

Avaliação do Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de São Bernardo do Campo Utilizando Lógica Fuzzy

K.C.R Drudi, G.Martins, J.T.C.L.Toneli,

Programa de Pós Graduação em Energia, UFABC
Santo Andre, Brasil

kellydrudi@gmail.com, gilberto.martins@ufabc.edu.br,
juliana.toneli@ufabc.edu.br

R.Drudi, G.C.Antonio

Programa de Pós Graduação em Energia, UFABC
Santo Andre, Brasil

ricardo.drudi@ufabc.edu.br, graziella.colato@ufabc.edu.br

Resumo— Com o crescimento contínuo da população mundial, a quantidade de resíduos produzida vem aumentando consideravelmente. No Brasil essa situação é ainda mais grave, pois além do número elevado da produção de resíduos, a destinação final para os mesmos é inadequada. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi criada com o objetivo de regularizar e exigir ações que coordenem esforços para a minimização de geração dos resíduos, além do correto tratamento dos mesmos. Nesse contexto, a recuperação energética através de processos termoquímicos se mostra como uma opção viável, pois além de reduzir o volume dos resíduos é possível aproveitar a energia contida na massa dos mesmos. Para que se possa estimar a energia contida nesses resíduos, é necessário determinar seu poder calorífico inferior (PCI). A composição dos resíduos sólidos urbanos é diretamente influenciada pela região onde é gerada, a classe social e também a época do ano. Assim, determinar um valor exato do PCI se configura em uma tarefa de pouca praticidade. Nesse sentido, pretende-se analisar três variáveis de entrada categóricas do RSU e seus respectivos graus de pertinência, e, com a utilização da lógica Fuzzy, determinar o PCI esperado para cada caso, gerando uma saída interpretável em intervalos de valores do PCI.

Palavras-chave— inteligência artificial, lógica fuzzy, resíduos sólidos urbanos, poder calorífico inferior, potencial energético.

I. INTRODUÇÃO

A. Geração e Política Nacional de Resíduos Sólidos

Hoje em dia, o Brasil enfrenta um grande problema no que diz respeito ao descarte final dos resíduos sólidos urbanos. A figura 1 apresenta a destinação dos resíduos nos anos de 2012 e 2013, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) [1]:

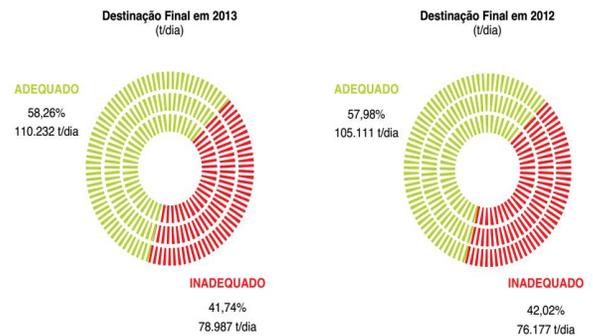


Fig. 1. Destinação final de RSU no Brasil. [1]

Além do descarte ambientalmente inadequado, a geração de resíduos no Brasil vem aumentando nos últimos anos. Segundo a Abrelpe [1] essa geração de RSU cresceu 4,1% de 2012 para 2013, índice superior à taxa de crescimento populacional no país no mesmo período, que foi de 3,7%. No ano de 2013 foram geradas 209.280 ton/dia de RSU, o que equivale a 1,041 kg/dia de geração per capita. A figura 2 apresenta o comparativo entre o crescimento populacional e o aumento da produção de RSU nos últimos anos:

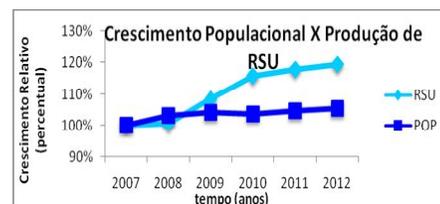


Fig. 2. Crescimento Populacional X Produção de RSU [2]

O grande desafio é identificar soluções ambientalmente seguras e eficientes para os problemas de geração e descarte de resíduos diversificados e em grandes quantidades, já que hoje 78.987 kg dos resíduos sólidos urbanos (RSU) têm destinação inadequada, o que representa 41,74% do total gerado [1]. A Lei Federal nº 12.305/10 [3], que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, aprovada após 20 anos de discussões no Congresso, estabelece princípios, objetivos, diretrizes, metas, ações e importantes instrumentos que visam disponibilizar alternativas para gestão e gerenciamento dos RSU. De acordo com a PNRS [3], na gestão e gerenciamento de tais resíduos deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos e disposição final ambientalmente adequada. No que diz respeito à destinação ambientalmente adequada, a política também propõe a recuperação e aproveitamento energético desses resíduos. Essa recuperação deve ser feita por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis.

