

## A TEORIA DOS SISTEMAS NEBULOSOS NO TRATAMENTO DOS PARÂMETROS SUBJETIVOS DO PROJETO ARQUITETÔNICO – OS LIMITES DE CONFORTO

**HARRIS, Ana Lúcia Nogueira de Camargo**

Departamento de Arquitetura e Construção, Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP,  
CP-6021 CEP-13083-970, Campinas, SP, Brasil

Tel.: +55 19 3788-2398, fax +55 19 3788-2411

[luharris@fec.unicamp.br](mailto:luharris@fec.unicamp.br)

### RESUMO

A preocupação com o Conforto Ambiental é uma constante no processo de desenvolvimento do projeto arquitetônico. Porém, os resultados colhidos numa análise climática são tratados, em geral, com a utilização de técnicas determinísticas que desconsideram a característica subjetiva de muitos parâmetros climáticos, como é o caso dos grupos climáticos “quente” e “frio”, dos grupos de umidade “seco” e “úmido” e das avaliações nas pesquisas de opinião “ruim”, “bom”, “ótimo”. Estes parâmetros, quando trabalhados de forma “determinística” perdem necessariamente parte de suas qualidades, pois são sujeitos a um “enquadramento” dentro de parâmetros climáticos com contornos “bem definidos”. A umidade relativa média, por exemplo, pode ser caracterizada como “seca” quando for menor que 70% e “úmida” quando for maior ou igual a 70%. Com a utilização da Teoria dos Sistemas Nebulosos (TSN) é possível tratar matematicamente estes parâmetros de modo mais adequado, mais realístico, como demonstra a autora em sua tese de doutorado (HARRIS, 1999). Este artigo apresenta parte de uma pesquisa, no sentido de desenvolver uma metodologia para análise climática totalmente estruturada na TSN. Trata-se da remodelagem dos parâmetros climáticos que determinam os limites de conforto nos “Quadros de Mahoney” e dos procedimentos adotados para sua utilização.

### ABSTRACT

*Environmental Comfort has been a constant concern during the process of developing an architectural project. The results gathered in a climatic analysis, however, are dealt with by using deterministic techniques that do not take into account the subjective characteristics of many climate parameters as is the case of the climatic groups “warm” and “cold” as well as the humidity groups “dry” and “damp” and also the evaluation of opinion researches as “bad”, “good” and “excellent”. These parameters when manipulated in a “deterministic” manner invariably loose part of their qualities for they are liable to be framed within climatic parameters with well defined outlines. Relative average humidity, por example, can be characterised as “dry” when less than 70% and “damp” when over 70%. When employing the Fuzzy Systems Theory (FST), these parameters can be dealt with mathematically in a more adequate and realistic way as the author showed in her doctorate degree thesis (HARRIS. 1999). This paper presents part of a research which aims at a climatic analysis methodology based entirely on the FST. It is a question of remodelling of the climatic parameters that ascertain the comfort limits of the Mahoney Tables and the procedures adopted for its use.*

## 1. INTRODUÇÃO

Para que se chegue ao ante-projeto com uma idéia mais apropriada das características arquitetônicas é importante que, desde a fase de concepção, já se tenha em mãos determinadas informações climáticas mesmo que estas sejam mais genéricas.

Um dos métodos utilizados com esta finalidade foi desenvolvido por Mahoney (MASCARÓ, 1983 e KOENIGSBERGER e colaboradores, 1977), trata-se dos denominados “Quadros de Mahoney”.

Mahoney desenvolveu uma série simples de quadros para registrar e analisar informações climáticas com a finalidade de adequar as características construtivas da habitação às condicionantes climáticas naturais. Como resultado, são obtidas recomendações para o delineamento inicial do partido construtivo no projeto arquitetônico.

A partir de dados climáticos como a temperatura, a umidade, o vento e a pluviosidade desenvolve-se uma série de inferências por tabelas utilizando parâmetros climáticos bem definidos. Entre as tabelas utilizadas em sua metodologia está a destinada a determinar os limites de “Bem estar” e “Rigor Térmico”, para o dia e para a noite mais precisamente determinar os “Limites de Conforto” que posteriormente vão influenciar na classificação do clima em: “quente”, “confortável” ou “frio”.

O problema abordado refere-se ao modo como estes parâmetros climáticos são tratados matematicamente.

