

## DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO FUZZY PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

Gabriela de Almeida Santos Moraes (IFSP/SJC) E-mail: [gabi.moraes3107@gmail.com](mailto:gabi.moraes3107@gmail.com)

Paulo Roberto Barbosa (IFSP/SJC) E-mail: [paulorb@ifsp.edu.br](mailto:paulorb@ifsp.edu.br)

Graziela Marchi Tiago (IFSP/SJC) E-mail: [graziela@ifsp.edu.br](mailto:graziela@ifsp.edu.br)

**Resumo:** Nos últimos anos ampliou-se a preocupação mundial com a qualidade do ar devido a associação entre poluentes atmosféricos e seus possíveis efeitos prejudiciais à saúde humana. No Brasil, o monitoramento do ar segue os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 03/1990 que contempla os poluentes: partículas inaláveis ( $MP_{10}$ ), ozônio ( $O_3$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ) e dióxido de enxofre ( $SO_2$ ). No Estado de São Paulo vigora o Decreto Estadual nº 59.113/2013 que contempla além desses, o poluente partículas inaláveis finas ( $MP_{2.5}$ ). A qualidade do ar é medida por meio de uma ferramenta matemática, o Índice de Qualidade do Ar (IQar) onde, para efeitos de divulgação, considera-se a qualidade do ar de uma determinada estação pelo pior resultado de poluente atingido. Esse trabalho tem como objetivo aprimorar um modelo *fuzzy* que possui como diferencial a utilização de todos os poluentes estabelecidos para calcular o índice, possuindo assim uma maior sensibilidade na classificação da qualidade do ar quando comparado ao método atual. Estas modificações realizadas no modelo atendem a legislação vigente, acrescentando o poluente partículas inaláveis finas ( $MP_{2.5}$ ) e a mudança da classificação que se tornou mais rígida que a anterior.

**Palavras-chave:** Qualidade do Ar, Lógica *Fuzzy*, Poluição, Saúde.

## DEVELOPMENT OF A FUZZY MODEL FOR AIR QUALITY MONITORING

**Abstract:** In recent years the worldwide concern about air quality has increased due to the association between atmospheric pollutants and their possible harmful effects on human health. In Brazil, air monitoring follows the standards established by CONAMA Resolution No. 03/1990, which includes pollutants: inhalable particles ( $MP_{10}$ ), ozone ( $O_3$ ), carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide ( $NO_2$ ) and sulfur ( $SO_2$ ). In the State of São Paulo, State Decree No. 59.113 / 2013 applies in addition to these, the pollutant inhalable fine particles ( $MP_{2.5}$ ). Air quality is measured by means of a mathematical tool, the Air Quality Index (IQar), where the air quality of a given station is considered due to the worst pollutant result achieved. This work aims to improve a fuzzy model that has as differential the use of all the pollutants established to calculate the index, thus having a greater sensitivity in the air quality classification when compared to the current method. These modifications carried out in the model meet the current legislation, adding the pollutant fine inhalable particles ( $MP_{2.5}$ ) and the change of classification that has become more rigid than the previous one.

**Keywords:** Air Quality, Fuzzy Logic, Pollution, Health

### 1. Introdução

Nos últimos anos com a crescente urbanização vem sendo registrado um significativo aumento nas concentrações de substâncias nocivas no ambiente atmosférico, o que ampliou a preocupação mundial com a qualidade do ar devido a associação entre os poluentes e seus possíveis efeitos prejudiciais à saúde humana. Estudos têm relacionado os poluentes atmosféricos ao aparecimento de doenças respiratórias (BORJA et al., 1997), doenças cardiovasculares (BALLESTER et al., 1996) e com o aumento no índice de mortalidade (ANDERSON et al., 1996). Com isso, torna-se necessário o monitoramento da qualidade do ar para estabelecer medidas que auxiliem o governo a tomar decisões mediante episódios agudos de poluição do ar, o que colocaria em risco a

saúde da população.

