

PLATAFORMAS PARA DESENVOLVIMENTO DE REGULADORES NEBULOSOS: UMA REVISÃO DE LITERATURA. FUZZY REGULATOR DEVELOPMENT PLATFORMS: A REVIEW.

André Tiago Santos.

¹ Mestre Profissional em Automação e Controle de Processos pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP (2017). Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do IFSP Docente EBTT – Instituto Federal de São Paulo-IFSP - RGT. Eletroeletrônica - Mecatrônica. – Campus Registro. Rua Pedro Vicente, 625 - Canindé - São Paulo (SP). CEP: 01109-010.

andre.eng.autom@gmail.com

Resumo: Este estudo tem como objetivo discutir o emprego das ferramentas de Controle não convencionais em sistemas de automação, empregando-se a ferramenta de Inteligência Artificial, do campo linguístico, denominada Lógica Difusa (*Fuzzy*). Trata-se de uma revisão bibliográfica baseada na literatura especializada através de consulta a artigos científicos selecionados através de busca no banco de dados do Scielo, da IEEE Xplore e nos bancos de teses e dissertações. Os estudos encontrados sobre o emprego de lógica e controle nebuloso (difuso) apontaram que este modelo de controle é bem difundido e diverso em aplicações, bem como em ferramentas de desenvolvimento computacional. Ainda é necessário mais estudo sobre o emprego dessa modalidade de Controle não convencional de Sistemas, já que os métodos matemáticos resolvem bem os sistemas lineares, que são em menor quantidade, e, ainda, se empregar as ferramentas de desenvolvimento com a característica de ser do tipo código aberto.

Palavras-chave: Automação, Inteligência Artificial, Controle de Sistemas, Lógica *Fuzzy*, Revisão bibliográfica.

Abstract: *This study aims to discuss using non-conventional Control tools in automation systems, to use an Artificial Intelligence tool, from the linguistic field, called Fuzzy Logic. This is a specific review on literature, available through the consultation of selected scientific articles through research in the database of Scielo, IEEE Xplore and in thesis and dissertation repositories. The studies found on the use of logic and fuzzy control pointed out that this control model is quite different and diverse in its applications, as well as in computational development tools. Further studies are still needed on the use of this form of unconventional control of systems, since mathematical methods solve linear systems well, which are in lesser quantity, and also use development tools with open-source type service resources.*

Keywords: Automation, Artificial Intelligence, Control Systems, Fuzzy Logic, Literature Review.

1 – Introdução.

Grande parte dos modelos dinâmicos a ser regulados em sistemas de controle são não lineares ou possuem alguma não linearidade inerente. Neste caso, técnicas de inteligência artificial, como a de controle por meio de linguagens e percepções humanas, decerto, estão em pleno emprego para que se resolva este problema de controle. Gomide e Gudwin (1994), basicamente, relatam sobre esta técnica.

Entretanto, todas estas técnicas (convencionais de controle) não são capazes de resolver problemas reais cuja modelagem matemática é impraticável. Por exemplo, em diversas situações um volume considerável de informações essenciais só é conhecido a priori de forma qualitativa. Do mesmo modo, critérios de desempenho só estão disponíveis em termos linguísticos. Este panorama leva a imprecisões e falta de exatidão que inviabilizam a maioria das teorias utilizadas até agora. A modelagem e o controle fuzzy (controle difuso) são técnicas para se manusear informações qualitativas de uma maneira rigorosa. Tais técnicas consideram o modo como a falta de exatidão e a incerteza são descritas e, fazendo isso, tornam-se suficientemente poderosas para manipular de maneira conveniente o conhecimento (GOMIDE; GUDWIN, 1994, p. 97-98).

No sentido de se consolidar estudos envolvendo metodologias baseadas em lógica difusa, é de considerável relevância pesquisar os trabalhos realizados e os estudos experimentais concluídos, com resultados convergentes aos objetivos, bem como estabelecer o relacionamento entre os programas de computação usados em aplicações de Sistemas para Automação e Controle.

Este trabalho, portanto, tem como objetivo realizar uma revisão de literatura sobre a correlação entre trabalhos experimentais e/ou de revisão realizados entre Sistemas de Automação e Controle e suas implementações com controle nebuloso, principalmente, no que tange ao emprego de ferramentas de desenvolvimento computacional para este fim.

A presente revisão está organizada da seguinte maneira: o capítulo 2 (dois) mostra os aspectos metodológicos da pesquisa e da revisão. O terceiro, os fundamentos teóricos que permeiam os conceitos, desenvolvimentos e modos de implementação do controle baseado em lógica difusa. A seção quatro retrata as pesquisas realizadas na revisão e quais plataformas foram empregadas nos desenvolvimentos. O último capítulo (nº 5) conclui tais estudos e sugere um panorama para futuras pesquisas.

2 – Metodologia.

O presente artigo foi elaborado a partir de uma revisão bibliográfica nas bases de dados: IEEE Xplore (Explorador de publicações na revista Internacional de Engenharia Eletroeletrônica), SciELO e nas bases que contemplam artigos de congressos e/ou publicações conclusivas de teses e/ou dissertações. As palavras-chave empregadas foram “Lógica difusa”, “Lógica nebulosa”, “Lógica fuzzy” e “Controle fuzzy” e seus correspondentes em inglês, bem como a combinação lógica, com operação “AND” (“e”, em inglês) com as palavras “MATLAB”, “SCILAB”, “OCTAVE”, principais plataformas em uso descritas por Arruda *et al.* (2013). Definiram-se como critérios de exclusão artigos publicados antes do ano 2000 – exceto o que trata do contexto histórico - e que não se demonstrassem artigos utilizados em aplicações destinadas a automação e controle. A pesquisa dos artigos foi realizada entre maio e junho de 2020.

A busca nos bancos de dados foi realizada utilizando as terminologias e notações de Engenharia de Automação, Controle e Automação, e de Sistemas em tópicos multidisciplinares comuns em português e inglês. As palavras-chave utilizadas na busca foram Controle difuso, Controle nebuloso e Controle *fuzzy*.