O clima apresenta características predominantemente “nebulosas”, cuja definição é imprecisa, como por exemplo: clima “seco”, “úmido”, “frio”, “quente”, “tropical”, “semi-árido”, “equatorial, etc. No tratamento matemático dado, os valores são enquadrados sob parâmetros bem definidos, como é o caso da definição dos grupos de umidade a partir da umidade relativa.

Na tabela de Limites de Conforto dos “Quadros de Mahoney” descrita por MASCARÓ (1983) e por KOENIGSBERGER e colaboradores (1977) os valores da umidade relativa média (HR) definem os grupos de umidade que variam de 1 a 4, porém, os limites entre um grupo e outro são definidos da seguinte forma:

|           |                   |
|-----------|-------------------|
| HR média: | < 30% = grupo 1   |
|           | 30-50% = grupo 2  |
|           | 50-70% = grupo 3  |
|           | 70-100% = grupo 4 |

Observa-se consequentemente que uma pequena oscilação em alguns valores climáticos de entrada pode mudar radicalmente sua classificação, como por exemplo uma umidade relativa, em outubro igual a 69 % e portanto classificada como grupo 3 e em novembro igual a 71%, que por 2% é classificada como grupo 4. Existe ainda, a dificuldade na classificação de um valor de umidade igual a 70%.

Com estas mudanças nas classificações, as recomendações dadas para o partido construtivo, pelo uso da metodologia, sugerem soluções arquitetônicas por vezes contraditórias, impossibilitando sua utilização para climas que apresentam características climáticas transitórias, como é o caso de Campinas descrito por HARRIS (1999) e HARRIS e colaboradores (2000) quando propõem uma remodelagem dos “Quadros de Mahoney” baseada na Teoria dos Sistemas Nebulosos (TSN).

Este artigo, que aborda o mesmo assunto dos artigos citados anteriormente, descreve porém com detalhes a remodelagem com a utilização da TSN no que se refere aos Limites de Conforto.

Os conceitos e métodos baseados na TSN são utilizados para representar modelos de raciocínio impreciso, fundamentais nas notáveis habilidades humanas de análise qualitativa e tomada de decisões com informações nebulosas. Além disso, possibilitam a modelagem de fenômenos determinísticos complexos, onde os dados são escassos ou onde uma modelagem clássica inviabiliza o estudo, como descreve CHENG apud HARRIS(1999).

Assim, como a Teoria Clássica dos Conjuntos (*Crisp Set Theory*) é o fundamento da Matemática Clássica, a Teoria dos Conjuntos Nebulosos (TCN) é o fundamento de toda a TSN e consiste numa extensão da Teoria Clássica de Conjuntos.

Um conjunto é denominado de ‘conjunto nebuloso’ (*fuzzy set*), quando seus limites não são definidos com exatidão.

Enquanto, na matemática clássica, Figura 1, os valores 0 e 1 definem a função característica do conjunto  $A$  para os elementos  $x$  do conjunto  $X$ , onde a  $\mu_A(x)$  tem característica binária:

$$\mu_A: A \rightarrow \{0,1\}, \quad \mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \notin X \\ 1, & x \in X \end{cases}, \quad A \subset X$$

Na matemática nebulosa, tem-se:

$$\mu_{\tilde{A}}: \tilde{A} \rightarrow [0,1] \quad \tilde{A} = \{ (x, \mu_{\tilde{A}}(x)) / x \in X \}$$

Pode-se observar que a função de pertinência é fundamental para a descrição de inferência nebulosa. Por isso, os elementos são sempre identificados pelo par (identidade do elemento e grau de pertinência).

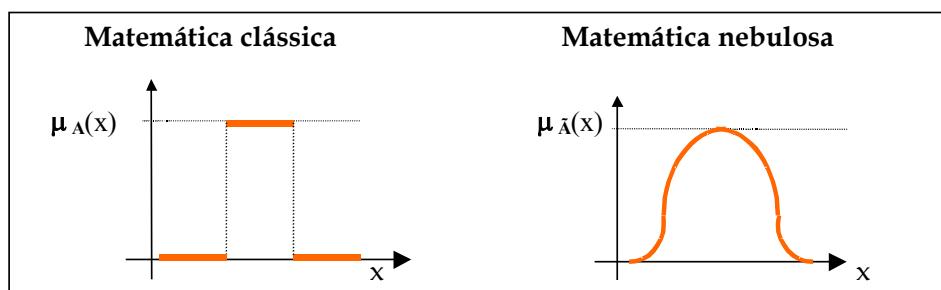


Fig. 1 – Índices de pertinência de conjuntos binários e nebulosos.