Os padrões de qualidade do ar nacionais foram estabelecidos pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA) e aprovados pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução CONAMA nº 003/1990. No Estado de São Paulo, vigora o Decreto Estadual nº 59.113/2013 baseando-se nas novas diretrizes estabelecidas pela Organização Mundial da Saúde (OMS) a partir de 2005 (CETESB, 2018). Atualmente, o monitoramento do ar nesse Estado contempla os seguintes poluentes: partículas inaláveis ( $MP_{10}$ ), partículas inaláveis finas ( $MP_{2,5}$ ), ozônio ( $O_3$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), fumaça e partículas totais em suspensão, sendo estes últimos dois parâmetros auxiliares a serem utilizados apenas em situações específicas, a critério da CETESB.

Para realizar esse monitoramento utiliza-se uma ferramenta matemática, o Índice de Qualidade do Ar (IQar), onde para cada poluente medido calcula-se um índice e obtêm-se uma classificação da condição do ar como: boa, moderada, ruim, muito ruim e péssima. Para divulgar à população, utiliza-se o índice mais elevado, ou seja, considera-se a qualidade do ar de uma determinada estação pelo pior resultado de poluente atingido. Como alternativa a ferramenta matemática para cálculo do índice dos poluentes medidos, pode-se utilizar a Lógica *Fuzzy* para o monitoramento da qualidade do ar, como pode ser visto nos trabalhos de Silvert (2000), Engin, Demir e Hiz (2004) e Khan e Sadiq (2005). Além desses trabalhos relacionados a área da saúde, utilizam a Lógica *Fuzzy* por exemplo, como método para avaliar efeitos da poluição do ar em crianças, estimando a associação entre os poluentes e o número de internações da região estudada (DAVIDA et al., 2017).

O objetivo deste trabalho foi o aperfeiçoamento de um sistema que utiliza a Lógica *Fuzzy* para monitorar a qualidade do ar no Estado de São Paulo. O sistema que foi aperfeiçoado neste trabalho foi publicado no International Congress of Mechanical Engineering em 2011 (TIAGO et al., 2011). Seu grande diferencial é a possibilidade de classificar a qualidade do ar sem necessidade de uma ferramenta matemática e a utilização de todos os poluentes envolvidos para obter o índice (TIAGO et al., 2011). Como melhoria, foram feitas mudanças para que o modelo estivesse de acordo com o Decreto Estadual nº 59.113/2013, visto que no período de divulgação do estudo publicado estava em vigor a Resolução nacional nº 003/1990 também para o Estado de São Paulo (CETESB, 2018). Portanto, seguindo a nova lei, acrescentou-se o poluente partículas inaláveis finas ( $MP_{2,5}$ ), a classificação se tornou mais rígida que a anterior e o programa sofreu alterações em suas regras, entradas e saídas e nas funções de pertinência. Dessa maneira, o sistema *fuzzy* se mostrou eficaz e coerente quando comparado aos índices fornecidos pela Cetesb, demonstrando, assim como no estudo anterior, a viabilidade da utilização da lógica *fuzzy* para tal tarefa.

## 2. Metodologia

O termo “*fuzzy*” foi pela primeira vez citado por Dr. Lotfi Zadeh considerado o pai da lógica *fuzzy*, em um jornal sobre engenharia chamado “Proceedings of the IRE” em 1962 (ZADEH, 1962).

Um paradoxo que pode nos ajudar a entender a lógica *fuzzy* é o “Paradoxo do Careca”, que pode ser enunciado da seguinte forma: Você diria que um homem que tem na cabeça um único fio de cabelo é careca? E se ele tiver dois fios? E três? E quatro? Afinal quando você parará de chamá-lo de careca? (KNEALE e KNEALE, 1962).

Como analisar este paradoxo? Como utilizar a lógica clássica nesta situação onde os elementos de fronteira de dois conjuntos possuem uma descrição instável que pode oscilar dependendo do observador? É neste contexto de imprecisão e ambiguidade que a lógica *fuzzy* foi desenvolvida.