Os critérios de inclusão para os estudos encontrados foram à abordagem do emprego de Automação em processos dinâmicos, de ensaio ou não, com base na metodologia implementada. Foram excluídos estudos que relatavam o emprego de outras modalidades de implementação, que não os baseados nessa lógica.

A seguir, buscou-se estudar e compreender os principais modelos e modos de aplicação empregados nos estudos encontrados, de acordo com os parâmetros estabelecidos e as plataformas computacionais para a utilização de lógica e controle difuso, bem como o mecanismo de configuração pelos quais tal lógica atua na planta produtiva industrial e a diversidade de tais plataformas computacionais (*softwares*).

3 – Fundamentação Teórica.

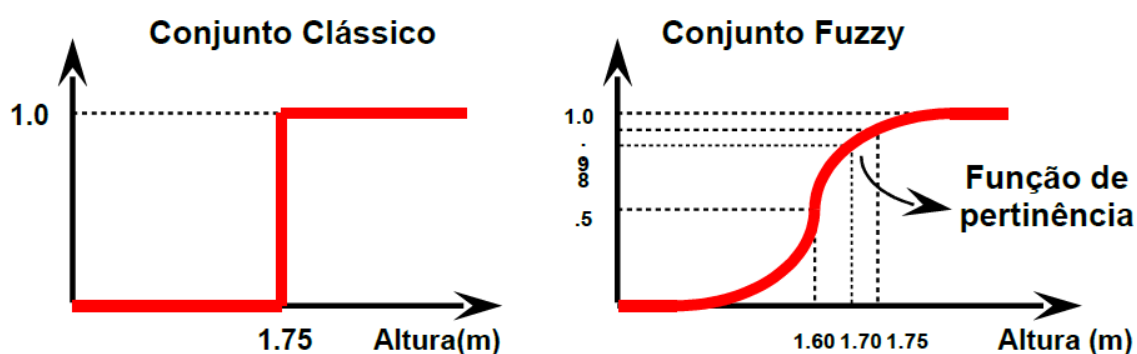
Nesta seção, apresenta-se os fundamentos teóricos da lógica nebulosa, bem como a estrutura dos controladores difusos e as principais aplicações deste método não convencional de controle de sistemas de automação.

Na teoria clássica dos conjuntos, um determinado elemento pode ser avaliado em dois estados, ou seja, pertence ou não a determinado conjunto, como, por exemplo, a avaliação de altura das pessoas altas, assumindo valores 0 ou 1, obedecendo a equação 1, como segue:

$$F(x) = 1, \text{ se é, somente se, } x \in A; 0, \text{ se é, somente se, } x \notin A. \quad \text{Equação 1.}$$

Enquanto na teoria dos conjuntos *fuzzy*, há um grau de pertinência de cada elemento assume um valor dentro do intervalo definido, entre 0 (zero) e 1 (um). A figura 1 mostra a distinção entre tais modelos de lógica.

Figura 1 – A diferença entre os conjuntos lógicos (GOMES, 2013).



A função de pertinência representa que todas as características fundamentais das ações teóricas e gráficas de sistemas *fuzzy*, ou seja, é definida como uma função numérica gráfica ou tabulada, desde que os valores tenham pertinência difusa para valores discretos de uma variável (GOMES, 2013). Os formatos de funções mais encontrados são: triângulos, trapezoidal, gaussiana e sino generalizada.

Os valores de uma variável são nome de conjuntos *fuzzy*, e estes valores são pertencentes ao conjunto nebuloso, representados por funções de pertinência. Como todo conjunto, estão submetidos aos mesmos regramentos de operações com conjuntos (União, Interseção, complementar etc.).

O raciocínio *fuzzy* é dividido em três etapas que são a difusificação (ou fuzzificação), a inferência e a dedifusificação (ou defuzzificação). Por meio destas etapas, permite-se a resolução de problemas, em especial, ao sistema de controle. Um exemplo de aplicação é o desenvolvimento de um programa responsável pelo controle de obesidade adulta usando a lógica difusa, cuja sua finalidade é retornar com o peso ideal ou saudável, de acordo com os dados fornecidos pelo usuário.

A primeira etapa do raciocínio difuso é a difusificação, que é responsável pelo mapeamento do domínio real para o domínio *fuzzy*, ou seja, é uma espécie de pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada, assim diminuindo gradativamente a quantidade de número a ser processado (SHAW, 2007).

A Inferência tem a função de simular o raciocínio humano diante da tomada de decisão baseado em conceitos difusos para executar ações de controle, empregando implicações *fuzzy* e regras de inferência nebulosas, de acordo com as proposições dos antecedentes e consequentes, resultando numa região resultante.

Na dedifusificação, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras nebulosas será traduzido num número e segue um método para tal. Seguem alguns métodos de dedifusificação:

- **Média dos Máximos (M-o-M):** consiste em escolher o valor médio dentre todos os pontos máximos, uma vez que a função de pertinência possui mais de um ponto máximo;
- **Método do Centro de Área (CDA):** consiste em encontrar o valor correspondente a área do gráfico da função de pertinência, também conhecida como método do Centro da Gravidade;
- **Método Média dos centros (M-d-c):** consiste em escolher os pontos máximos da função de pertinência, desconsiderando as áreas das funções de pertinência.

Os controladores difusos aplicam algoritmo de controle através de regras lógicas, para que se aplique em uma rotina a experiência acumulada, a intuição e a heurística para controlar um processo (ZADEH, 1965).

A estrutura básica de controlador nebuloso é composta por quatro elementos principais: Base de conhecimento, Difusificação, Inferência e Dedifusificação.

A base de dados provê definições numéricas relevante para a implementação das funções de pertinência e fornece as definições necessárias para definir as regras linguísticas de

controle; e, a outra é a base de regras: é responsável pelos objetivos de controle através de um conjunto de regras de regulação (GOMES, 2013).

A ilustração da Figura 2 representa a estrutura básica deste controlador implementado em uma planta de controle de processo em diagrama de blocos.

