

III-252 - ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RSU UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA)

Maria do Socorro Costa São Mateus⁽¹⁾

Engenheira Civil pela UCSal. Mestre em Geotecnia pela EESC-USP. Doutora em Geotecnia Ambiental pela COPPE-UFRJ. Professora Adjunto da UEFS-Universidade Estadual de Feira de Santana/DTEC. Professora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECEA)-UEFS.

Pedro Henrique do Valle Aguiar⁽²⁾

Graduando em Engenharia Ambiental – UFMG, técnico em Mecatrônica.

Raphael Tobias de Vasconcelos Barros⁽³⁾

Engenheiro Civil e Sanitarista pela UFMG. Doutor pelo Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon (França). Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UFMG).

Emanuele Carneiro de Oliveira⁽⁴⁾

Graduanda do Curso de Engenharia Civil da UEFS – DTEC. Monitora voluntária.

Anderson de Matos Gadéa⁽⁵⁾

Engenheiro Civil. Mestre e Doutor em Estruturas. Professor Pleno do DTEC-UEFS. Professor do PPGECEA-UEFS.

Endereço⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾: Av. Transnordestina, s/n – Novo Horizonte, Feira de Santana – BA, CEP: 44036-900176 - Brasil - Tel: (75) [3161-8310](tel:3161-8310) – e-mail: so_mateus@yahoo.com.br / socorro@uefs.br

Endereço⁽²⁾⁽³⁾: Av. Antonio Carlos, 6.627 - Escola de Engenharia da UFMG - Bloco I - sala 4.624 - CEP 31.270.901 - Belo Horizonte (MG) – Brasil - tel 00 55 31 3409 1926 - email: raphael@desa.ufmg.br

RESUMO

Este artigo utilizou as Redes Neurais Artificiais (RNA) para fazer a estimativa da produção de biogás e metano, gerados por resíduos sólidos urbanos (RSU) dispostos em alguns aterros sanitários brasileiros. Para o desenvolvimento do trabalho, realizou-se levantamento na literatura dos parâmetros composição gravimétrica, tempo de aterramento, sólidos totais voláteis (STV), teor de lignina, volume de biogás e metano, que foram utilizados nas RNAs, para realizar a previsão. Utilizou-se também a planilha do IPCC (2006), para aferir as medições de biogás e metano encontradas na literatura, partindo dos parâmetros solicitados como quantidade de habitantes, geração per capita de RSU, porcentagem de RSU coletado e disposto em aterro sanitário, carbono orgânico degradável e, em seguida, foi utilizada para gerar dados de biogás e metano, para aqueles trabalhos que não realizaram as medições. A configuração da RNA aplicada foi simples, com duas camadas, cinco entradas e duas saídas, utilizando um máximo de trinta neurônios. Os resultados encontrados, utilizando as RNAs, são promissores e mostram uma boa aproximação com as medições de campo, a despeito da reduzida quantidade de dados utilizada neste trabalho. A utilização da planilha do IPCC (2006), para gerar os dados de biogás e metano que faltavam na literatura pesquisada, é uma ferramenta muito útil mas que precisa ser utilizada de maneira muito cuidadosa e com ajustes devidos, a fim de que possa representar as situações estudadas, uma vez que os processos de geração de biogás em aterro sanitário são bastante complexos e as medições realizadas em campo e em laboratório apresentam dispersão significativa. Sendo assim, para propor uma equação para previsão de biogás e metano a partir da RNA, o banco de dados aqui utilizado está sendo ampliado de forma criteriosa.

PALAVRAS-CHAVE: RSU, Geração de biogás, Redes neurais artificiais (RNA).

INTRODUÇÃO

A problemática dos resíduos sólidos (RS) vem inspirando preocupações entre as sociedades mais atentas à questão, tanto pelo aumento da quantidade produzida quanto pela dificuldade e pelos custos crescentes de lidar com eles. Governos de países mais avançados, onde o tema vem sendo desenvolvido há mais de uma geração, mostram resultados encorajadores no aprimoramento da gestão – pondo em prática princípios com forte componente ambiental -, mas em outros países o entendimento ainda precisa ser melhor para que haja efeitos mais positivos.