B. Potencial de geração de energia

Os resíduos sólidos urbanos são compostos por diversos materiais. A maior parte desses materiais é composta por materiais que possuem alto conteúdo energético embutido, ou seja, apresenta grande capacidade para conversão energética, seja ela em forma de energia térmica, elétrica ou mecânica. O processo de recuperação energética desses resíduos pode ocorrer através de processos termoquímicos ou bioquímicos. A figura 3 a seguir apresenta as possíveis rotas de conversão de resíduos sólidos e seus respectivos produtos finais:

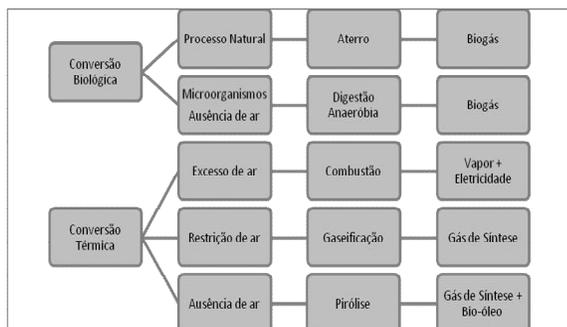


Fig. 3. Processo de recuperação energética de RSU: Biológico e Térmico - adaptado DDMA [4]

Os processos de conversão termoquímica são processos que utilizam calor de forma a recuperar, separar ou neutralizar determinadas substâncias presentes nos resíduos, reduzindo assim tanto a massa quanto seu volume [5]. Os processos termoquímicos mais utilizados no tratamento de resíduos são: combustão direta (incineração), gaseificação e pirólise. Para que esses processos ocorram de forma eficiente, é necessário que haja um pré-tratamento nos mesmos, além do conhecimento dos materiais que os compõe, em termos físicos, químicos e biológicos.

C. Poder Calorífico Inferior (PCI)

O aproveitamento do lixo como energia depende de seu poder calorífico inferior (PCI), variável que indica a

quantidade útil de energia contida no resíduo. O poder calorífico é definido como a quantidade de calor liberada quando um combustível é queimado completamente em um processo de regime permanente [6].

O poder calorífico superior (PCS) é a quantidade de calor transferida com a água presente nos produtos de combustão no estado líquido. Já o poder calorífico inferior (PCI) é a quantidade de calor transferida com a água presente nos produtos de combustão no estado vapor.

A tabela 1 a seguir proposta por Themelis [7], apresenta alguns componentes presentes entre os resíduos sólidos, bem como seus respectivos PCI:

Tabela I. Valores de PCI [7]

Componentes	kJ/kg
Orgânicos	5484
Papel/Papelão	16870
Plásticos	26372
Madeira	10549
Borracha	28381
Couro	15195
Têxteis	14567

A variável PCI pode ser obtida de duas formas: experimental ou teórica. A experimental geralmente é medida utilizando bomba calorimétrica. Já a teórica pode ser prevista através de equacionamento ou parametrização.

A tabela II apresenta as vantagens e desvantagens de se obter o valor do PCI através dos métodos mencionados anteriormente:

Tabela II. Vantagens e Desvantagens da determinação do PCI

PCI			
Tipo	Método	Vantagens	Desvantagens
Experimental	Bomba Calorimétrica	Prevê efetivamente o valor do PCI.	Muito trabalhoso e exige mão de obra qualificada.
	Equacionamento	Evita medição em campo.	Não pode ser generalizada.
Teórico	Defuzzificação	Evita medição em campo;	O PCI é determinado por aproximação e não de forma exata.
		É possível prever a categoria de forma imediata.	