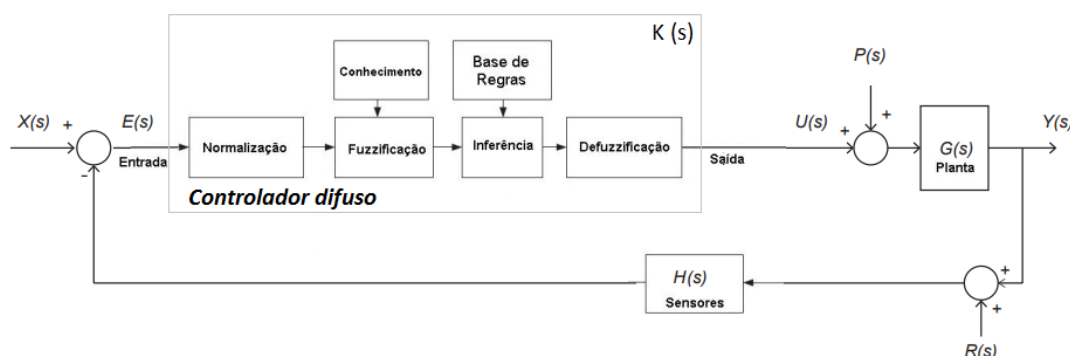


Figura 2 – Estrutura em blocos de um controlador difuso (Fonte: autoria própria).

4 – Discussões e Resultados.

Serão apresentadas, a seguir, as sínteses analíticas de alguns trabalhos que foram fundamentais na realização de tal pesquisa no sentido de se consolidar os resultados e as discussões a respeito da revisão.

Segundo o professor Zadeh (1965), um conjunto difuso é uma classe de objetos com um contínuo de graus de associação. Esse conjunto é caracterizado por uma função de associação (característica) que atribui a cada objeto um grau de associação que varia entre zero e um. As noções de inclusão, união, interseção, complemento, relação, convexidade etc. são estendidas a esses conjuntos e são estabelecidas várias propriedades dessas noções no contexto de conjuntos nebulosos. Em particular, um teorema de separação para conjuntos nebulosos convexos é provado sem exigir que os conjuntos nebulosos sejam disjuntos. Não foi utilizado recurso computacional para a implementação desta teoria.

No trabalho de Pinheiro (2000), desenvolveu-se métodos e técnicas para analisar e projetar Sistemas de controle *Fuzzy* clássicos através da técnica do domínio da frequência. Primeiramente introduziu-se um procedimento simples e intuitivo para obter a resposta em frequência de sistemas de controle difuso, a partir do conceito de funções descritivas. Este procedimento permite investigar as influências dos principais parâmetros dos controladores *Fuzzy* nas respostas dinâmicas do sistema em malha fechada. Foram propostas duas abordagens para analisar e sintonizar sistemas de controle nebuloso através de técnicas do domínio da frequência. À primeira vista, sistemas não lineares invariantes no tempo. A segunda, mais genérica, objetivou sistemas não lineares variantes no tempo com tais variações limitadas em parâmetros. Apesar de não informado o software de simulação dos exemplos mostrados na obra, um dos referenciais indica que se utilizou do MATLAB® para que se simulassem os sistemas e seus métodos para análise. Os resultados obtidos se mostraram promissores, pois, proporcionam soluções semelhantes ou melhores do que aquelas fornecidas por métodos alternativos disponíveis na literatura. As técnicas propostas são práticas e triviais no sentido de sua utilização, proporcionando, assim, um modo sistemático de análise e desenvolvimento de sistemas de controle *Fuzzy*.

Essas técnicas são particularmente eficientes na sintonia de reguladores e análise de robustez.

A tese de Caporali (2000) apresentou técnicas de projeto de controle neural e controle difuso para uma plataforma de Stewart acionada hidraulicamente. O modelo dinâmico não linear da plataforma Stewart, com seis graus de liberdade, foi desenvolvido no ambiente de sistemas multicorpos ADAMS®. Este pacote comercial foi usado para economizar tempo e esforço na modelagem de um sistema dinâmico (mecânico) complexo e na programação para obter a resposta no tempo do sistema. A plataforma de Stewart é um manipulador paralelo com alta relação força-peso e acuracidade de posicionamento, comparada a manipuladores seriais convencionais. As desvantagens dos mecanismos seriais é que cada articulação suporta o peso da articulação seguinte e mais o objeto a ser manipulado. A plataforma de Stewart tem recebido, recentemente, considerável interesse por parte dos pesquisadores dado o sucesso de suas aplicações e potenciais vantagens sobre os manipuladores convencionais. Uma aplicação popular da plataforma de Stewart é o simulador de voo onde a plataforma executa movimento com aceleração similar àquelas de uma aeronave. Embora muitas pesquisas na literatura tenham dedicado amplo esforço para cinemática dinâmica e projeto mecânico de manipuladores baseados na plataforma de Stewart, pouca atenção tem sido dada ao problema de regulação deste tipo de manipulador. Um esquema de controle difuso e de redes neurais foi adotado para lidar com as não-linearidades, distúrbios e incertezas dos parâmetros, bem como a precisão necessária no posicionamento e orientação da plataforma. Redes neurais artificiais e lógica difusa fornecem um paradigma computacional característico e tem demonstrado resultado para uma faixa de problemas práticos onde a técnica computacional convencional não tem tido sucesso. Em particular, a habilidade do controle neural e do controle difuso para representar mapeamento não-linear encoraja, nos estudos de controle neural e difuso (nebuloso), para representar problemas de controle não-linear. Resultados de simulação são apresentados, mostrando o que as técnicas empregadas e propostas podem ser utilizadas na plataforma de Stewart. Tal sistema de controle foi modelado e simulado na plataforma MATLAB®/Simulink.

O artigo proposto por Chuan *et al.* (2004) apresentou o desenho e implementação de uma caixa de ferramentas de lógica difusa baseada no Scilab (um pacote científico abrangente distribuído, livremente, pelo INRIA - *Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique*, Instituto Nacional de Pesquisas em Informática e Automação – tradução livre), que permite ao usuário resolver seu problema de controle usando lógica difusa com muito pouco esforço. A caixa de ferramentas da lógica difusa é escrita na linguagem Scilab e no Tcl/Tk (uma linguagem script de plataforma cruzada). Fornece funções completas para inferência, um gráfico fácil de usar editor para construir modelos complexos de sistemas lógicos nebulosos, e um simulador para Scicos. Aplicações de lógica difusa em sistemas controle e uso da caixa de ferramentas são ilustrados por um simples exemplo, que é um controle de temperatura de um chuveiro elétrico.