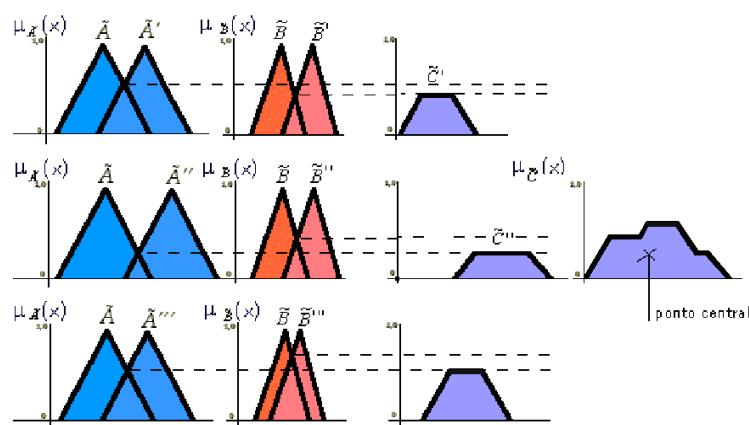
As funções de pertinência são determinadas por meio de processos específicos e justificados dentro de cada contexto em que são utilizadas. Em climatologia por exemplo, uma função de pertinência de uma relação nebulosa pode ser determinada por meio de uma classificação dos níveis de precipitação anuais.

Já, a denominação de Inferência Nebulosa (*fuzzy reasoning*) ou Inferência Aproximada (*approximate reasoning*) é dada para o processo de dedução lógica que leva em conta informações vagas e nebulosas.

Ao contrário de uma proposição bem definida da lógica binária como por exemplo: “A temperatura média do ambiente é de 18° C” ou “A umidade relativa média é de 40%”, a proposição proveniente do raciocínio humano intuitivo pode ser expressa como : “A temperatura do ambiente está baixa” ou “O clima está seco”.

Neste caso, o predicado nebuloso pode ser descrito por conjuntos nebulosos de Variáveis Lingüísticas.

A função de pertinência  $\mu_{\tilde{B}'}(v)$  do conjunto resultante  $\tilde{B}'$  é determinada com o corte do conjunto  $\tilde{B}$  pelo grau de conformidade  $a$ . Este processo é denominado de ‘corte de cabeça’, conforme mostra a Figura 2.



**Fig. 2 – Inferências sobre múltiplas proposições nebulosas (adaptado de CHENG, 1997).**

Para se obter uma resposta determinística é realizada uma “desfuzzyficação” do conjunto nebuloso do resultado final que pode ser feita encontrando-se o baricentro do conjunto”.

## 2. OS LIMITES DE CONFORTO NUMA ANÁLISE TRADICIONAL

Para a remodelagem dos limites de conforto proposta pela autora foi adaptada uma tabela simplificada definida pelo IPT (1986) conforme Tabela 1.

**Tab. 1 - Quadro II- Carta para os limites de conforto ( adaptada de IPT, 1986).**

| URM (%) | GU    | TM > 20 ° C |         | 15° ≤ TM ≤ 20° C |         | TM < 15 ° C |         | GH    |
|---------|-------|-------------|---------|------------------|---------|-------------|---------|-------|
|         |       | BEdia       | BEnoite | BEdia            | BEnoite | BEdia       | BEnoite |       |
| ≤ 70    | Seco  | Dia         | Noite   | Dia              | Noite   | Dia         | Noite   |       |
| > 70    | Úmido | 23-29       | 17-23   | 21-28            | 14-21   | 19-26       | 12-19   | Seco  |
|         |       | 22-27       | 17-22   | 20-25            | 14-20   | 18-24       | 12-18   | Úmido |

Onde,

URM = umidade relativa média mensal;

GU = grupo de umidade mensal;

TM = temperatura média mensal;

BEdia = bem estar pelo dia;

BEnoite = bem estar pela noite.

Uma vez inferidos a TM e a URM obtém-se a classificação pelo GU e a existência de algum Rigor Térmico (RT).

### 3. MODELAGEM NEBULOSA DA REGIÃO “CONFORTÁVEL”

Na remodelagem nebulosa é realizado um conjunto de procedimentos com inferências semelhante à metodologia tradicional, porém sob conjuntos nebulosos referentes aos parâmetros climáticos em questão.