Um conjunto *fuzzy* pode ser visto como uma generalização dos conjuntos clássicos. Ele pode ser entendido como um conjunto que permite que elementos tenham graus de pertinência a este conjunto. Além da função de pertinência, um conjunto *fuzzy* deve ser associado a um conceito linguístico, como por exemplo, “Excelente”. Esta associação é utilizada para facilitar a construção das regras pelo especialista, sendo assim compreensível. Adotando uma base de conhecimento (regras de inferência) que relacionam estas funções de pertinência constrói-se o mecanismo de inferência (YEN, 1999). Os conjuntos *fuzzy*, as funções de pertinência e as regras de inferência são obtidas a partir do problema proposto, sendo necessário um conhecimento parcial do “especialista” para a modelagem do sistema.

A estrutura de um sistema baseado em lógica *fuzzy* possui quatro etapas: fuzzificação, base de regras, inferência e defuzzificação. Na teoria *fuzzy* valores intermediários, chamados de grau de pertinência, são permitidos e a produção destas funções que definem graus de pertinência é chamada de “fuzzificação”. A fuzzificação, então, é o processo no qual são definidas as variáveis de entrada e saída, para as quais são atribuídos termos linguísticos que descrevem seu estado. É nessa etapa do processo que são construídas as funções de pertinência (TIAGO et al., 2011).

Todos os conjuntos *fuzzy* representando as variáveis relacionadas por funções de pertinência são chamadas de base de conhecimento. Um conjunto de regras de inferência é adotado para manipular a base de conhecimento. O método mais utilizado para representar o conhecimento humano é através de expressões de linguagem natural como: SE (antecedente) ENTÃO (consequente) (TIAGO et al., 2011).

A base de conhecimento tem informações incertas, porém significativas para a modelagem do sistema. Esta incerteza é completamente resolvida com a entrada e saída dos conjuntos *fuzzy* e com a estratégia de manipulação da base de conhecimento pré-definidas (TIAGO et al., 2011).

Em seguida é definido o modelo de inferência utilizado. Os tipos de modelos de sistemas de inferência *fuzzy* são diferenciados pela habilidade em representar diferentes tipos de informação, ou seja, na forma que se representa a base de regras. Os dois modelos mais conhecidos na literatura da área são: Mamdani e Takagi-Sugeno (SUGENO, 1985; MAMDANI, 1975 e 1976). Após definidas as regras e o método utilizado, ocorre a inferência.

Neste estudo foi utilizado o *software* Matlab através de seu *toolbox fuzzy*. O MatLab (Matrix Laboratory) é um *software* de alta performance, criado no fim dos anos 70 por Cleve B. Moler, com interface amigável, voltado especialmente para o cálculo numérico (MATHWORKS, 2013). A potencialidade desse *software* está, principalmente, no seu conjunto de *toolboxes*, que são funções externas e adaptáveis para diferentes aplicações. O *toolbox fuzzy* é comumente utilizado para descrição e modelagem de sistemas baseados em lógica *fuzzy*.

### 3. Modelo Fuzzy Proposto

O modelo *fuzzy* utilizado nesse estudo apresenta seis variáveis de entradas, sendo estas: partículas inaláveis ( $MP_{10}$ ), partículas inaláveis finas ( $MP_{2,5}$ ), ozônio ( $O_3$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ) e dióxido de enxofre ( $SO_2$ ). Cada variável

de entrada possui cinco funções de pertinência: B (boa), M (moderada), (R) ruim, (MR) muito ruim e (P) péssima, sendo todas do tipo trapezoidais e com suas amplitudes obtidas a partir do conhecimento do especialista, segundo os critérios de classificação da Cetesb. Na figura 1 são apresentadas as funções de pertinência para a variável de entrada MP<sub>2,5</sub>.

O modelo conta com apenas uma variável de saída que é a Qualidade do ar. Essa variável de saída também é composta por cinco funções de pertinência trapezoidais com os mesmos rótulos das variáveis de entrada (Fig. 2).