A obra de Palácio-Gómez *et al.* (2010) afirma que a lógica difusa é uma ferramenta para tomar decisões. No início, foi concebido como um conceito matemático com o único objetivo de usar dados numéricos e termos da linguagem oral para representar o modo regular de pensamento qualitativo. Essa ferramenta é usada com eficiência para controlar variáveis físicas, como temperatura e umidade, que se ajustam ao conjunto de regras dessa lógica. No trabalho empírico destes autores, foi apresentado o projeto e a implementação de um controle de temperatura que utiliza a lógica nebulosa como ferramenta para a tomada de decisões. A temperatura é mantida em um valor predefinido na faixa de 30 a

100 graus Celsius. O núcleo do sistema é um microcontrolador PIC 16F877A, que é conectado a um computador pessoal para monitorar e estabelecer em tempo real a temperatura do sistema controlado, em uma interface gráfica desenvolvida com *software* JAVA®. Não foi identificada, neste trabalho, a plataforma computacional para controle do sistema. Deste modo, mesmo com o amplo desenvolvimento de sistemas clássicos de controle PID, o uso do controle difuso se torna válido no desenvolvimento de sistemas de baixo custo e/ou computacionais. Esses sistemas permitem sua implementação com o uso de sistemas microcontrolados de 4 ou 8 bits, o que os torna muito compactos e com preços diminutos.

O artigo de Bandarra Filho *et al.* (2011) relatou uma investigação experimental usando controle adaptativo em um sistema de refrigeração. Este sistema é composto basicamente por um compressor semi-hermético, trocadores de calor de tubos concêntricos, condensador e evaporador e válvula de expansão termostática (TXV - *thermostatic expansion valve*). O refrigerante usado no sistema de refrigeração foi o HCFC-22 e também foi utilizado um inversor de frequência CA para controlar a velocidade do compressor. As temperaturas foram medidas por sensores Pt-100 e as pressões usando transdutores de pressão piezo resistivos. A aquisição de dados foi implementada usando o *software* Labview, da National Instruments®. Também foi utilizada uma placa eletrônica com saída de sinal analógico. Esses sinais analógicos foram convertidos em digitais através de um controlador lógico programável (CLP) e depois enviados ao computador através de uma porta serial do PC. Os testes foram realizados com um compressor de velocidade variável na faixa de 30 a 70 Hz e os resultados experimentais mostraram que o maior desempenho do sistema foi alcançado trabalhando na faixa de 50 Hz, usando controle difuso adaptativo.

O trabalho de Wu *et al.* (2012) desenvolveu um robô de auto equilíbrio de duas rodas com um método de controle PD (Proporcional-Derivativo) difuso é descrito e analisado como um exemplo de sistema de alta ordem, múltiplas variáveis, não-linear, acoplamento forte e instável. Com base em um modelo de estrutura de sistema, uma equação cinética foi construída usando a dinâmica e a mecânica newtonianas. Após várias experiências de simulação, obteve-se as melhores matrizes, segundo o método LQR (*Linear Quadratic Regulator* – Regulador Linear-Quadrático, tradução livre) e realimentação de estado. Em seguida, um controlador PD difuso foi projetado para o qual a posição e a velocidade do robô são entradas e para as quais o ângulo e a taxa de ângulo do robô são controlados por um controlador PD. A simulação foi realizada na plataforma MATLAB®, no módulo de simulação *Simulink* e a implementação foi desenhada pela Googol Tecnologia Limitada. Por fim, este artigo descreveu uma plataforma de controle em tempo real para o robô de autobalanceamento de duas rodas que controlam o robô, efetivamente, após algumas depurações de parâmetros. Desta forma, o resultado indicou que o algoritmo de controle PD difuso foi obtido com êxito o controle auto balanceado do robô de duas rodas e impediu que o robô caísse.

O artigo de Rohini e Jamuna (2016) visou melhorar o desempenho dinâmico do sistema fotovoltaico (PV – *Photovoltaic*, em inglês) disponível e maximizar a potência obtida com o uso de conversores em cascata com técnicas de controle inteligentes. A técnica de ponto de potência máxima baseada na lógica difusa foi incorporada no primeiro estágio de conversão para obter a potência máxima do painel fotovoltaico disponível. A cascata do segundo conversor foi necessária para manter a tensão do terminal no potencial da rede. A região de comutação suave do conversor de três estágios foi aumentada com a estratégia de controle baseada em loop de fase bloqueada (*Phase Locked-Loop* - PLL) proposta. A estratégia proposta levou à redução do conteúdo de

ondulação, classificação de componentes e perdas de comutação. A matriz fotovoltaica foi modelada matematicamente e o sistema foi simulado e os resultados foram analisados. O desempenho do sistema foi comparado com os algoritmos de rastreamento de ponto de potência máxima existentes. Os autores se esforçaram para obter potência máxima e confiabilidade aprimorada para a mesma insolação do sistema fotovoltaico. Tal sistema foi simulado no *software* MATLAB®/Simulink, e, não informado nem relatado em qual interface computacional foi realizado. Os resultados de *hardware* do sistema também foram discutidos para provar a validade dos resultados da simulação. Assim, o modelo desenvolvido foi usado com eficiência para rastrear a potência máxima usando o FLC (*Fuzzy Logic Control*). O conteúdo de ondulação foi minimizado e a região de comutação suave foi aumentada pela incorporação de PLL. Com esse arranjo, é alcançada uma melhor resposta transitória e é obtida uma eficiência de 97,35%.