Fazem parte da etapa da definição dos Limites de Conforto, Tabela 2, os seguintes parâmetros climáticos com seus respectivos conjuntos nebulosos definidos para representar as diferentes condições climáticas:

- TM - “baixa (B)”, “média (M)” e “alta (A)”;
- GU – “seco (S)” e “úmido(U)”;
- Conjuntos nebulosos de “Bem Estar (BEi)”, onde  $i = 1, \dots, 6$ ;
- Conjunto nebuloso da “Região de Conforto”;
- Conjunto nebuloso “Confortável (C)”;
- RT - “Frio (F)” ou “Quente (Q)”.

**Tab. 2 - Limites de conforto nebulosos.**

#### ANÁLISE DOS DADOS - C

| Conjuntos de Bem Estar | TM - Alta | TM - Média | TM - Baixa |
|------------------------|-----------|------------|------------|
| GU - Seco              | BE1       | BE2        | BE3        |
| GU - Úmido             | BE4       | BE5        | BE6        |

| <i>Limites de Conforto Nebulosos</i>   | <i>Operações</i>  |
|--|---|
| Conjuntos nebulosos de ‘BEi’           | definidos por inferências a partir da situação detectada dos parâmetros TM e GU.    |
| Conjunto nebuloso ‘Região de Conforto’ | definido com a união dos conjuntos de ‘BEi’ detectados.                             |
| Conjunto nebuloso ‘Confortável’        | construído a partir da ‘desfuzzyficação’ do conjunto nebuloso ‘Região de Conforto’. |

### 3.1 Os Conjuntos nebulosos de “Bem Estar”

Os conjuntos de Bem Estar  $\tilde{BE}_i$ ,  $i=1,..,6$ , mostrados na Tabela 1, foram construídos no formato de números nebulosos triangulares (descritos em HARRIS, 1999) com a finalidade de representarem a expressão ‘em torno de  $x^{\circ}\text{C}$ ’.

Para cada cruzamento de TMA e GU (seco, úmido) na Tabela 2 os valores dos intervalos de Bem Estar pelo dia e pela noite são transformados em conjuntos nebulosos de Bem Estar  $\tilde{BE}_i$  do seguinte modo:

O limite inferior de ‘Bem Estar’ pela noite é (a1), o limite superior de ‘Bem Estar’ pelo dia é (a3). O grau de pertinência nestes limites é 0.

A moda (a2) é o limite superior de ‘Bem Estar’ pela noite ou o limite inferior de ‘Bem Estar’ pelo dia. O seu grau de pertinência é 1.

### 3.2 Conjunto nebuloso que expressa a “Região de Conforto”

É determinado a partir de um processo de inferências das variáveis nebulosas de temperatura média (TM) e de grupo de umidade (GU), conforme as regras dadas na Tabela 1. De acordo com esta Tabela, para cada situação conjunta de TM e GU tem-se um conjunto específico de Bem Estar  $\tilde{BE}_i$ ,  $i=1,..,6$ . Cada conjunto  $\tilde{BE}_i$  é cortado pelo menor valor do grau de pertinência entre TM e GU correspondente  $\tilde{BE}_i'$ , gerando  $\tilde{BE}_i'$ . A união dos  $\tilde{BE}_i'$ ,  $i=1,..,6$  forma o resultado referente à ‘região de conforto’ desejado. (Figura 3).

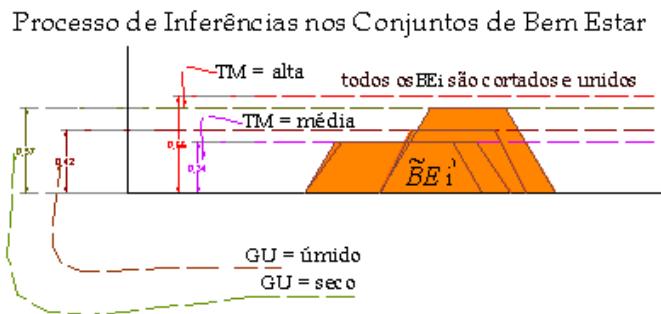
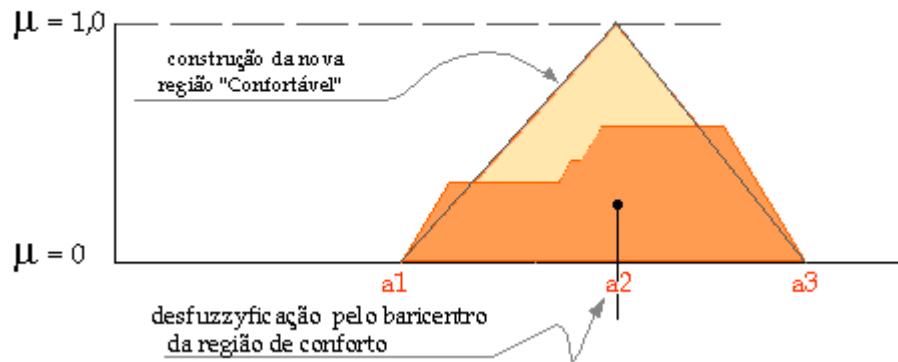


