XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

ESBOÇO DE UM NOVO DIAGRAMA DE ANÁLISE CLIMÁTICA PARA MODELOS DE CONFORTO ADAPTATIVOS

Leandro C. Fernandes
Dr., prof. do Progr. de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, fernandes.ufpr@gmail.com
Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Edifício de Ciências Exatas - PA, 4º Andar – Bairro Jardim das Américas, Curitiba – PR, CEP 81.531-970, Tel. 41-3361-3652

RESUMO
Diagramas para Análise Climática (DAC) são desenvolvidos para apoiarem decisões nas fases de elaboração de projetos de edificações termicamente eficientes. No entanto, fora do meio acadêmico, os diagramas têm sido pouco utilizados. Dentre outros motivos, a pouca utilização está relacionada: à postura profissional predominantemente voltada para aspectos construtivos, econômicos e estéticos; e aos problemas apresentados pelos diagramas disponíveis. Dentre os problemas, cita-se a desatualização em relação à ideia do conforto adaptativo. Este estudo objetivou elaborar o esboço de um novo DAC adequado à ideia do conforto térmico adaptativo. Enquanto método, procedeu-se à revisão crítica da literatura, observando as fragilidades e pontos fortes de diagramas existentes. Partindo de questões observadas na análise, apresentou-se uma alternativa que, acredita-se, seja capaz de atender ao objetivo traçado.
Palavras-chave: diagramas; diagrama para análise climática; diagrama bioclimático; arquitetura bioclimática.

ABSTRACT
Diagrams for Climate Analysis (DCA) are developed to support decisions in the design phases of thermally efficient buildings. However, outside academia, the diagrams have been little used. Among other reasons, the low utilization is related to the professional position predominantly focused on constructive, economic and aesthetic aspects; and the problems presented by the diagrams available. Among the problems of the diagrams, it is pointed the outdate in relation to the idea of adaptive thermal comfort. This study aimed to elaborate the initial draft of a new CAD suited to the idea of the adaptive thermal comfort. As a method, the literature was reviewed critically, observing the weaknesses and strengths of existing diagrams. Starting from the issues observed in the analysis, an alternative was presented which, it is believed, will be able to meet the goal outlined.
Keywords: diagrams; diagram for climate analysis; bioclimatic diagram; bioclimatic architecture.

1. INTRODUÇÃO

Diagramas estão entre as formas de comunicação humana mais antigas. Para Porto Filho (2006), o diagrama é uma ferramenta abstrata para compreender e condensar informações de difícil tradução discursiva. Além da função de representação, são usados para estruturar/organizar o raciocínio e, portanto, desempenhar um papel especial no pensamento humano. São próprios para abordagem de problemas complexos, com múltiplas variáveis. Porém, até recentemente, eram vistos como de interesse marginal (SHIN *et al*., 2014).

Com o advento de novas formas de processamento de dados, passaram a ser vistos como ferramentas poderosas. Dentre os diagramas mais utilizados, citam-se: diagramas de dispersão; de Ishikawa; de Pareto; de circuito; de fluxo de dados; fluxograma; histograma... Na área de diagnóstico climático, tem-se os diagramas bioclimáticos (STEINFELD *et al*., 2010). São diagramas avaliativos, alimentados por dados numéricos do clima e demandas ambientais humanas. Retornam informações fundamentadas e de fácil leitura, propiciando diagnóstico de 'problemas' de um dado clima. Possibilitam avaliar a eficácia potencial de estratégias de design, apoiando o desenvolvimento de projetos de edificações de bom desempenho térmico.

Olgyay (2008) foi o pioneiro da arquitetura bioclimática. Nela, utilizam-se as estratégias de projeto bioclimático objetivando alcançar conforto ambiental e economia de energia. As estratégias são apoiadas por ferramentas para análise dos climas locais. Dentre estas ferramentas, citam-se os diagramas bioclimáticos (com uma ou mais faixas de conforto fixas). Olgyay propôs o primeiro diagrama para definição de estratégias do projeto bioclimático (OLGYAY, 1963 apud STEINFELD et al., 2010). Neste, são consideradas as preferências humanas, a climatologia e a física do edifício. O diagrama relaciona a Temperatura de Bulbo Seco (Tbs) com a Umidade Relativa (UR). É baseado no diagrama psicrométrico do ar (ou diagrama do ar úmido), ábaco que permite representar graficamente as evoluções do ar úmido, conforme a combinação de ar seco e vapor d'água em dada pressão atmosférica (MATOS, 2010). A carta foi desenvolvida para a zona de clima temperado dos EUA, mas pode ser adaptada para outros locais defasando a zona de conforto em 2 a 3 °C (para + em zonas quentes e para - em frias) (OLGYAY, 2008). A abordagem de Olgyay (2008) foi o embrião para os diagramas posteriores.

Baruch Givoni (1998, p. 36), adaptando o diagrama de Olgyay, desenvolveu uma proposta que chamou de "Building Bio-Climatic Chart - BBCC". Givoni observou que existe uma relação inversa entre as variáveis ambientais amplitude térmica e pressão atual do vapor d'água (Equação 1) (GIVONI, 1976). Ou seja, que existe uma relação inversa entre a *UR* e a amplitude térmica. Essa relação permitiu ao autor propor as zonas 'massa térmica alta', 'massa térmica alta com ventilação noturna' e 'aquecimento solar passivo'.

$$\Delta T = 26 - 0{,}83 \times P_v$$

Equação 1

Fonte: Givoni (1976, p. 317)

Onde, ΔT é a amplitude térmica diária média mensal e P_v é a pressão atual de vapor média mensal.