O trabalho de Jesus e dos demais (2016) retrata que, as indústrias, na atualidade, buscam criar condições seguras para suas atividades de controle em áreas que demandam segurança e preservação do meio ambiente, sem expor o ser humano e o patrimônio material a riscos desnecessários em seus sistemas instrumentados de segurança. Surge-se uma condição para propor opções de ajustamento automático com condições de implantação de sistemas de controle adaptativo com o objetivo de melhorar o desempenho, estabilidade e segurança destes sistemas. O trabalho não apresenta em qual base computacional foram simulados e/ou desenvolvidos os testes do sistema, no entanto, os resultados foram apresentados. Conclui-se que, nas simulações, a planta não atingiu as condições de shutdown em resposta às condições críticas de teste de sobrepressão e de sobre temperatura e apresentou-se os resultados de um projeto e a análise de sistemas instrumentados de segurança que em condições de falha ou defeito não levam a planta a parada ou bloqueio dos seus sistemas operacionais.

O trabalho de Alzubi *et al.* (2020) retrata que, na maioria das aplicações de controle difuso (aplicando o raciocínio difuso clássico), o método de raciocínio requer uma base de regras difusa completa, ou seja, todas as observações possíveis devem ser cobertas pelos antecedentes das regras difusas, que nem sempre estão disponíveis. Os sistemas de controle difuso baseados no conceito de Interpolação de regras difusas (FRI) desempenham um papel importante em diferentes plataformas, caso apenas uma base de regras difusa esparsa esteja disponível. Nesse caso, o modelo difuso contém apenas as regras mais relevantes, sem cobrir todos os universos antecedentes. A primeira caixa de ferramentas da FRI capaz de lidar com diferentes métodos de FRI foi desenvolvida por uma equipe comandada por Johanyak, em 2006, para o ambiente MATLAB. O objetivo deste artigo é apresentar alguns detalhes da adaptação da caixa de ferramentas da FRI para suportar a linguagem de programação GNU/OCTAVE. A caixa de ferramentas OCTAVE *Fuzzy Rule Interpolation* (OCTFRI) é uma caixa de ferramentas de código aberto para a linguagem de programação OCTAVE, fornecendo um grande subconjunto funcionalmente compatível da caixa de ferramentas MATLAB FRI, além de várias extensões. A OCTFRI Toolbox inclui funções que permitem ao usuário avaliar os Sistemas de Inferência Fuzzy (FISs) na linha de comando e nos scripts OCTAVE, ler/gravar FISs e *Scripts* em/de arquivos e produzir uma visualização gráfica das funções de associação e do FIS. saídas. O trabalho futuro se concentrará na implementação de técnicas avançadas de inferência difusa e ferramentas da GUI. A OCTFRI Toolbox inclui funções que permitem ao usuário avaliar os Sistemas de Inferência Fuzzy (FISs) na linha de comando e nos scripts OCTAVE, ler/gravar FISs e *Scripts* em/de arquivos e produzir uma visualização gráfica das funções de associação e das saídas FIS. O trabalho futuro se concentrará na implementação de técnicas avançadas de inferência difusa e ferramentas da GUI. A OCTFRI Toolbox inclui

funções que permitem ao usuário avaliar os Sistemas de Inferência *Fuzzy* (FISs) na linha de comando e nos scripts OCTAVE, ler/gravar FISs e *Scripts* em/de arquivos e produzir uma visualização gráfica das funções de associação e do FIS. saídas. O trabalho futuro se concentrará na implementação de técnicas avançadas de inferência difusa e ferramentas da Interface Gráfica do Usuário.

Portanto, em razão de se empregar os conceitos de Lógica e Controle nebuloso, tais trabalhos descrevem implementações de diversas arquiteturas para procedimentos de regulação em sistemas de controle e/ou de segurança, bem como plataformas computacionais de programação da Lei de Controle linguística diversas, tanto de desenvolvimento detalhado como as desenvolvidas para configuração das bases de conhecimento e regras de inferência. No entanto, poucos destes programaram, de fato, aplicação em que se dispusesse um *software* de código-fonte aberto em que se efetivam os procedimentos de Sistemas de Controle de Processos Dinâmicos com tal lógica (dentre nove – 9, apenas dois – 2, neste espectro). Deste modo, evidencia-se a necessidade de tal construção, desenvolvimento, implementação e homologação no sentido de se apreender os modos de operação nestas plataformas.

5 – Conclusão.

Ao analisar as pesquisas revisadas, percebe-se que há um consenso entre os autores na concordância entre a metodologia e as aplicações de engenharia de controle e, de maneira geral, os componentes de atuação nos Sistemas, destarte, terem utilizado abordagens distintas, diferenciadas, ressaltando a importância do trabalho com controle linguístico nebuloso.

Nos estudos analisados, os autores não descreveram sobre a concepção de controle clássico somente (P, PI, PD, PID), mas, com emprego de dispositivos controladores baseados em lógica difusa de maneira a se combinar estes métodos.

Nesse contexto, grande parte dos pesquisadores usaram a plataforma MATLAB® (quatro dentre nove), e os demais usaram outras plataformas de código-fonte aberto e, ou, não informaram qual (ou quais) plataformas foram empregadas e, ou, desenvolveu-se o código para a implementação da Lei de Controle linguística (SCILAB e/ou OCTAVE, p.e.).

As identificações de componentes para controles automáticos empregados nos trabalhos dão importantes contribuições para que os projetistas e engenheiros de diversas áreas que estão envolvidos diretamente com tais modelagens de Sistemas de Controle baseados em lógica *fuzzy* em razão de seu dimensionamento.

Com base na revisão apresentada, pode-se afirmar que poucos estudos têm sido realizados com *softwares open-source*, e, que cada pesquisador utilizou uma metodologia de implementação *fuzzy* distinta em termos de aplicação.

Salienta-se, não obstante, a importância de realizar outras pesquisas sobre este tema para que os desenvolvedores tenham pleno conhecimento técnico sobre as plataformas disponíveis e possam implementar, de modo assertivo, demais desenhos de tais sistemas com a lógica proposta, principalmente na ocorrência de que estas sejam de código aberto.