Figura 3 - Processo de inferências nos conjuntos de Bem Estar.

### 3.3 Conjunto nebuloso “Confortável”

Com base no conjunto ‘Região de Conforto’ obtida no passo anterior, define-se o conjunto ‘Confortável’ de forma aproximada. Para isso, normaliza-se a ‘Região de Conforto’. A normalização é feita a partir da “desfuzzyficação” da ‘Região de Conforto’. O baricentro, obtido da desfuzzyficação é usado como moda (a2) do conjunto ‘Confortável’, como ilustra a Figura 4. As extremidades (a<sub>1</sub> e a<sub>3</sub>) são as mesmas do conjunto nebuloso de ‘Região de Conforto’ com grau de pertinência 0 e moda (a<sub>2</sub>) é 1.

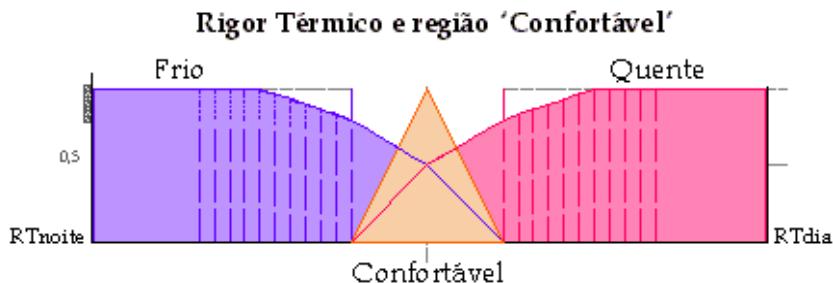
## Construção da região 'Confortável'



**Figura 4 - Construção da região 'Confortável'.**

### 3.4 Rigor Térmico

O gráfico para a análise do rigor térmico é composto de três conjuntos nebulosos que expressam o quanto o clima da região analisada é 'Frio', 'Confortável' ou 'Quente' durante o dia e durante a noite (Figura 5).



**Fig. 5 – Conjuntos nebulosos para o Rigor Térmico com o conjunto nebuloso 'Confortável'.**

Para a determinação dos graus de pertinência em relação ao frio, conforto, ou calor pelo dia são utilizados os dados de entrada referentes às máximas médias mensais da temperatura (TMmax) e para a noite, os dados referentes às mínimas médias mensais da temperatura (TMmin).

As curvas para os conjuntos de rigor térmico frio e quente foram delineadas de modo a se cruzarem na moda do conjunto nebuloso 'Confortável' com grau de pertinência de 0,5.

### 3.5 Os Limites de conforto na metodologia

Na metodologia proposta por HARRIS (1999), a partir dos dados climáticos de entrada são executados alguns procedimentos onde são definidos os graus de pertinência do GU e da TM, sob os respectivos conjuntos nebulosos.

Dando seqüência ao processo de inferências da TM e do GU sobre os conjuntos de  $\tilde{B}E_i$ ,  $i=1,..,6$ , conforme a Tabela 2, são feitos a modelagem do conjunto nebuloso “Confortável” e o diagnóstico sobre as solicitações térmicas para cada mês.

As solicitações térmicas são diagnosticadas no gráfico de rigor térmico estruturado com os limites de conforto detectados pelo conjunto nebuloso “Confortável”.