Givoni também desenvolveu o "índice de stress térmico" para traduzir numericamente a sensação térmica e apoiar o seu diagrama. O índice combina a T_{bs}, a temperatura de bulbo úmido (T_{bu}) e a velocidade do ar (V_a). A exemplo de Olgyay, Givoni definiu zonas de conforto/desconforto: para inverno, de 18 a 25 °C; e para verão, de 20 a 27 °C, com amplitude térmica diária máxima interna de 7 ºC. Para países com clima quente e/ou considerados "em desenvolvimento", Givoni (1998, p. 36) recomenda que os limites superiores das faixas de conforto sejam aumentados em 2 °C. Givoni optou pela plotagem explícita das zonas sobre o diagrama psicrométrico (Olgyay o fez de forma discreta) e sua carta apresenta mais zonas.

Bogo *et al*. (1994) realizaram revisão bibliográfica abordando o tema bioclimatologia aplicada à arquitetura com o objetivo de selecionar uma carta bioclimática a ser adotada para o Brasil. Apontaram como adequada a carta de Givoni, com adaptações. Não foram adotadas as duas zonas para conforto proposta por Givoni (1992), uma para inverno e outra para verão. Optou-se por uma única zona (18 a 29 °C), abrangendo as duas anteriores mais os 2 ºC para países em desenvolvimento, com amplitude de 11 °C.

Evans (2004), apresentou um diagrama (Triângulos de Evans) relacionando temperaturas médias mensais com as respectivas amplitudes térmicas mensais. O diagrama apresenta zonas de conforto para: atividades sedentárias (A); repouso (B); circulação interna (C); e circulação externa (D) (EVANS, 2007).

Embora seja antiga, recentemente ganharam força a ideia do conforto adaptativo e seus diagramas. Essa corrente advoga que, em edificações naturalmente ventiladas, os usuários adequam as condições internas ajustando a vestimenta, a taxa metabólica e a edificação (NICOL; HUMPHREYS, 1973). Também advoga que, ao longo das estações, os usuários sofrem aclimatação. Vários autores apresentaram modelos de

conforto adaptativo relacionando temperaturas neutras com médias de temperaturas externas (HUMPHREYS, 1976 *apud* NICOL; HUMPHREYS, 2002; AULICIEMS, 1983; DE DEAR; BRAGER; COOPER, 1997). Como exemplo, cita-se a norma europeia EN15251 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - CEN, 2007), que adotou temperaturas neutras variáveis, conforme as médias das temperaturas externas diárias (Equação 2).

$$T_{o\,conf} = 0{,}33T_{ex\,méd\,ep} + 18{,}8\ °C \qquad \text{Equação 2}$$

Fonte: Nicol e Humphreys (2010, p. 15)

Em que $T_{o\,conf}$ é a Temperatura operativa neutra (ou de conforto) e $T_{ex\,méd\,ep}$ é a Temperatura externa média exponencialmente ponderada. A temperatura operativa (T_o) é a "temperatura uniforme de um ambiente com comportamento de corpo negro imaginário, no qual o ocupante poderia trocar a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente real não uniforme" (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2005). Quando a velocidade do ar for menor que 0,2 m/s a T_o pode ser tomada como a média entre a temperatura radiante média (T_{rm}) e a temperatura do ar (T_{ar}) (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 1998, p. 49).

A norma americana da American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE, 2013), para edificações naturalmente ventiladas, adotou faixas de conforto ao redor de temperaturas neutras variáveis e definidas a partir das médias das temperaturas externas. O procedimento é aplicável apenas para quando as temperaturas médias mensais forem ≥ 10 °C e ≤ a 33,5 °C (ASHRAE, 2013). A $T_{o\,conf}$ é calculada pela Equação 3. Em que $T_{ex\,méd\,m}$ é a média móvel das temperaturas externas (°C), diferindo da variável utilizada pela (CEN, 2007), que utiliza média ponderada. Deve basear-se em não menos de sete e não mais de 30 dias consecutivos antes do dia em questão (ASHRAE, 2013). Em torno da $T_{o\,conf}$ são definidas duas faixas de aceitabilidade térmica: com 5 °C de largura, para 90 % da população; e com 7 °C de largura, para 80 % da população (Figura 1) (ASHRAE, 2013).

$$T_{o\,conf} = 0{,}31T_{ex\,méd\,m} + 17{,}8 \qquad \text{Equação 3}$$

Fonte: Nicol e Humphreys (2010, p. 16)

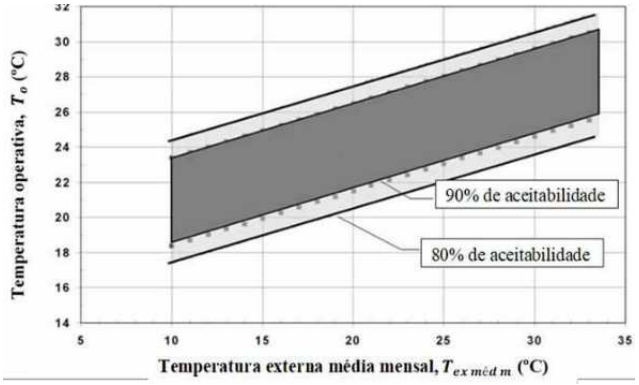

Figura 1 - Faixas aceitáveis para espaços condicionados naturalmente.
Fonte: ASHRAE (2013).

Lamberts *et al*. (2013), apontam o modelo adaptativo da ASHRAE (2013) como a principal inspiração para uma norma brasileira. Pereira e Assis (2014) avaliaram quatro modelos de conforto adaptativo procurando identificar o mais apropriado para as condições brasileiras. Apontaram para o modelo proposto por Auliciems (1983), cuja temperatura neutra é praticamente idêntica à do modelo da ASHRAE, mas possui faixa de conforto mais estreita. De Vecchi *et al*. (2015) analisaram a aplicação do modelo da ASHRAE aos climas de Belém e Florianópolis e alertam para a possibilidade de serem necessários ajustes. Rupp e Ghisi (2019) relataram estudo com dados de três edificações de escritórios com ventilação híbrida. O estudo apresentou resultados favoráveis à aplicação do modelo da ASHRAE (2013), mas indica a necessidade de mais estudos de campo. Em resumo, embora sejam necessários mais estudos de campo, aparentemente, os esforços dirigem-se para validação do modelo americano, mesmo que com ajustes.