Referências:

- ALZUBI, Maen; ALMSEIDIN, Mohammad; LONE, Mohd Aaqib; KOVACS, Szilveszter. *Fuzzy Rule Interpolation Toolbox for the GNU Open-Source OCTAVE*. Disponível em: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1912/1912.04999.pdf>. Acesso em: 25 maio 2020.
- ARRUDA, Dayse Mourão; ABUD; Gabriel Moreira Dias; PONTES; Felipe Arruda; OLIVEIRA, Bruno Barcellos Farias de. *Análise comparativa de ferramentas computacionais para modelagem de lógica fuzzy*. Simpósio de Excelência e Gestão em Tecnologia. Out., 2013.
- BANDARRA FILHO, Enio Pedone; GARCIA, Francisco E. Moreno; MENDOZA, Oscar S. Hernandez. *Application of Adaptive Control in a Refrigeration System to Improve Performance*. Revista ABCM. v. 23, n. 2. abr.-jun., 2011.
- CAPORALI, Alexandre Simião. *Estratégias de controle não convencional para uma plataforma de Stewart controlada hidraulicamente*. São Carlos, 2003. 201 p. Tese de doutorado da escola de engenharia mecânica de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2003.
- CHUAN, Feng; ZENGQI, Sun; LING, Su. *Design and Implementation of Scilab Fuzzy Logic Toolbox*. Simpósio Internacional - IEEE – Projetos de Sistemas de Controle Auxiliados por Computador. Taipei. Set. 2004.
- GOMES, Samantha Silva. *Desenvolvimento e análise de resultados entre os controladores PID e Fuzzy para o controle da temperatura da planta piloto didática SMAR (PD3) utilizando a estratégia Feedback*. Monografia (Engenharia de Controle e Automação). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Campus Campos Centro, 2013.
- GOMIDE, Fernando Antônio Campos; GUDWIN, Ricardo Ribeiro. *Modelagem. Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy*. Revista SBA, v. 4, n. 3. set. – out., 1994.
- JESUS, José Adilson Silva de; DA COSTA, Eduardo Alves; FERREIRA, Graziella Santos. *Controle VSI-MRAC Aplicado a Sistemas Instrumentados de Segurança – SIS*. Revista Semana Acadêmica. Ed. 98, v. 1, 2016. Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/controles_adaptativos_aplicados_e_m_sistemas_instrumentados_de_seguranca.1.pdf. Acesso em: 1º jun. 2020.
- PALACIO-GÓMEZ, C.; GARCÍA-SUCERQUIA, J. *Control de Temperatura Utilizando Lógica Difusa Temperature Controller by Using Fuzzy Logic*. Revista Colombiana de Física, Medellin, 2010.
- PINHEIRO, Carlos Alberto Murari. *Análise e projeto de sistemas de controle fuzzy: Uma abordagem no domínio da frequência*. Tese de doutorado da Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação. 2000. 141 p.
- ROHINI, G.; JAMUNA V. *PLL Based Energy Efficient PV System with Fuzzy Logic Based Power Tracker for Smart Grid Applications*. Revista: *The Scientific World Journal*. 2016. 20 p.
- SHAW, I. S.; SIMÕES M. G. *Controle e Modelagem Fuzzy*. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2007.
- WU, Junfeng; ZHANG, Wanying; WANG, Shengda. *A Two-Wheeled Self-Balancing Robot with the Fuzzy PD Control Method*. Revista *Mathematical Problems in Engineering*. 2012. 13 p.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and control*, vol. 8 (1965), pp. 338–353.

Tratamento de Água de Esgotos Para Fins Não Potáveis Pelo Uso de Raízes

¹ Cristian Pimentel de Souza, ²Cassia Maria Soares de Paulo da Silva, ³Carlos Eduardo Guarido,⁴
Paula Fernanda Chaves Soares

¹Aluno do Programa de Iniciação Científica Graduação Engenharia Civil^{2,3,4,5} Professor Engenharia Civil

^{2,3,4,5} Curso da Engenharia Civil Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Iguaçu - UNIG, Av. Abílio Augusto Távora, 2134 - Jardim Nova Era, 26275-580, Nova Iguaçu - RJ

³cassiadepaulo@hotmail.com, carlosguarido@globo.com, pfernanda07@gmail.com

Resumo. O Sistema de tratamento de águas de esgoto por Zona de Raízes utiliza plantas para o tratamento de águas residuais. A degradação das substâncias poluidoras contidas na água ocorre através da simbiose entre plantas, solo e/ou substrato artificial e microorganismos. A função principal das plantas consiste em fornecer oxigênio ao solo/substrato através de rizomas e possibilitar o desenvolvimento de uma população densa de microorganismos, que finalmente são responsáveis pela remoção dos poluentes da água. Toda a água tratada e polida pela Zona de Raízes pode ser 100% reciclada. Além de economicamente viável, a implantação da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) por meio de zona de raízes pode ser empregada como uma ferramenta de apoio para propostas de educação ambiental, para demonstrar a importância da preservação da qualidade da água que pode trazer benefícios sociais, econômicos e ambientais a população. Quando as tecnologias são desenvolvidas abordando esses benefícios, estas podem tornar-se um instrumento eficaz para o desenvolvimento sustentável de um processo de gestão local. Coletar e tratar o esgoto de áreas rurais ou de pequenos municípios mais afastados dos grandes centros é hoje um dos maiores entraves à universalização do saneamento básico no Brasil. No entanto, existem técnicas simples, relativamente baratas e ecologicamente corretas que ajudam a minimizar o impacto ambiental e reduzir o risco de doenças provocadas pelos dejetos lançados in natura nos rios. As estações de tratamento de esgoto (ETEs) por zona de raízes são um exemplo disso. Neste caso, plantas fazem a filtragem do efluente antes de lançá-lo na natureza.