A determinação dos graus de pertinência se dá com a utilização das máximas e mínimas médias mensais da temperatura:

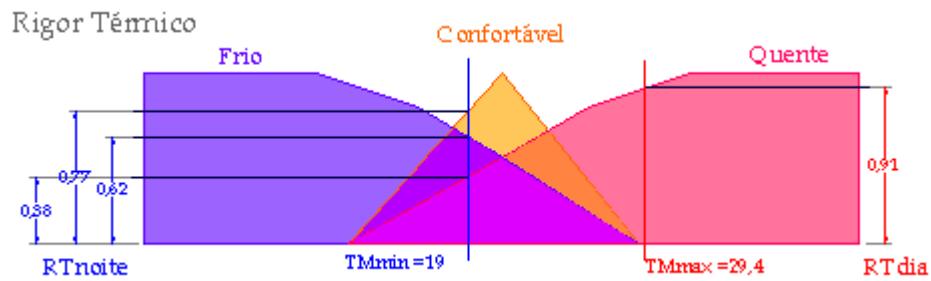


Fig. 6 – Exemplo de análise nebulosa pelo rigor térmico.

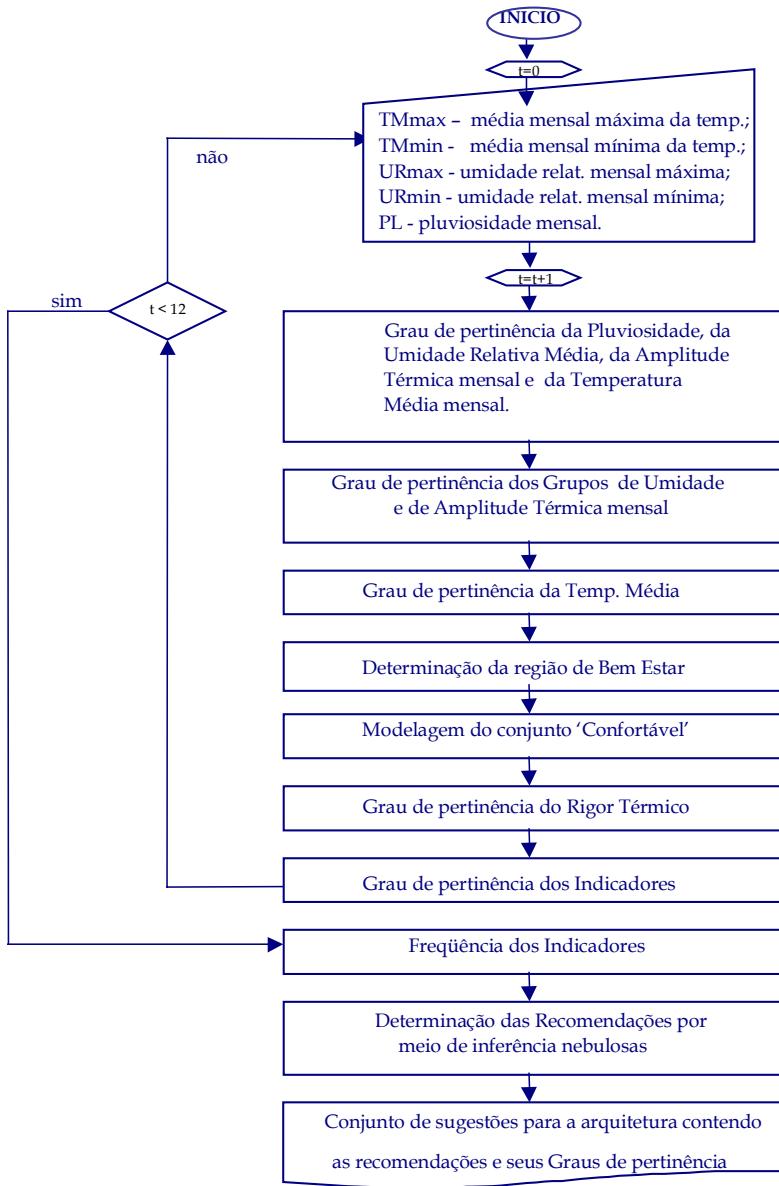
Assim, conforme a figura 6, para cada mês é determinada uma região de conforto própria e feita uma classificação com relação ao rigor térmico do clima, o rigor térmico pelo dia (RTdia) e o rigor térmico pela noite (RTnoite).

Prossegue-se então com os procedimentos até a saída das recomendações para a adoção de um partido arquitetônico, com seus respectivas graus de pertinência como descreve detalhadamente HARRIS (1999) e resumidamente HARRIS et al (2000).