O objetivo do presente trabalho é determinar o poder calorífico inferior (PCI) dos resíduos sólidos urbanos, utilizando uma técnica de Inteligência Artificial, a lógica Fuzzy, ou seja, determinar faixas possíveis do PCI (baixa, média e alta), utilizando variáveis categóricas.

D. Estado da arte para determinação do PCI

A pesquisa na área de resíduos sólidos urbanos ainda é muito incipiente no Brasil. Adquiriu força após a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos [3], mas ainda assim se apresenta defasada quando comparada às pesquisas de outros países.

O poder calorífico seja ele inferior (PCI) ou superior (PCS) pode ser determinado através de sua composição física, elementar (química) ou imediata.

Chang et. al. [8], propôs em seu trabalho a determinação do PCI através de equacionamento. Em seu trabalho, os autores coletaram 180 amostras de resíduos sólidos da cidade de Taiwan, mediram o PCI das amostras e em seguida criaram as equações, utilizando a regressão multivariada.

Kathiravale et. al. [9], utilizam a derivada de Dulong para a determinação do PCI dos resíduos da Malásia, ou experimentalmente através da bomba calorimétrica.

Em seu trabalho Meraz et. al. [10], determina o poder calorífico superior dos resíduos do México através da regressão multivariada com ajuste dos mínimos quadrados.

Soares [11], em seu trabalho de pesquisa caracterizou fisicamente os resíduos sólidos urbanos de duas cidades do Rio de Janeiro e determinou seu PCI através de bomba calorimétrica.

O DDMA [4], em seu estudo, coletou amostras de forma estratificada, ou seja, agrupando os bairros do município de São Bernardo de acordo com a classe econômica, nível de escolaridade e região onde foram gerados esses resíduos. A determinação do PCI foi feita através de medições em bomba calorimétrica.

E Leão [12], efetuou um estudo da gestão dos resíduos também do município de São Bernardo do Campo, efetuando medições em bomba calorimétrica.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Lógica Fuzzy

Rezende [13], o objetivo de seu trabalho foi controlar a temperatura do ar quente de exaustão na zona de combustão do conjunto gaseificador/combustor utilizando o Sistema de lógica Fuzzy. O trabalho em questão trata de um processo termoquímico aplicado à biomassa.

No trabalho de Missio [14], a lógica Fuzzy foi utilizada de forma integrada à equações diferenciais e processos estocásticos com objetivo de construir um modelo de febre aftosa, que são influenciadas por fatores socioeconômicos e ambientais.

No trabalho de Barin [15] foi desenvolvida uma metodologia de apoio a decisão para a seleção de sistemas para a geração de energia elétrica com biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos, avaliando devidamente cada processo decisório, de acordo com aspectos econômicos, operacionais, ambientais e sociais utilizando lógica Fuzzy.

A lógica Fuzzy é um sistema lógico cuja relação binária de pertinência de um elemento a um conjunto (pertence ou não) é substituída por uma função pertinência, que fornece valores reais entre 0 e 1 para os respectivos graus de pertinência de um elemento a um conjunto. Esse tipo de relação de pertinência permite trabalhar com conceitos que não podem ser expressos com exatidão numérica, ou que incorporam algum grau de imprecisão ou incerteza [16].

Dessa forma a lógica Fuzzy relaciona cada elemento com um grau de pertinência, a cada conjunto através de uma função $[0,1] \rightarrow f(x, A)$ onde x é o elemento e A é o conjunto.

Sendo assim, a lógica Fuzzy adapta-se adequadamente a raciocínios imprecisos, onde o grau de incerteza das informações é parte inerente do processo. Decisões baseadas em informações imprecisas são comuns em áreas onde os critérios de análise são subjetivos, ou então quando as medições dos dados estão sujeitos a variações relevantes.

A lógica Fuzzy se mostra como uma ferramenta adequada, pois pode determinar qual o nível de PCI esperado para coletas específicas, levando em consideração as categorias de umidade (baixa, média e alta), a classe social (A, B, C, D e E) e tipo de região onde o resíduo é gerado (comercial, industrial, ou residencial). $f(x, A) \rightarrow [0,1]$, onde x é o elemento e A é o conjunto [17].

B. Aplicação

A técnica de inteligência artificial será aplicada nos dados dos resíduos do município de São Bernardo do Campo [4].