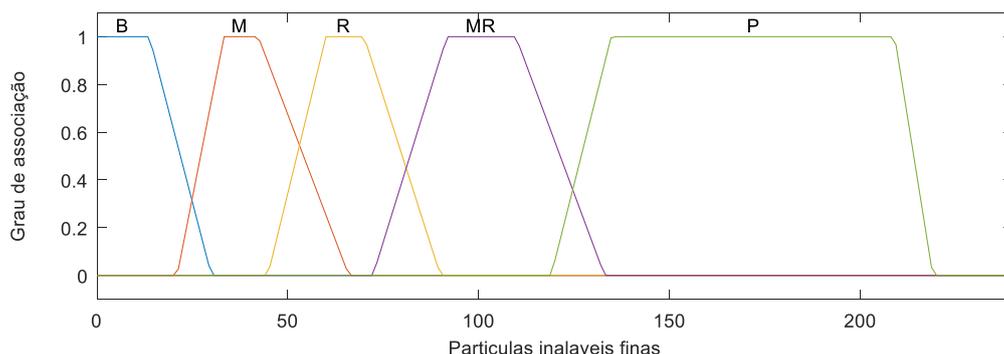


Figura 1 – Funções de pertinência para a variável de entrada Partículas Inaláveis Finas (MP<sub>2,5</sub>)

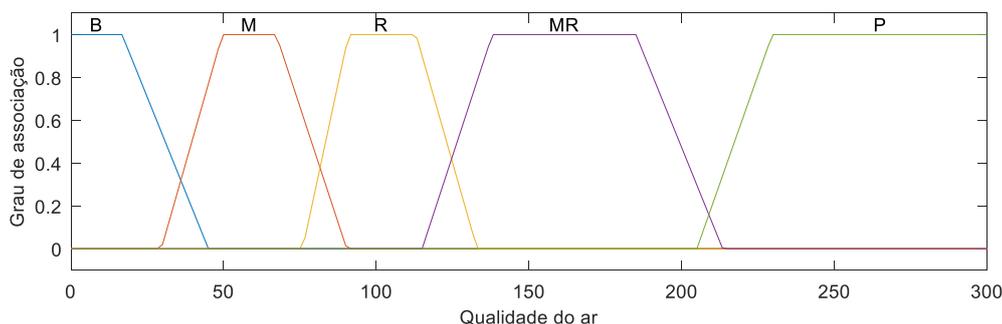


Figura 2 – Funções de pertinência para a variável de saída Qualidade do ar

A base de regras foi composta por apenas 5 regras. Todas as regras foram projetadas com o mesmo peso e a partir de decisões simples, como por exemplo, se todas as variáveis de entrada foram consideradas boas, então a qualidade do ar deve ser classificada como boa. O modelo desenvolvido utilizou o cálculo do centróide como método de defuzzificação e o método de inferência Mamdani.

#### 4. Resultados e discussões

Durante a pesquisa foram monitoradas diariamente 22 localidades situadas em diferentes regiões do Estado de São Paulo, como por exemplo o Vale do Paraíba, o litoral, a região metropolitana de São Paulo e Capital a partir dos dados obtidos no sítio da CETESB durante o período de 08/05/18 a 05/07/18. Foram selecionados dados em dias aleatórios para serem utilizados no modelo desenvolvido.

Na Tabela 1, apresentam-se os índices e suas respectivas classificações segundo a legislação vigente. Vários testes foram realizados e constatou-se que o sistema *fuzzy*, em

quase todos os casos, mantém a mesma classificação do cálculo clássico e alguns testes onde o índice *fuzzy* e o índice clássico são comparados estão apresentados na Tabela 2. Na Tabela 2 não apresenta-se resultados para classificação péssima, pois não foram encontrados, no período monitorado, valores para este índice no sítio da Cetesb.