Palavras-Chave: Saneamento, ETEs, Zona de Raízes

Abstract. The Root Zone Sewage Treatment System uses plants for the treatment of wastewater. The degradation of polluting substances contained in water occurs through the symbiosis between plants, soil and/or artificial substrate and microorganisms. The main function of plants is to supply oxygen to the soil/substrate through rhizomes and enable the development of a dense population of microorganisms, which are ultimately responsible for removing pollutants from the water. All water treated and polished by the Roots Zone can be 100% recycled. In addition to being economically viable, the implementation of the Sewage Treatment Station (ETE) through the root zone can be used as a support tool for environmental education proposals, to demonstrate the importance of preserving water quality that can bring benefits. social, economic and environmental benefits to the population. When technologies are developed addressing these benefits, they can become an effective instrument for the sustainable development of a local management process. Collecting and treating sewage from rural areas or small municipalities further away from large centers is today one of the biggest obstacles to universal basic sanitation in Brazil. However, there are simple, relatively cheap and ecologically correct techniques that help to minimize the environmental impact and reduce the risk of diseases caused by waste discharged in natura into rivers. Sewage treatment plants (ETEs) by root zone are an example of this. In this case, plants filter the effluent before releasing it into nature.

Keywords: Sanitation, ETEs, Root Zone

1 Introdução

A água é um bem essencial à vida e à sobrevivência dos seres vivos, mas um bem escasso que necessita ser racionado e reaproveitado, havendo vários métodos para tratar a água para consumo humano e as águas residuais, resultantes dos esgotos. A falta de tratamento de esgoto e efluentes industriais gera um círculo vicioso: elevados custos da saúde 70% das doenças tem origem de veiculação hídrica mais de 20 crianças morrem por dia por falta de saneamento básico no Brasil (a grande vítima desse processo é a classe pobre), inibindo a competitividade dos setores produtivos.

É possível afirmar que o maior desafio da humanidade para o século XXI é garantir a disponibilidade de água não só para a dessedentação dos seres vivos, mas também para a produção de alimentos. Portanto, a água é a fonte da vida por excelência. Nesse sentido, é fundamental não só o suprimento de água, que tem sua origem no ambiente natural, o qual deve ser preservado a qualquer custo, mas também garantir que ela quando usada seja tratada antes de sua devolução para os mananciais.

Os sistemas com plantas são eficientes porque o processo de degradação da matéria orgânica (mineralização, nitrificação, desnitrificação) é muito completo, devido à grande biomassa. Além disso, são removidos não só a carga orgânica como também nutrientes (por exemplo, Fósforo e Nitrogênio) que levam a eutrofização das águas, elimina patógenos como coliformes, e substâncias inorgânicas como fenóis e metais pesados. Sistemas com plantas podem ser, se desejável, configurados como elementos de Paisagismo Ambiental (Biótopos, por exemplo), em forma de jardins ou parques. A função principal das plantas consiste em fornecer oxigênio ao solo/substrato através de rizomas e possibilitar o desenvolvimento de uma população densa de microorganismos, que finalmente são responsáveis pela remoção dos poluentes da água.

Toda a água tratada e polida pela Zona de Raízes pode ser 100% reciclada. No Brasil, embora o problema de abastecimento de água tenha sido resolvido satisfatoriamente, atingindo cerca de 80% da população, os sistemas de esgoto cobrem menos de 50% dessa população (IBGE, 2000).

Os Tanques de Zona de Raízes constituem-se em um leito cultivado no qual as águas residuárias entram em contato com as raízes de plantas que promovem a liberação de oxigênio e favorecem o desenvolvimento de bactérias que fixam nutrientes (principalmente nitrogênio e fósforo) para a síntese vegetal, proporcionando redução da carga orgânica dos efluentes. Assim, este sistema de tratamento de esgoto doméstico, pode evitar a poluição das águas superficiais e subterrâneas, e possibilitar o reuso de águas, utilizando os efluentes tratados para demandas não potáveis. Além disso, os leitos cultivados construídos são unidades de tratamento que tentam reproduzir sistemas biológicos naturais, dispensam o consumo de energia elétrica, reagentes químicos e equipamentos mecânicos, além de não gerarem odores desagradáveis.

É indiscutível que a falta de tratamento de esgotos sanitários é considerada um grave problema ambiental à população brasileira e ao governo. No Brasil, segundo o IBGE, 85% (2011) das residências brasileiras possuem os serviços de tratamento e distribuição de água. No entanto, apenas 56% (2011) das residências brasileiras têm acesso à coleta de esgoto, ou seja, cerca de 90 milhões de pessoas não possuem coleta ou tratamento de tais efluentes. A qualidade e o acesso aos serviços de saneamento estão diretamente relacionados à saúde pública (LEMES, 2008). Água encanada e tratada é considerada um grande benefício para as comunidades, mas, no caso desse serviço não ser acompanhado do correto tratamento, existe a possibilidade de acarretar doenças à saúde da população (LEMES, 2008).

O lançamento de esgoto sem tratamento nos corpos d'água é responsável por 90% da contaminação hídrica (KRESSE, 1997). Por consequência de tal ação, podem aparecer inconvenientes, como o desprendimento de maus odores, presença de sabor na água potável, mortandade de peixes e ameaça à saúde pública. Sendo assim, a busca por tecnologias alternativas e de menor custo para tratamento de efluentes é de suma importância. Nesse cenário, tem se mostrado eficaz o tratamento por zona de raízes pelo fato de esses sistemas poderem ser implantados no local onde o esgoto é gerado, serem facilmente operados, economizarem energia e

serem mais flexíveis e menos susceptíveis a variações nas taxas de aplicação de esgoto (BRIX, 1993).

Outro aspecto positivo do sistema é a ausência da produção de lodo, o que muitas vezes provoca mau cheiro (secagem lenta) com alto custo (secagem mecânica); na zona raízes, o mau cheiro é evitado porque as próprias raízes funcionam como um filtro, eliminando-o (VAN KAICK, 2002). Os primeiros estudos com sistema de zona de raízes ou também conhecido por Wetlands construídos de fluxo vertical, foram realizados na década de 70 na Alemanha, e eram denominados inicialmente como Max Planck Institut Process, e a concepção de tratamento é análoga aos filtros de areia, e o esgoto precisa passar antes pela fossa séptica para depois ser lançado por meio de tubulações perfuradas na área plantada do filtro, ou seja, na zona de raízes plantada em cima de um filtro físico composto por um material de suporte como cascalho ou pedra britada areia grossa (PHILIPPI, 1997; VAN KAICK, 2002).