Resumindo, os diagramas de Olgyay, Givoni, Bogo e Evans são pouco ajustados à ideia da aclimatação (faixas estáticas). Por outro lado, os diagramas adaptativos não apresentam zonas com diretrizes para projeto.

Apenas o diagrama de Evans contempla a ΔT explicitamente. Porém, trabalha com médias mensais, de baixa precisão. Givoni aborda a ΔT indiretamente. No entanto, como o diagrama é utilizado com dados horários, dias com grandes ΔT podem ter seus dados horários distribuídos por zonas muito diferentes. Um dia com temperaturas do ar variando de 9 a 30 °C pode ter seus 24 pontos distribuídos por zonas como: aquecimento artificial; aquecimento solar; massa térmica para aquecimento; conforto; sombreamento; massa térmica para resfriamento; e ventilação natural, resultando em recomendações opostas.

Outra fragilidade quantos à aplicação dos diagramas de Olgyay, Givoni e Evans é relativa aos procedimentos. Não há ordenamento ou prioridade quanto às estratégias a serem utilizadas. Desconsidera-se que as estratégias impactam umas às outras. Por exemplo, aumentar a inércia térmica para reduzir a ΔT pode eliminar a necessidade de resfriamento ou aquecimento.

Apesar de úteis, os diagramas são pouco empregados para diagnóstico de problemas e avaliação de diretrizes projetuais. Poucos profissionais da construção civil utilizam Diagramas para Análise Climática (DAC). Dentre os motivos, citam-se: a) Prevalência de posições esteticistas, arredias aos dados do contexto arquitetônico, pois a problematização de condicionantes concretos tende a atrapalhar a elaboração de um objeto que está de antemão orientado esteticamente (PORTO FILHO, 2006). b) Formação voltada para aspectos construtivos, econômicos e estéticos, repercutindo em pouca consideração pelo desempenho dos edifícios em relação a conforto ambiental (ROCHA e SOUZA, 2009) e consumo energético. c) A emergência dos modelos de conforto adaptativos, colocando em xeque os modelos estáticos anteriores e, consequentemente, os DAC a eles relacionados.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi elaborar o esboço inicial de um diagrama para análise climática adequado à ideia do conforto térmico adaptativo e voltado para pequenas edificações.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para elaboração da nova proposta, levantaram-se os modelos de conforto adaptativo analisados para o Brasil. Adotou-se o modelo da ASHRAE (2013), que, no momento, apresenta maior probabilidade de validação. Essa opção implicou na adoção dos respectivos procedimentos para obtenção das temperaturas neutras e das faixas de conforto.

A análise utilizando o diagrama proposto foi realizada no programa Excel, da Microsoft. Em função do modelo adotado, como dados de entrada iniciais, utilizam-se as temperaturas externas do ar e a latitude do local. O valor da latitude permitiu calcular os horários do nascer e do por do sol, possibilitando diferenciar os períodos diurno e noturno.

Para calcular os horários do nascer e pôr do sol foram usadas as Equações 4 e 5.

$$\delta = 23{,}45 \times sen\left(\frac{360}{365} \times (284 + n)\right) \qquad \text{Equação 4}$$

$$Td = \left(\frac{2}{15}\right) \times \arccos\left(-tan\emptyset \times tan\delta\right) \qquad \text{Equação 5}$$

Nestas equações, δ é a declinação solar, n é o dia sequencial do ano (de 1 a 365), Td é a duração do dia (em horas) e $\emptyset$ é a latitude local (para locais no hemisfério sul usar valor negativo). 12 menos $Td/2$ retornará o horário do nascer do sol e 12 mais $Td/2$ retornará o horário do pôr do sol.

As temperaturas externas do ar foram processadas para se obter as variáveis: a) temperaturas médias diárias; b) amplitudes térmicas diárias; c) temperaturas médias móveis (últimos 30 dias); d) e temperaturas neutras.

3.1. Estrutura inicial do diagrama

Para estruturação do novo diagrama (Figura 2), determinou-se um reticulado construído a partir um eixo horizontal e um semieixo vertical:

a) O eixo horizontal indica as diferenças entre as temperaturas externas e as temperaturas operativas neutras. Perpendicularmente a esse eixo, em seu centro (ponto zero), foi traçada a 'semirreta de neutralidade térmica'. Em torno desta, foram indicadas as faixas de conforto para 80% (±3,5 °C) e 90% (±2,5 °C) de aceitabilidade. Este eixo também pode ser adaptado para 'eixo de sensação térmica', graduado segundo a escala PMV (neste caso a faixa de conforto terá como limites os valores ±0,85 e ±0,50, respectivamente.

b) No semieixo vertical, marcam-se as amplitudes térmicas diárias. Na base desse semieixo foi indicada uma faixa correspondente às amplitudes térmicas diárias internas consideradas aceitáveis. A adoção dessa vaiável se deu em função de sua importância para o conforto e para a determinação de diretrizes projetuais, conforme observado por Givoni (1976). Utilizou-se faixa conforme a ASHRAE (2013), onde o valor máximo aceitável, para aceitabilidade de 80 %, é 7 °C.

Vários autores associaram a adequação do desempenho térmico das edificações à relação entre a inércia térmica da edificação e as amplitudes térmicas diárias do clima de implantação. Recomendam altos níveis de inércia térmica para moderar as oscilações térmica internas (VERBEKE; AUDENAERT, 2018). Não há consenso quanto às amplitudes térmicas diárias máximas para as edificações. Porém, estudos (Tabela 1) apontam como positivo o estabelecimento de limites (AULICIEMS, 1983; BOGO *et al*., 1994; GIVONI, 1998; EVANS, 2007; CEN, 2007; ASHRAE, 2013; ABNT/CB-055, 2016).