#### 4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Utilizando a modelagem acima descrita e outros conceitos da TSN, HARRIS (1999) desenvolve uma metodologia que reformula os “Quadros de Mahoney” com base na modelagem de grupos climáticos e outras informações subjetivas ou imprecisas por meio da Teoria dos Sistemas Nebulosos (TSN) com o objetivo de ‘flexibilizar’ as interpretações de dados climáticos e adequar a metodologia para a análise de regiões que apresentam características climáticas de ‘transição’.

O fluxograma a seguir, Figura 7, aborda a seqüência de procedimentos da metodologia proposta:



**Fig. 7 – Fluxograma da metodologia proposta.**

Num estudo de caso esta metodologia foi aplicada para a cidade de Belém e seus resultados comparados com os resultados obtidos de uma análise tradicional dos “Quadros de Mahoney”<sup>1</sup>.

A Figura 8 apresenta a comparação das recomendações finais pelas duas análises e mostra que, ao invés dos valores discretos da metodologia tradicional, a metodologia proposta resulta em valores contínuos para a freqüência dos indicadores, o que é mais próximo da realidade.

<sup>1</sup> Nas duas análises foi utilizada a TM ao invés da TMA. Isto se deve ao fato de que pela metodologia proposta os parâmetros de análise são mensais. A troca de uma pela outra não interfere nos resultados uma vez que são definidas de modo equivalente.

| MAHONEY   |             | MAHONEY   |                           |
|-----------|-------------|-----------|---------------------------|
| SUGESTÕES | Tradicional | SUGESTÕES | Nebuloso<br>grau de pert. |
| Belém     |             |           |                           |
| R1        | 1           | R1        | 1,00                      |
| R2        |             | R2        |                           |
| R3        | 1           | R3        | 1,00                      |
| R4        |             | R4        |                           |
| R5        |             | R5        |                           |
| R6        | 1           | R6        | 1,00                      |
| R7        |             | R7        |                           |
| R8        |             | R8        |                           |
| R9        | 1           | R9        | 0,34                      |
| R10       |             | R10       |                           |
| R11       |             | R11       | 0,66                      |
| R12       | 1           | R12       | 1,00                      |
| R13       |             | R13       |                           |
| R14       | 1           | R14       | 1,00                      |
| R15       |             | R15       |                           |
| R16       |             | R16       |                           |
| R17       | 1           | R17       | 1,00                      |

**Fig. 8 – Recomendações sugeridas pelas duas metodologias para a cidade de Belém.**

Observa-se que ambas as metodologias, a tradicional e a proposta, sugerem as mesmas recomendações. Porém, pela metodologia proposta pôde-se notar que a recomendação 9 não é tão pertinente quanto as outras o que significa que a recomendação 11 também está presente.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo foi dedicado a apresentação de uma das etapas da metodologia desenvolvida em HARRIS (1999) referente a determinação dos Limites de Conforto baseados nos “Quadros de Mahoney” e remodelados com a utilização da Teoria dos Sistemas Nebulosos (TNS).

No estágio atual pode-se constatar a viabilidade deste tipo de abordagem que tem como característica principal possibilitar uma análise mais realística do clima devido a um tratamento mais adequado as características “nebulosas” dos parâmetros climáticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HARRIS, A.L.N.C. **Metodologias baseadas na Teoria dos Sistemas Nebulosos (Fuzzy Systems Theory) para o tratamento das informações subjetivas do Projeto Arquitetônico.** São Paulo, 1999. 160p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo<sup>2</sup>.

HARRIS, A.L.N.C.; CHENG, L.Y. & LABAKI, L.C. Remodelagem dos grupos climáticos dos “Quadros de Mahoney” utilizando a Teoria dos Sistemas Nebulosos. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU 2000 TECNOLOGIA & DESENVOLVIMENTO; CONGRESSO IBÉRICO, 10. e CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENERGIA SOLAR., 5., 2000, São Paulo: 2000 p.1132-1141.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, SÃO PAULO- Divisão de edificações. **Implantação de conjuntos habitacionais – recomendações para adequação climática e acústica.** São Paulo: IPT, 1986.

KOENIGSBERGER, O. H. et al. **Viviendas y edificios em zonas cálidas y tropicales.** Madri: Paraninfo, 1977.

MASCARÓ, L. R. **Luz, clima e arquitetura.** São Paulo: Nobel, 1983.

<sup>2</sup> <http://www.pcc.usp.br/Pesquisa/teses-dissertacoes.htm#Teses>