As classes sociais foram divididas em cinco categorias (A, B, C, D e E), de acordo com a classificação do IBGE [18]. Já a variável umidade foi dividida em três categorias (baixa, média e alta), de acordo com dados da literatura. E por último a variável região, foi classificada em residencial, comercial e industrial, de acordo com o tipo de atividade econômica que é realizada na região. A tabela III a seguir apresenta as variáveis de entrada e suas respectivas categorias, bem como a variável de saída, o PCI classificado em categorias de baixo médio e alto de acordo com as medições feitas no trabalho de DDMA [4].

Tabela III. Variáveis Categóricas

Input			Output
Classe Social	Região	Umidade	PCI
A			
B	Residencial	Baixa	Baixo
C	Comercial	Média	Médio
D	Industrial	Alta	Alto
E			

O módulo de regras Mamdani foi utilizado por apresentar operações matemáticas das quais são determinados os

mínimos e máximos de uma função, e foram utilizadas as regras com os conectivos *and*, que determina o mínimo de funções. O PCI é o combustível embutido nos materiais para a conversão em energia, e para o funcionamento de equipamentos de conversão energética, é necessário que se garanta um valor mínimo desse combustível.

As regras fuzzy foram obtidas através da combinação de todas as variáveis de entrada e seus respectivos pesos, todos de acordo com a classificação do referencial teórico, utilizando o conectivo *and* conforme mencionado anteriormente.

Já as funções de ajuste, para cada variável de entrada utilizou-se uma função que melhor representa-se o comportamento dessa variável em questão. No caso da variável de entrada Classe Social que foi subdividida em 5 categorias, utilizou para as quatro primeiras categorias as funções trapezoidais, e para a última classe a sigmoide, visto que para as classes acima dos valores determinados, o valor da variável se mantinha o mesmo.

Para a variável de entrada Umidade utilizou-se as funções trapezoidal, *gbellmf* (a função em formato de sino generalizada) e a função *smf*. A escolha ocorreu devido ao fato da variável Umidade apresentar valores extremos contínuos e constantes. No caso da variável Região, todas as funções utilizadas foram as trapezoidais.

Foram utilizadas para representar o comportamento da variável PCI, a única variável de saída, funções trapezoidais.

A figura 4 apresenta cada variável de entrada e a saída e suas respectivas categorias:

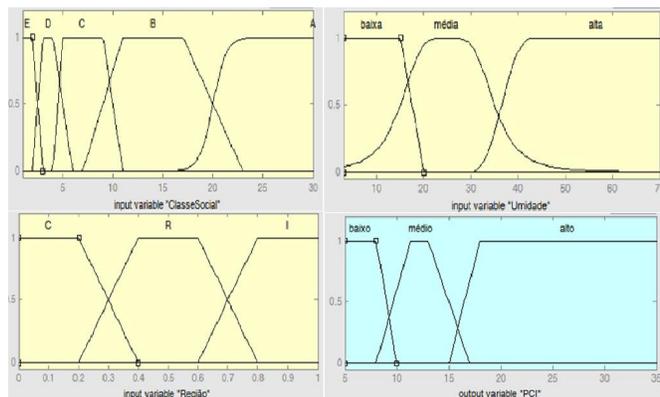


Fig. 4. Variáveis de entrada e saída para previsão do PCI

Ao todo foram construídas quarenta e cinco regras utilizando o conectivo *and* do sistema Mamdani do Matlab, conforme exposto anteriormente. As regras utilizadas estão descritas na tabela IV e foram construídas com base nas informações da literatura que trata sobre o PCI de resíduos sólidos, bem como o trabalho do DDMA[4]:

Tabela IV – Regras Fuzzy

Variáveis				
Classe Social	Umidade	Região	Conectivo	PCI
E	Baixa	Residencial	And	Médio
E	Baixa	Comercial	And	Médio
E	Baixa	Industrial	And	Médio
E	Média	Residencial	And	Baixo
E	Média	Comercial	And	Baixo
E	Média	Industrial	And	Médio
E	Alta	Residencial	And	Baixo
E	Alta	Comercial	And	Baixo
E	Alta	Industrial	And	Baixo
D	Baixa	Residencial	And	Médio
D	Baixa	Comercial	And	Médio
D	Baixa	Industrial	And	Alto
D	Média	Residencial	And	Baixo
D	Média	Comercial	And	Médio
D	Média	Industrial	And	Médio
D	Alta	Residencial	And	Baixo
D	Alta	Comercial	And	Baixo
D	Alta	Industrial	And	Baixo
C	Baixa	Residencial	And	Médio
C	Baixa	Comercial	And	Alto
C	Baixa	Industrial	And	Alto
C	Média	Residencial	And	Baixo
C	Média	Comercial	And	Alto
C	Média	Industrial	And	Alto
C	Alta	Residencial	And	Baixo
C	Alta	Comercial	And	Baixo
C	Alta	Industrial	And	Baixo
B	Baixa	Residencial	And	Médio
B	Baixa	Comercial	And	Alto
B	Baixa	Industrial	And	Alto
B	Média	Residencial	And	Baixo
B	Média	Comercial	And	Médio
B	Média	Industrial	And	Médio
B	Alta	Residencial	And	Baixo
B	Alta	Comercial	And	Baixo
B	Alta	Industrial	And	Baixo
A	Baixa	Residencial	And	Alto
A	Baixa	Comercial	And	Alto
A	Baixa	Industrial	And	Alto
A	Média	Residencial	And	Médio
A	Média	Comercial	And	Alto
A	Média	Industrial	And	Alto
A	Alta	Residencial	And	Baixo
A	Alta	Comercial	And	Baixo
A	Alta	Industrial	And	Baixo

III. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Após a alimentação das informações e regras no sistema Fuzzy Mamdani do Matlab, foram criados gráficos que apresentaram os graus de pertinência, e cada mudança em qualquer um dos parâmetros, a faixa e valores de PCI eram afetados. A figura 5 retrata tal saída:

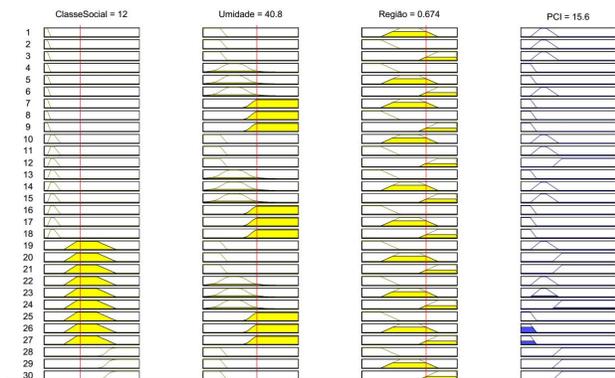


Fig. 5.: Gráfico da saída das regras Fuzzy

O objetivo do presente trabalho era classificar de forma categórica os valores do PCI (baixo, médio e alto), com base na umidade dos resíduos, região e classe social onde são gerados. Os resultados se mostraram tão satisfatórios, que foi possível comparar os valores de saída do sistema Fuzzy, com valores medidos e valores calculados através de equações. A tabela V apresenta tais comparações:

Tabela V – Comparações de resultados

Região	Classe social	Umidade	PCI (equação)	PCI (medido)	PCI (Fuzzy)
Residencial	B	38,1%	8,60 MJ/kg	9,3 MJ/kg	9,2 MJ/kg
Residencial /comercial	B/C	42,7%	8,09 MJ/kg	9,2 MJ/kg	9 MJ/kg
Residencial /Industrial	C/B	38,7%	7,59 MJ/kg	9,8 MJ/kg	9,8MJ/kg

Vale ressaltar que os parâmetros e valores aqui comparados foram com base em dados aferidos. Outras configurações poderiam ser testadas, no entanto seria necessário resultados de trabalhos experimentais para efetiva comparação.

IV. CONCLUSÕES

Esse trabalho foi um estudo preliminar para verificar a possibilidade da aplicação da lógica Fuzzy como ferramenta para estimar o PCI dos resíduos sólidos de São Bernardo do Campo.

A ferramenta de Inteligência Artificial lógica Fuzzy, se mostrou apropriada no que diz respeito à previsão do PCI de forma categórica, pois o poder energético dos resíduos é extremamente algo trabalhoso de ser medido.