Tabela 1 - Amplitudes térmicas internas diárias de acordo com a bibliografia consultada

Modelo	**Amplitude máxima [°C] para edificações com expectativa alta**	**Amplitude máxima [°C] para edificações com expectativa moderada**
Auliciems (1983)		4
Bogo et al. (1994)		11
Givoni (1998) países desenvolvidos		7
Givoni (1998) países em desenvolvimento		9
Evans (2007)		8,3
EN15251 (CEN 2007)	6	8
ASHRAE (2013) e ABNT/CB-55 (2016)	5	7

Pelo menos três proponentes de procedimentos para análise climática consideraram a ΔT com vista ao estabelecimento de diretrizes de projeto: Evans (2004) a utilizou como uma das variáveis de entrada seu diagrama; Mahoney (SZOKOLAY, 2008) a utilizava nas chamadas 'tabelas de Mahoney'; e Givoni (1976) a considerava de forma indireta, via relação com a pressão atual de vapor e umidade relativa. A ΔT também é utilizada para caracterizar climas e apontar diretrizes projetuais. O clima quente e seco é descrito como com alta amplitude térmica diária; o quente e úmido como com baixa amplitude térmica diária; e o os temperados como com amplitudes térmicas variadas ao longo do ano (GIVONI, 1976).

Paralelamente ao semieixo das ΔT diárias foi definido o semieixo secundário Nível de Inércia Térmica (*NI*). Indica o nível de inércia térmica demandado por uma edificação. A relação entre a graduação deste eixo e as ΔT diárias é dada pela Equação 6:

$$NI = \frac{\Delta T_{ex}}{\Delta T_{in}} - 1 \qquad \text{Equação 6}$$

No futuro, será graduado um eixo horizontal secundário, referente à resistência térmica. Perpendicularmente a ele e sobre seu centro, será traçada uma faixa indicando a região sem demanda de isolamento térmico. À esquerda e à direita desta faixa, serão traçadas semirretas indicando níveis de resistência térmica para as condições de inverno e verão. A graduação deste eixo secundário demanda maiores estudos.

Em termos de dados retornados, referentes ao ambiente interno hipotético, são obtidos dados relativos às temperaturas operativas (T_o). Nesta proposta, também são exploradas variáveis obtidas após o processamento da T_a, a ΔT diária e T_a média diária.

Zona de sombreamento: Considerou-se Olgyay (2008), para quem esta zona inicia no limite inferior da zona de conforto. Havendo conforto sem incidência de radiação solar direta, é necessário sombreamento.

Zona de aquecimento solar: Possui largura de 10 °C e inicia-se à esquerda da faixa de conforto com aceitabilidade de 90 %. Consideraram-se estudos de diferentes autores, mas principalmente os de Evans (2007), que argumenta que os ganhos térmicos devidos ao aquecimento solar direto podem elevar as temperaturas internas em até 10 °C, e de Olgyay (2008), que recomenda que o aquecimento solar passa a ser necessário quando as temperaturas externas estiverem abaixo do limite inferior da zona de conforto.

Zona de Aquecimento Artificial: Esta zona inicia no limite esquerdo da zona de aquecimento solar. Corresponde, aproximadamente, ao recomendado por Lamberts *et al*. (2016b) recomendam o aquecimento artificial quando as temperaturas externas locais forem inferiores a 10,5 °C.

Zona de Ventilação Natural: O modelo de conforto adaptativo adotado já prevê o alargamento da faixa de conforto, alterando os limites superiores, caso a velocidade do ar, cujo valor inicial é 0,3 m/s, seja aumentada, preservando os valores para o PMV (ASHRAE, 2013). Para 0,6 m/s o aumento é de 1,2 °C (b); para 0,9 m/s é de 1,8 °C (c); e para a velocidade do ar de 1,2 m/s o aumento é de 2,2 °C (d). Velocidades acima de 0,8 m/s são toleradas somente quando os usuários possuem controle sobre a ventilação.

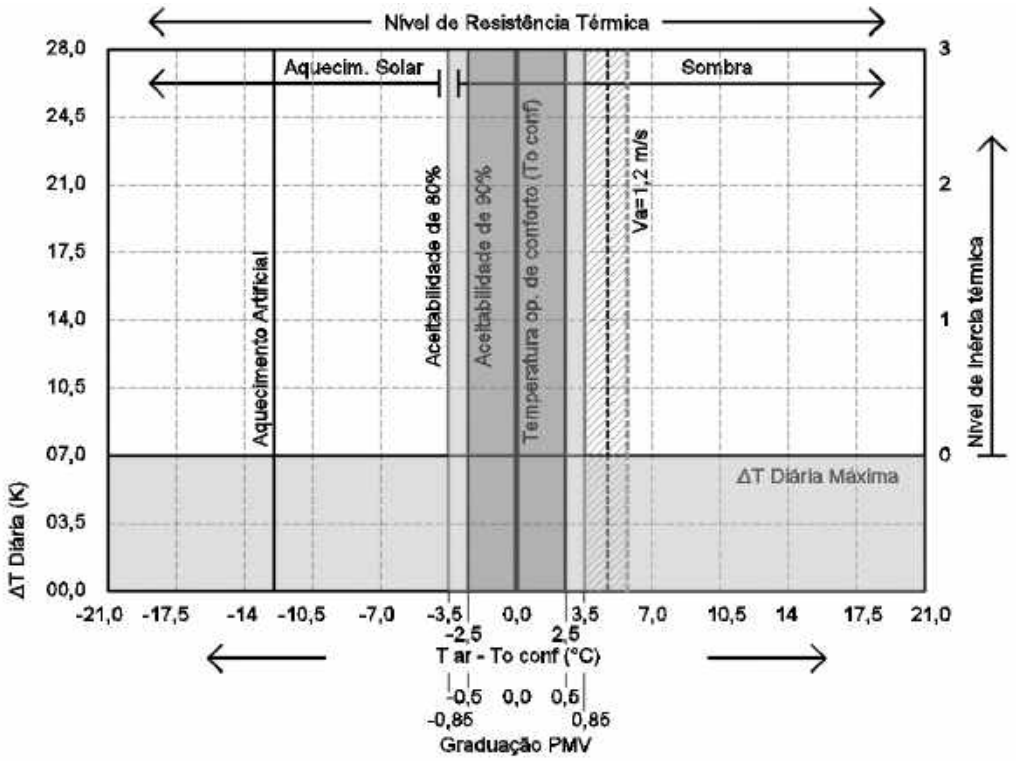

Figura 2 – Esboço do Diagrama Antropoclimático.