Tabela 1 – Classificação da qualidade do ar

<b>Índice</b>	[0,40]	[41,80]	[81,120]	[121,200]	[200, +∞)
<b>Classificação</b>	Boa	Moderada	Ruim	Muito ruim	Péssima

Fonte: Os autores

Tabela 2 – Resultados para o índice de qualidade do ar nos sistemas clássico e *fuzzy*

Localidade	SO2 µg/ m3	MP10 µg/ m3	NO2 µg/ m3	C p	O µg/m 3	MP2,5 µg/ m3	Índice Clássico	Classificação Clássica	Índice Fuzzy	Classificação Fuzzy
Guaratinguetá	0	40	1	0	45	0	32	Boa	17,95	Boa
São Jose dos Campos	0	19	31	0	15	0	15	Boa	15,69	Boa
São José dos Campos Jd. Satélite	0	23	53	0	44	11	18	Boa	15,69	Boa
Taubaté	1	29	9	0	37	16	25	Boa	16,36	Boa
Campinas Taquaral	0	37	47	0	142	0	96	Ruim	103,39	Ruim
Campinas Vale União	0	0	109	0	80	44	70	Moderada	59,34	Moderada
Cidade Universitária USP	0	0	42	0	0	23	36	Boa	32,83	Boa
Cubatão Centro	40	16	29	0	14	0	79	Moderada	81,45	Ruim
Cubatão Vila Parisi	44	175	45	0	0	0	140	Muito ruim	139,63	Muito ruim
Cubatão Vale do Mogi	11	71	69	0	37	0	57	Moderada	59,32	Moderada
Guarulhos Paço Municipal	0	53	47	0	70	24	43	Moderada	46,69	Moderada
Guarulhos Pimentas	2	143	46	0	56	95	152	Muito ruim	142,60	Muito ruim
Ibirapuera	0	0	28	0	18	14	22	Boa	15,76	Boa
Marginal Tietê	4	64	57	0	0	55	88	Ruim	81,75	Ruim
Parelheiros	0	81	47	0	11	32	65	Moderada	59,36	Moderada
Parque Dom Pedro II	0	18	41	0	25	12	19	Boa	15,69	Boa
Pico do Jaraguá	0	0	0	0	67	13	27	Boa	15,69	Boa
Santos	0	14	51	0	22	0	11	Boa	15,69	Boa
Santos Ponta da Praia	42	29	64	0	3	20	81	Ruim	103,39	Ruim

São Caetano	2	43	45	0	40	30	48	Moderada	59,44	Moderada
Ribeirão Preto	0	64	11	0	19	21	52	Moderada	59,49	Moderada
Osasco	3	40	71	1	0	24	38	Boa	38,40	Boa

Fonte: Os autores

Observa-se pela tabela 2 que o modelo *fuzzy* proposto praticamente forneceu os mesmos resultados de classificação quando comparado ao cálculo clássico, com exceção da cidade de Cubatão (estação do Centro) onde o índice clássico obteve um valor de 79 e o índice *fuzzy* um valor de 81,45, mudando a classificação de moderada para ruim, porém com índice muito próximo. As pequenas diferenças encontradas nesse teste e em outros, podem ser justificadas porque o método clássico calcula o índice para cada poluente separadamente e divulga o pior entre eles. Por outro lado, o modelo *fuzzy* considera todo poluente para cálculo e, conseqüentemente, para classificação.

Seu grande diferencial são as vantagens que ele apresenta quando comparado ao modelo clássico, que além da contribuição de todos os poluentes para gerar o índice de qualidade do ar, diferentemente do modelo clássico que utiliza apenas um poluente (o pior valor) para o cálculo do índice, também a fácil implementação e interpretação ao usuário e a utilização de apenas 5 regras para estimar o índice.

Desta maneira, pode-se dizer que esse modelo propõe uma classificação mais sensível e completa, uma vez que observa a contribuição de todos os poluentes para estabelecer um índice. O sistema *fuzzy* se mostrou eficaz e coerente quando comparado aos índices fornecidos pela Cetesb, tornando válida a utilização da lógica *fuzzy* para tal tarefa.

## 5. Conclusão

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo *fuzzy* usando o *software Matlab* como uma alternativa para monitorar a qualidade do ar no Estado de São Paulo sem a necessidade de uma ferramenta matemática. No modelo elaborado, que tem como entradas os poluentes: partículas inaláveis (MP<sub>10</sub>), partículas inaláveis finas (MP<sub>2,5</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e como saída a Qualidade do Ar, foram utilizados os dados fornecidos pela Cetesb para realização de testes. O objetivo principal foi utilizar todos os poluentes citados para estimar um novo índice para a qualidade do ar, comparando-o com os índices obtidos no modelo clássico e verificando se haveriam mudanças quanto a sua classificação.