As plantas, independentemente do gênero a que pertençam, devem ter no mínimo características básicas como: aerênquimas bem desenvolvidos (Figura 1a) no caule e raízes que devem ser em forma de cabeleira (Figura 1b). O autor Seitz (1995) e documentos do IWA(2000) aconselham que as plantas, além de apresentarem as características descritas, devem ser de preferência nativas da região ou da área de instalação da ETE, por estarem adaptadas às condições climáticas do local da instalação das ETEs.

Figura 1: Características básicas das plantas para serem utilizadas: a) aerênquima bem desenvolvido da planta *crinum* spp., e b) as raízes em forma de cabeleira.



Autor: ARTEN, A. R.

2 Metodologia

Inicialmente foi feita revisão de literatura, com base na bibliografia disponível no âmbito dos estudos do tratamento de esgoto por zona de raízes, o que incluiu artigos científicos publicados em revistas, trabalhos para conclusão de curso, bem como dissertação de mestrado que têm como alvo de estudos o tema proposto. Para desenvolvimento do projeto, inicialmente, foi montada uma planta piloto numa caixa box de plástico de 30cmX50cmX20cm (Figura 2), que contém, de baixo para cima, camadas de pedra brita fina e areia. Em cima dessas camadas foram inseridas macrófitas (plantas de áreas alagadas), que fazem o trabalho em simbiose com bactérias aeróbicas. Esta, por sua vez,

decompõe as partículas orgânicas junto às raízes utilizando o oxigênio captado do ar pelas próprias plantas.

Figura 2



Fonte: O Autor

Em seguida, foi coletado 5 litros de esgoto, de odor desagradável e água turva, devido aos diversos esgotos jogados nesse efluente do Rio Jequiá, na rua Ericeira próximo ao número 16, Jardim Carioca, Ilha do Governador RJ (Figura 3).

Figura 3



Fonte: O Autor

Em seguida adicionou-se o esgoto coletado à caixa box piloto, e esta foi colocada num suporte construído artesanalmente (figuras 4 e 5), para que pudesse observar o líquido que percorria verticalmente, passando por essas camadas de substratos diferentes que estão densamente entremeadas por raízes da planta escolhida (Capim Santa Fé).

Figura 4



Figura 5



Fonte: O Autor

Os passos finais foi a observação da filtração dessa água e a comparação entre o efluente que entra e o que sai da ETE por zona de raízes (figuras 6 e 7)

Figura 6



Figura 7



Fonte: O Autor

3 Resultados

Os Tanques de Zona de Raízes constituem-se em um leito cultivado no qual as águas residuárias entram em contato com as raízes de plantas que promovem a liberação de oxigênio e favorecem o desenvolvimento de bactérias que fixam nutrientes (principalmente nitrogênio e fósforo) para a síntese vegetal, proporcionando redução da carga orgânica dos efluentes. Assim, este sistema de tratamento de esgoto doméstico, pode evitar a poluição das águas superficiais e subterrâneas, e possibilitar o reuso de águas, utilizando os efluentes tratados para demandas não potáveis. Além disso, os leitos cultivados construídos são unidades de tratamento que tentam reproduzir sistemas biológicos naturais, dispensam o consumo de energia elétrica, reagentes químicos e equipamentos mecânicos, além de não gerarem odores desagradáveis. Pelo ensaio realizado primeiramente observa-se que a água percorre verticalmente, passando por essas camadas de substratos diferentes que estão densamente entremeadas por raízes da planta escolhida. Os passos finais foi a observação da filtração dessa água e a comparação entre o efluente que entra e o que sai da ETE por zona de raízes, de acordo com a figura 6 e 7, onde a garrafa esquerda é o efluente bruto e direito o efluente tratado.

4 Conclusão

Além de economicamente viável, a implantação da ETE por meio de zona de raízes pode ser empregada como uma ferramenta de apoio para propostas de educação ambiental, sendo esta utilizada para demonstrar a importância da preservação da qualidade da água que pode trazer benefícios sociais, econômicos e ambientais a população. O desenvolvimento sustentável começa a ser alcançado quando as questões básicas da sociedade começam a ser solucionadas. Dentre as questões básicas, uma das mais relevantes está relacionada ao saneamento básico, podendo vir a contribuir para amenizar um dos gargalos do desenvolvimento sustentável - que é a falta de saneamento básico, e trazer uma melhor qualidade de vida para as populações carentes destes serviços. Esta possibilidade na melhoria da qualidade de vida por meio da oferta de saneamento adequado, viabiliza uma nova perspectiva para o desenvolvimento de outros setores, incrementando o potencial econômico e ambiental local.

5 Agradecimentos

A Universidade Iguaçu pela oportunidade desta pesquisa, através do Programa de Iniciação Científica, ao incentivo da Coordenadora do Curso de Engenharia Civil – Prof.^a M.Sc. Gisele Dornelles Pires e a Auxiliar Administrativa da FACET- Bloco M - Patrícia Peixoto Tavares da Silva.

6 Referências Bibliográficas

BRIX, H. **Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance**. In: MOSHIRI, G.A. (Ed.) *Constructed wetlands for water quality improvement*. Boca Raton: CRC Press, p. 9-23,1993.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Atlas do Saneamento** 2011.

KRESSE, K. **Água potable y saneamiento: Los avances en los últimos años son insuficientes**. *Desenvolvimento e Cooperação*. Berlin, n. 2, p.26-29,1997.

LEMES, J.L.V.B.; SCHIRMER, W.N.; CALDEIRA, T.V.; VAN KAICK, T.V.; ABEL, O.; BÁRBARA, R. **Tratamento de esgoto por meio de zona de raízes, em comunidade rural**. *Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais*, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 169-179, abr./jun. 2008.

VAN KAICK, T. S. **Estação de tratamento de esgoto por meio de zona de raízes:** uma proposta de tecnologia apropriada para saneamento básico no litoral do Paraná. 2002. 128 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

VAN KAICK, T. S. **Jardim Ecológico- Tratamento de Esgoto por Zona de Raízes:** Análise e Comparação da Eficiência de uma Tecnologia de Saneamento Apropriada e Sustentável. VI Semana de Estudos de Engenharia Ambiental. -Campus Irati. 02 a 05 de junho 2008