Com o avanço dos estudos, espera-se que a plotagem de dados horários de temperaturas e amplitudes (Figura 3) permita classificar o clima para fins de projeto conforme as condições ambientais predominantes. A título de ilustração: A) confortável; B) frio e com baixas amplitudes térmicas; C) quente e úmido, com baixas amplitudes; D) frio e com altas amplitudes; E) quente e seco, com altas amplitudes; F) composto.

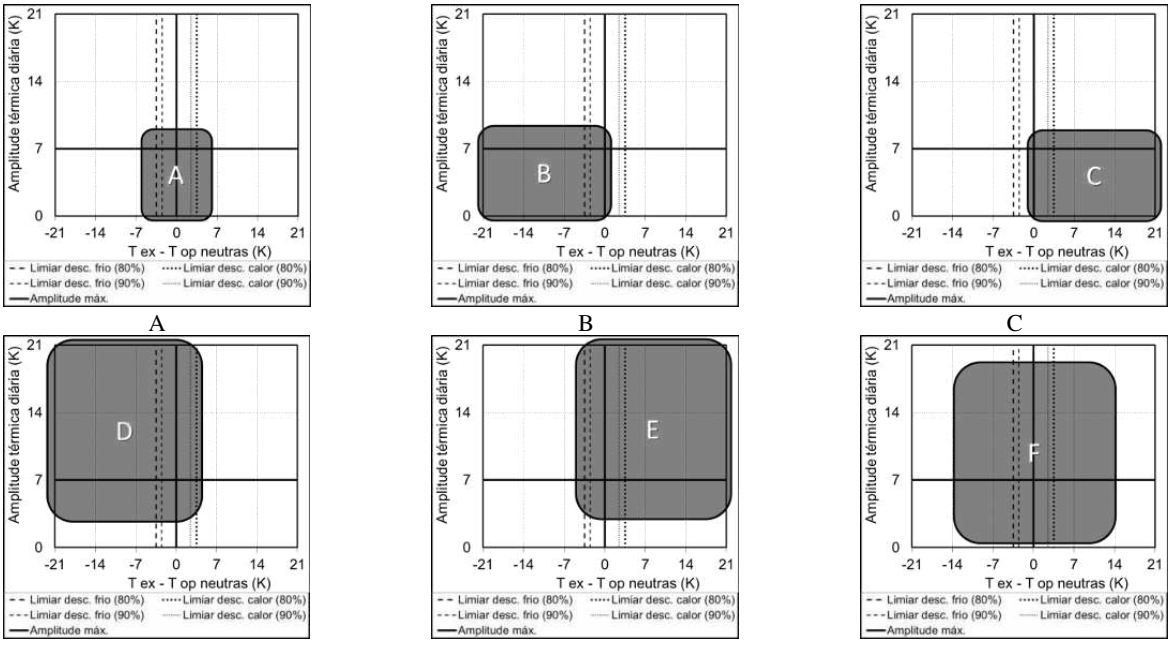

Figura 3 – Esboço do Diagrama Antropoclimático.

3.2. Procedimentos para aplicação

Quanto aos procedimentos para aplicação da ferramenta de análise para tomada de decisões, deve-se considerar que as ações de projeto são inter impactantes. A análise e adoção de estratégias deve ser ordenada de modo que uma opção não anule a anterior. Deve-se considerar que se está partindo do embrião de um projeto de ambiente térmico, desprovido de artifícios para se diferenciar do ambiente externo. Esses artifícios serão agregados pelo projetista, em etapas sucessivas. A ideia é que se está trabalhando com uma edificação

hipotética cujo ambiente interno apresenta amplitudes térmicas e temperaturas do ar idênticas àquelas do ambiente externo. Essa edificação é absolutamente leve (nível de inércia igual a zero), possui revestimento reflexivo, está completamente sombreada e não dispõem de artifícios para aquecimento ou resfriamento. Ordenadamente, conforme a necessidade, serão agregadas características, regulando o impacto do ambiente externo sobre o interno, para que o segundo se adeque às demandas de eventuais usuários.

Primeira etapa. A primeira análise é referente ao nível de inércia. Quando a amplitude térmica diária for maior que a considerada aceitável, a inércia térmica deve ser aumentada a fim de se obter amplitudes aceitáveis. Plotam-se os dados do ambiente externo sobre a carta. Os dias com maior inércia indicarão, no semieixo secundário, o nível de inércia a ser adotado para a edificação para redução das amplitudes.