O grande diferencial é a contribuição de todos os poluentes para gerar o índice de qualidade do ar, diferentemente do modelo clássico que utiliza apenas um poluente (o pior valor) para o cálculo do índice. O modelo *fuzzy* desenvolvido, em geral, reproduziu a classificação do modelo clássico, apresentando, no entanto, pequenas variações nos índices que representam uma maior sensibilidade na determinação dos valores, uma vez que utiliza as informações de todos os poluentes.

Dessa maneira, o método proposto sugere uma nova possibilidade para classificar o índice da qualidade do ar com um modelo capaz de reproduzir, na maioria dos casos testados, o índice estabelecido pelo cálculo clássico. O fato de utilizar todos os poluentes na entrada e possuir uma grande flexibilidade, uma vez que é possível atribuir pesos diferentes a uma determinada regra, amplia significativamente a sensibilidade do modelo para a classificação da qualidade do ar e torna a metodologia proposta muito

aplicável a quaisquer novos padrões.

### Referências

- ANDERSON, H.R. & PONCE, L.A. & BLAND, J.M. & BOWER, J.S. *Air pollution and daily mortality in London: 1987-92*. British Medical Journal, p. 665-669, 1996.
- BALLESTER, F. & CORELLA, D. & PEREZ, H.S. & HERVAS, A. *Air pollution and mortality in Valencia, Spain: a study using the APHEA methodology*. Journal of Epidemiology and Community Health, p. 527-533, 1996.
- BORJA, A.H. & LOOMIS, D.P. & BANGDIWALA, S.I. & SHY, C.M. *Ozone, suspended particulates, and daily mortality in Mexico City*. American Journal of Epidemiology, p. 258-268, 1997.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2018. <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso: julho de 2018.
- KHAN, F.I. & SADIQ, R. *Risk-based prioritization of air pollution monitoring using fuzzy synthetic evaluation technique*. Environmental Monitoring and Assessment, p. 261-283, 2005.
- SILVERT, W. *Fuzzy indices of environmental conditions*. Ecological Modelling, p. 111-119, 2000.
- ENGIN, G.O. & DEMIR, I. & HIZ, H. *Assessment of urban air quality in Istanbul using fuzzy synthetic evaluation*. Atmospheric Environment, p. 3809-3815, 2004.
- DAVIDA, G.S. & RIZOLA, P.M.S.R. & NASCIMENTO, L.F.C. *Modelos computacionais Fuzzy para avaliar efeitos da poluição do ar em crianças*. Revista Paulista de Pediatria (online), Vol. 36, n.1, p.10-16, 2017.
- YEN, J. *Fuzzy Logic: A Modern Perspective*. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol.11, n. 1, p. 153-165, 1999.
- SUGENO, M. *Industrial applications of fuzzy control*. Elsevier Science Pub. Co., 1985.
- MAMDANI, E.H. & ASSILIAN, S. *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*. International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 7, n. 1, p. 1-13, 1975.
- MAMDANI, E.H. *Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers*. International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 8, n. 6, p. 669-678, 1976.
- TIAGO, G.M. & BUENO, E.I. & BARBOSA, P.R. *Air quality monitoring using fuzzy logic*. In: 21st International Congress of Mechanical Engineering, Natal, 2011.
- MATHWORKS. About MathWorks – Founders – Cleve Moler. The MathWorks, Inc., 1994 – 2013. Disponível em <<http://www.mathworks.com/company/aboutus/founders/clevemoler.html>>. Acesso em: 08 out. 2013.
- KNEALE, W. & KNEALE, M. *The development of logic*. Londres: Oxford University Press, 1962.
- ZADEH, L.A. *From Circuit Theory to System Theory*. Proceedings of the IRE, Vol. 50, n. 5, p. 856-865, 1962.