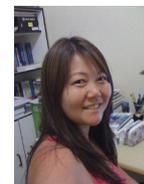
- [21] Fielding, R. T. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. 2000. Irvine, *Doctoral thesis*.
- [22] Stein, G. WebDAV Resources. Disponível em: <<http://www.webdav.org/>>. Acesso em: 01 Jul. 2012.
- [23] Leite, B.C.C. Sistema de Ar Condicionado com Insuflamento pelo Piso em Ambientes de Escritórios: Avaliação do Conforto Térmico e Condições de Operação. 2003. 152 p. *Tese de Doutorado* - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- [24] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16401. Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Brasil, 2008.
- [25] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta - USA: 2010.
- [26] International Standards Organization. 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. Geneva, 2005.



Inteligentes, Cidades Inteligentes, Redes de Sensores para Monitoramento.



Automação Industrial, desenvolvimento de PLCs, IHMs e interfaces de comunicação.



Grosso (UFMT). Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Linguagens de Programação, Redes de Sensores e Sistemas Distribuídos.



área de Supervisão e Controle de Processos e Instrumentação, aplicadas a processos agrícolas e Agricultura de Precisão, atuando principalmente nos seguintes temas: instrumentação inteligente, sistemas embarcados em máquinas agrícolas, monitoração e controle de ambientes protegidos, redes de controle baseados nos padrões CAN, ISO11783 e LonWorks, Redes de Sensores Sem Fio e computação pervasiva. É editor da Revista Brasileira de Agroinformática (RBIAgro).



Brenda Chaves Coelho Leite é graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (1979), mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de São Paulo (1997) e doutora em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica da USP (2003). Atualmente é Professor Doutor no Departamento de Engenharia de Construção Civil

da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Tem experiência na área de conforto térmico e qualidade do ar em edifícios, Sistemas de HVAC, Tecnologias para distribuição de ar pelo piso, conforto térmico individualizado e painéis radiantes; teto verde; simulação de desempenho energético de edifícios; Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD); Sistemas de Automação e controle aplicados à climatização de ambientes.