Segunda etapa. Simulação de dados internos considerando o novo nível de inércia e avaliação dos dados obtidos. Para simulação, considera-se uma edificação hipotética, sem mecanismos para aquecimento ou resfriamento, cujas trocas térmicas com o meio ocorram exclusivamente por condução e convecção. A simulação pode ser feita via softwares de modelagem, protegendo o modelo da incidência da radiação solar, ou via equações preditivas. Pela simplicidade, sugere-se o método preditivo proposto por Fernandes *et al.* (2015) e Krüger *et al.* (2017). O argumento fundamental daquele método é: as temperaturas internas do ar de pequenas edificações passivas (sem meios para resfriamento/aquecimento) tendem a oscilar conforme a diferença em relação às temperaturas externas. Essa oscilação ocorre a taxas (α) mais ou menos constantes, variando conforme a edificação. α está relacionado ao nível de inércia térmica (*NI*) da edificação. Sendo assim, a partir do *NI* demandado (indicado pelo diagrama), pode-se obter um valor aproximado para a taxa de variação demandada para uma edificação (Equação 5). As temperaturas internas do ar horárias estimadas são obtidas por meio da Equação 6.

$$\alpha = \left(\frac{1}{NI+1}\right)^2 \qquad \text{Equação 5}$$

$$T^t_{in\ est} = T^{t-1}_{in\ est} + \alpha(\ T^t_{ex} - T^{t-1}_{in\ est}) \qquad \text{Equação 6}$$

Fonte: Fernandes *et al.* (2015)

Onde *t* indica a hora (momento), T^t_{in} é a temperatura interna estimada no momento *t*, T^{t-1}_{in} é a temperatura estimada no momento *t-1*, T^{t-1}_{ex} é a temperatura externa no momento *t*.

Os dados simulados da edificação, com o novo nível de inércia, permitem avaliar a demanda por resfriamento/aquecimento. Essa demanda subsidiará as decisões sobre o tipo de revestimento (reflexivo ou absorvente), o sombreamento e os artifícios para aquecimento ou resfriamento.

A título de demonstração, aplicaram-se ao diagrama dados horários de temperatura de Belo Horizonte (Pampulha), do ano de 2009, registrados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), pela estação 868000 (lat. -19.82, long. -43.96, altitude 869 m) e disponibilizados no site http://www.labeee.ufsc.br. Os resultados foram comparados com os obtidos utilizando o diagrama de Bogo *et al.* (1994).

4. RESULTADOS PARCIAIS

A leitura dos resultados parciais aqui apresentados requer atenção ao fato de que o diagrama de Bogo *et al.* (Figura 4) é aplicado somente aos dados do ambiente externo, enquanto o diagrama proposto apresenta duas fases de aplicação: aos dados do ambiente externo; e aos dados simulados do ambiente interno.

Primeira etapa.

A verificação da demanda por inércia térmica não consta como uma etapa específica na aplicação do diagrama de Bogo *et al*. A inércia é abordada quando consideradas as zonas: alta inércia térmica / aquecimento solar, alta inércia térmica para resfriamento, alta inércia / resfr. evaporativo, ventilação / alta inércia / resfr. evaporativo, e ventilação / alta inércia. A soma dos valores dessas zonas resultou em necessidade de inércia térmica em 24,9 % das horas do ano.

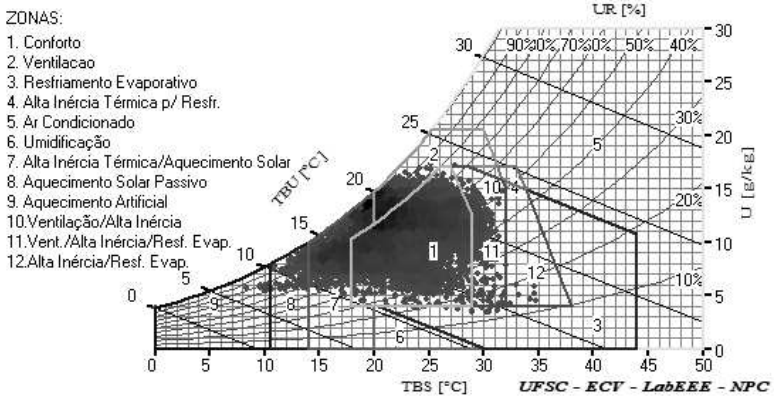

Figura 4 – Dados plotados sobre o diagrama de Bogo *et al.*

Quando aplicado o diagrama aqui proposto (Figuras 5 e 6), este indicou demanda por maior inércia térmica em 84 % dos dias do ano. A diferença de conceito é relevante, pois aumentar a inércia térmica impacta mais que horas específicas. O nível de inércia (NI) demandado foi de 1,5, resultando em $\alpha = 0{,}16$.

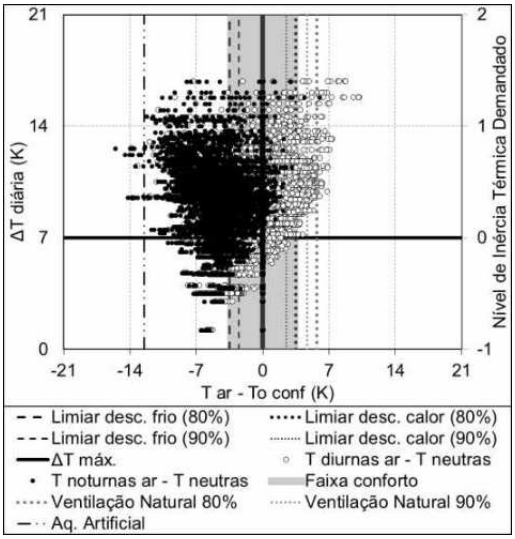

Figura 5 – Dados de Belo Horizonte plotatos sobre o esboço do diagrama (T diurnas e noturnas – T op neutras).

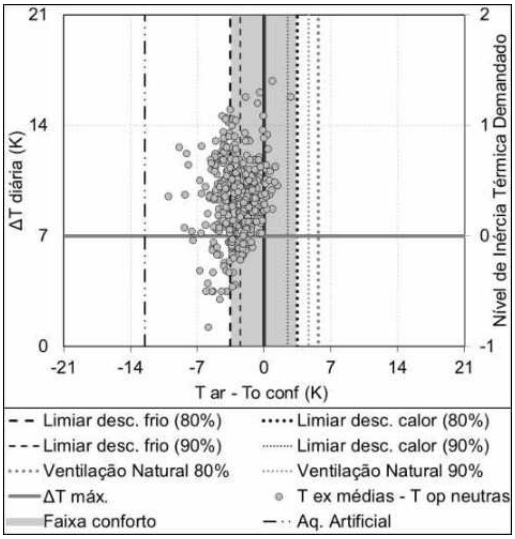

Figura 6 - Dados de Belo Horizonte plotatos sobre o esboço do diagrama (T médias – T op neutras).