O fato de a ferramenta apresentar as faixas de PCI, de acordo com a classe social, região e umidade, faz com que seja possível o monitoramento de plantas de geração de energia Waste-to-Energy (WTE) no próprio aterro, dispensando a necessidade de testes laboratoriais ou medições de composição do lixo que demandem tempo e pessoal especializado.

Dessa forma é possível prever a necessidade da utilização de combustível auxiliar ou não para a planta de recuperação energética de forma rápida, prática e com base apenas em informações que já fazem parte da rotina operacional do aterro.

Vale ressaltar que os dados utilizados para esse trabalho foram dados fornecidos por pesquisadores que aferiram o PCI e a umidade dos resíduos, além de terem classificado as regiões de acordo com a atividade econômica.

Para trabalhos futuros, pretende-se utilizar a ferramenta para a mesma avaliação, no entanto, comparando os resultados com medições que serão feitas em campo, em uma região cujas informações serão mais específicas e classificadas de acordo com as necessidades do projeto de pesquisa temático, no qual faz parte esse trabalho.

Além disso, serão testadas outras ferramentas de lógica Fuzzy, pois ainda que o módulo Mamdani tenha atendido as expectativas em relação à previsão do PCI, o mesmo apresentou um inconveniente no que diz respeito à utilização dos conectivos *and* e *or* em uma mesma regra Fuzzy.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico regulamentado pela ANEEL e com apoio financeiro concedido pela PETROBRAS, CAPES e UFABC.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] Abrelpe – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil” 2013.
- [2] K.C.R Drudi e G. Martins. “Avaliação do Potencial Energético dos Resíduos Sólidos do Município de Santo André”, ISWA. 2014.
- [3] Brasil, 2010. Lei nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasil: 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acessado em: 05 de Julho de 2014.
- [4] DDMA - DOUTORES DO MEIO AMBIENTE. Caracterização Gravimétrica, Físico-Química e Elementar dos Resíduos Sólidos Urbanos. 2010.
- [5] FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. “Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Guia de Orientações para Governos Municipais de Minas Gerais”. Minas Gerais.2012
- [6] Y.A Çengel, M.A Boles, GN Cázares. Termodinamica. McGraw-Hill. 2003.
- [7] N. J. Themelis, “An Overview OF the Global Waste-to-Energy Industry”. In: Waste Management World, Jul-Aug 2003, pp. 40-47. Tulsa, OK: Pennwell Publishing, 2003.
- [8] Y. F. Chang, C. J.Lin, J. M.Chyan, I, M. Chen, J.E.Chang. Multiple regression models for the lower heating value of municipal solid waste in Taiwan. Journal of Environmental Management 85, p. 891-899, 2007.
- [9] S. Kathiravale, M.N.M.Yunus, K.Sopian, A. H. Samsuddin. Modeling the heating value of Municipal Solid Waste. Fuel 82, 1119–1125, 2003.
- [10] L. Meraz, A.Dominguez, I. Kornhauser, F.Rojas. A thermochemical concept-based equation to estimate waste combustion enthalpy from elemental composition. Fuel 82, 1499–1507, 2003.

- [11] E.L.F.S Soares, “Estudo da Caracterização Gravimétrica e Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos”. Dissertação de Mestrado, Depto. Civil. Eng., Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2011.
- [12] A. Leão, S.F.Souza, Z. Ferreira. Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de São Bernardo do Campo. UNESP, 2011.
- [13] O.L.T. Rezende. O uso da lógica fuzzy no controle das temperaturas de um conjunto gaseificador/combustor de biomassa. UFV, Minas Gerais, 2012.
- [14] M.Missio. M. Modelos de EDP integrados à Lógica Fuzzy e Métodos Probabilísticos no tratamento de incertezas: uma aplicação à febre aftosa em bovinos. Tese de doutorado, UNICAM. 2005.
- [15] A. Barin. Seleção de Sistemas de Geração de Energia Elétrica a partir de Resíduos Sólidos Urbanos: Uma abordagem com a lógica difusa. Tese de doutorado. UFSM, 2012.
- [16] L.Zadeh. Fuzzy Sets. Information and Control, 1965.
- [17] R.Drudi. Um estudo sobre os processos de Fuzzificação e Defuzzificação no ESbuilder, 2008.
- [18] IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística . Salário Mínimo. Classe Social, 2014 .