Segunda etapa.

Obtido o valor de α, simulou-se o comportamento das $T_{in\ ar}$ horárias quando aumentado o NI e, então, estas foram analisadas considerando o diagrama proposto. Os dados indicaram que, com o novo nível de inércia, somente 5 % dos dias ficariam com ΔT diária interna acima de 7 K. As horas com demanda por resfriamento e aquecimento, nas duas faixas de conforto, deixaram de se concentrar em períodos opostos, distribuindo-se de modo similar (Figura 7). A necessidade de resfriamento foi quase eliminada (Figura 7). As temperaturas diurnas e noturnas apresentaram valores mais próximos. No entanto, como era de se esperar, a inércia térmica pouco afetou as temperaturas médias diárias internas (Figura 8), que continuaram oscilando entre as zonas de conforto e desconforto por frio. O próximo passo seria refinar a análise dos dados estimados, por estações do ano, e, provavelmente, propor aquecimento passivo em períodos específicos (o que não é apresentado neste artigo por se tratar de uma publicação de resultados parciais).

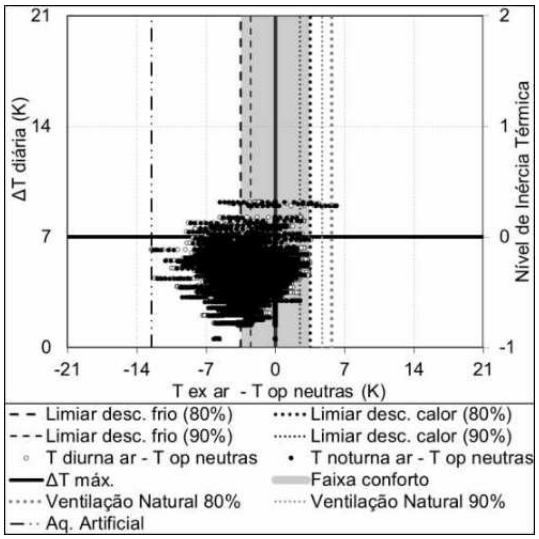

Figura 7 - Dados estimados para Belo Horizonte plotatos sobre o diagrama (T diurnas e noturnas estimadas – T op neutras).

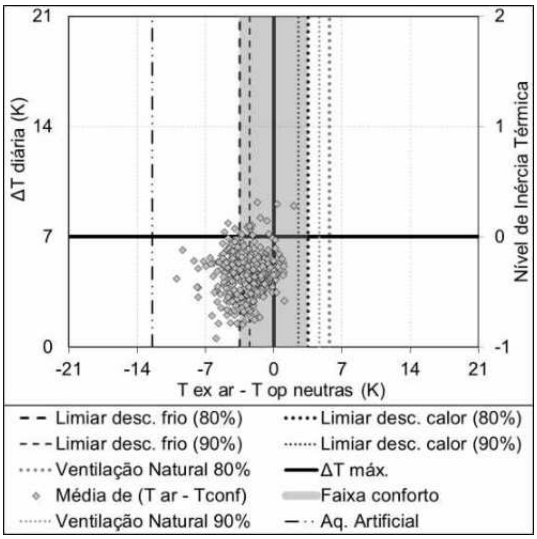

Figura 8 - Dados estimados para Belo Horizonte plotatos sobre o esboço do diagrama (T médias estimadas – T op neutras)".

A Tabela 2 permite comparar as análises considerando os diferentes diagramas e metodologias. Destacam-se as diferenças em se tratando do desconforto. O diagrama proposto indica mais desconforto por frio e menos desconforto por calor. Também aponta menor demanda por ventilação natural. Em se tratando do aquecimento solar, é importante observar que o diagrama de Bogo *et al.* considera todas as horas do ano,

noturnas e diurnas, enquanto o método aqui proposto considera somente as horas diurnas, nas quais ocorre a possibilidade de disponibilidade de sol. Assim, pode-se dizer que o dimensionamento da demanda efetiva por insolação, ou seja, quando ela está disponível, é maior no método proposto.

Tabela 2 - Amplitudes térmicas internas diárias de acordo com a bibliografia consultada

	Análise dos dados do ambiente externo	**Análise dos dados do ambiente interno simulado**	
	Bogo *et al.*	Aceitabilidade de 80 %	Aceitabilidade de 90 %
Conforto	61.3	62.7	44.6
Desconforto	38.7	39.5	55.4
Desconforto por frio	23.5	37.1	54.1
Desconforto por calor	15.2	2.4	1.3
Ventilação	12.0	0.2	1.2
Aquecimento Solar /Alta Inércia Térmica + Aquecimento Solar Passivo (consideradas todas as horas do ano)	23.4	-	-
Aquecimento Solar Passivo (consideradas somente as horas diurnas)	-	16.8	24.5
Aquecimento Artificial	0.2	0	0
Ventilação/Alta Inércia/Resfriamento Evaporativo	2.9	-	-
Alta Inércia/Resfriamento Evaporativo	0.1	-	-
Resfriamento Evaporativo	0.2	-	-
Sombreamento (do total das horas diurnas)	67.9	66.3	51.0

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve por objetivo apresentar o esboço de um diagrama para análise climática adequado à ideia do conforto térmico adaptativo e voltado para pequenas edificações. Procedeu-se à revisão crítica da bibliografia, verificaram-se quais modelos de conforto adaptativo são indicados para os climas brasileiros e definiram-se as variáveis de entrada. Partindo dos diagramas existentes e dos modelos de conforto adaptativo indicados para os climas brasileiros, apresentou-se um esboço de diagrama alternativo.

O esboço mostrou-se simples e de fácil aplicação via planilha eletrônica (software Excel). Embora o diagrama ainda esteja em desenvolvimento, acredita-se, reúne pontos fortes das propostas anteriores e será capaz de comportar a maioria das zonas para diretrizes de projeto dos diagramas anteriores, além de novas zonas, a serem delimitadas. A proposta valoriza a análise das temperaturas horárias, mas também de dados obtidos após processamento, como as temperaturas médias e amplitudes térmicas diárias. Além do diagrama, foi apresentado um método para sua aplicação.

O método para aplicação, dividido em duas etapas, permitiu dimensionar e avaliar a importância da inércia térmica da edificação a ser projetada.

Os resultados obtidos com o novo diagrama, na segunda etapa do procedimento, foram comparados com os obtidos com o diagrama proposto por Bogo *et al.* (1994). A comparação de resultados indicou que o diagrama proposto apresenta resultados diferentes, sugerindo aos projetistas: maior enfoque na inércia térmica; menor necessidade de ventilação; maior necessidade de aquecimento solar.

A proposta apresentada é resultado de um esforço para atualização dos diagramas atuais. O diagrama é adaptável a diferentes modelos adaptativos, tais como o da EN15.251 (CEN, 2007), de Vellei *et al.* (2017) ou Auliciems (1983).

O método proposto ainda não apresenta sugestões para o enfrentamento do problema das temperaturas noturnas à esquerda da faixa de conforto. É uma das questões que serão enfrentadas no futuro. Outros estudos a serem realizados são: avaliar o uso de modelos de conforto adaptáveis às atividades diurnas e noturnas, conforme defendido por Evans (EVANS, 2004); incorporar outras zonas para diretrizes identificadas na revisão bibliográfica, tornando-as dinâmicas, conforme o modelo adaptativo; elaborar zonas referentes às potencialidades dos climas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220**: Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABNT/CB-055 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS / COMITÊ DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO - CB-55. **3º Projeto Revisão ABNT NBR 16401-2**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard 55-2013** - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. USA, Atlanta: 2013.

AULICIEMS, A. Psycho-Physiological Criteria for Global Thermal Zones of Building Design. **International Journal of Biometeorology**, v. Complement, p. 69–86, 1983.

BOGO, Amilcar; et al. Bioclimatologia Aplicada ao Projeto de Edificações Visando o Conforto Térmico. Relatório Interno - 02/94 Florianópolis: 1994.

DE DEAR, R.; BRAGER, G.; COOPER, D. **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference - Final Report on RP-884**. Sydney: ASHRAE, 1997.

DE VECCHI, R. et al. ASHRAE 55 adaptive model application in hot and humid climates: The Brazilian case. **Architectural Science Review**, v. 58, n. 1, p. 93–101, 2015.

CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15251** - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Brussels: CEN, 2007.

EVANS, J. M. 03/01951 Evaluating comfort with varying temperatures: a graphic design tool. **Fuel and Energy Abstracts**, v. 44, n. 5, p. 326, 2004.

EVANS, John Martin. **The Comfort Triangles: A New Tool for Biocliatc Desgin**. 2007. Thesis - Technische Universiteit Delft, 2007.

FERNANDES, L. C. *et al*. Estimativa de Temperaturas Internas Horárias de Pequenas Edificações a Partir de Temperaturas Externas: Proposta de Método Alternativo. In: XIII ENCONTRO NACIONAL E IX ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Campinas, 2015. **Anais**... Campinas: ANTAC, 2015.

GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture**. 2ª ed., London: Applied Science Piblishers Ltd., 1976.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11–23, 1992.

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. New York: John Wiley & Sons,1998.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **International Standard ISO 7726**. Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities. Switzerland: 1998.

KRÜGER, E. L. *et al*. Proposition of a simplified method for predicting hourly indoor temperatures in test cells. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 57–70, 2017.

LABEEE - LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Analysis Bio**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

LAMBERTS, R. *et al*. **Towards a Brazilian standard on thermal comfort**. Florianópolis: LabEEE, 2013.

LAMBERTS, R. *et al*. **A nova proposta de norma brasileira de Conforto Térmico**. Florianópolis: LabEEE, 2013.

MATOS, R. S. **Apostila de climatização**. Curitiba: UFPR, 2010.

NICOL, F.; HUMPHREYS, M. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. **Building and Environment**, v. 45, n. 1, p. 11–17, 2010.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Thermal Comfort as Part of a Self-Regulating System. **Building research & practice**, v. 1, n. 3, p. 174–179, 1973.

NICOL, J.; HUMPHREYS, M. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and buildings**, n. 1936, p. 45–59, 2002.

OLGYAY, V. **Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. 5a ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2008.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. De. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 1, p. 31–51, 2014.

PORTO FILHO, G. A. M. D. O diagrama e a matemática da arqutietura. **PARC - Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 1, n. 1, p. 1–11, 2006.

ROCHA, A. P. de A.; SOUZA, R. V. G. De. Atualização de Projeto Curricular e Inserção de Novas Práticas de Ensino de Tecnologia na Arquitetura E Urbanismo – Estudo de Caso da UFMG. In: X ENCONTRO NACIONAL E VI ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2009, Natal. **Anais**... Natal: ANTAC, 2009.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Avaliação de modelos preditivos de conforto térmico em escritórios no clima subtropical brasileiro. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 2, p. 91–107, 2019.

SHIN, S.-J. *et al*. **Diagrams**. 2014.

STEINFELD, K. et al. Situated Bioclimatic Information Design: a new approach to the processing and visualization of climate data. In: 30TH ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE 2010, New York. **Proceedings**... New York: Cooper Union, Pratt Institute, 2010.

SZOKOLAY, Steven.V**. Introduction to architectural science: the basis of sustainable design**. 2 ed.: Elsevier Ltd., 2008.

VELLEI, M. *et al*. The influence of relative humidity on adaptive thermal comfort. **Building and Environment**, v. 124, p. 171–185, 2017.

VERBEKE, S.; AUDENAERT, A. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. November 2016, p. 2300–2318, 2018.