No Brasil, a despeito da lei 12.305/10 ser considerada boa e oferecer ordenamento jurídico para orientar a ação dos governos e das sociedades, observa-se uma enorme necessidade de garantir que seja respeitada. As dificuldades são, é claro, de ordens econômica e política, além de uma compreensão limitada dos fenômenos associadas àquela problemática. Uma das limitações observadas é a escassez de dados de boa qualidade, confiáveis, o que dificulta quaisquer tentativas sérias de planejar a longo prazo e com um pouco mais de responsabilidade.

Este trabalho tenta fornecer elementos que ajudem aos responsáveis/decisores relativamente a tomada de iniciativas, visando a aumentar a eficiência dos serviços. Quaisquer previsões de longo prazo, por definição, estarão sujeitas a variáveis sobre as quais o controle é, para dizer o mínimo, muito limitado. Assim, o que se pretende com ele é aumentar a disponibilidade de ferramental à disposição dos interessados, em geral, e dos decisores, em particular, contribuindo para uma gestão de RS digna do nome. Especificamente no que tange aos resíduos orgânicos, talvez por razões culturais sempre desconsideradas - a despeito da enorme quantidade em que são produzidos e simplesmente descartados -, a intenção é ter elementos que evidenciem os benefícios econômicos e ambientais de seu aproveitamento na geração de gás.

Para se ter uma ideia do potencial dos RS domésticos orgânicos, em geral 1 m³ do gás gerado através do processo de decomposição contém 0,6 m³ de metano e gera 7kWh de eletricidade. Na previsão da geração de gás a partir dos resíduos orgânicos, utilizam-se modelos de decaimento de primeira ordem, muito úteis e que requerem o conhecimento de diversos parâmetros do RS, os quais podem ser obtidos por meio de previsão teórica (dados de composição física e química do RS), ensaios de laboratório ou ajustes de medições realizadas nos aterros sanitários. Entretanto, os dois primeiros não são de fácil determinação, particularmente por dificuldades operacionais e pela complexidade dos fenômenos que envolvem a dinâmica do processo de decomposição e pela heterogeneidade dos RS. Há que se considerar também a dificuldade quanto a manter medições frequentes “in situ” nos aterros sanitários, face à dinâmica operacional dessas obras em permanente construção. Neste sentido, as Redes Neurais Artificiais (RNA), que vêm sendo utilizadas para diversos fins, podem se apresentar como ferramenta importante para estimativa do volume de biogás e consequente geração de energia elétrica, a partir da formação de um banco de dados com os parâmetros de interesse.

OBJETIVO

Baseado em dados coletados em aterros sanitários brasileiros, utilizar as Redes Neurais Artificiais (RNA) como instrumento para estimar a produção de biogás e de metano a partir de RS domésticos orgânicos, colaborando para a viabilidade econômica de sua gestão e para a mitigação de impactos ambientais derivados de sua geração.

REDES NEURAS ARTIFICIAIS (RNA)

Em síntese, as RNA são algoritmos computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes, tentando simular em computadores o funcionamento do cérebro humano, ainda que de maneira simplificada. Assim como o cérebro, as RNAs são capazes de aprender e tomar decisões baseadas em seu próprio aprendizado. Desta forma, as RNAs podem ser interpretadas como um esquema de processamento capaz de armazenar conhecimento, baseado em aprendizagem (experiência) e disponibilizar este conhecimento para a aplicação em estudo.

As redes neurais são amplamente utilizadas para soluções de problemas complexos, onde o comportamento das variáveis não é rigorosamente conhecido (AZEVEDO e outros, 2000; HAYKIN, 2001).

A rede neural usada neste trabalho é do tipo retropropagação (*back propagation*), que consiste em um processo de propagação do erro quadrático médio pelas sinapses da rede. A grande vantagem da utilização do método de retropropagação reside no fato de existir uma quantidade de equações bem definidas e explícitas voltadas para a correção dos pesos na rede. É realizada uma comparação entre a saída gerada pela rede e a resposta desejada, objetivando-se, assim, diminuir o erro total da saída gerada pela rede, obtendo-se, dessa maneira, o armazenamento de conhecimento e aprendizado.

METODOLOGIA

O trabalho consistiu em utilizar os dados de aterros sanitários de RSU brasileiros publicados em artigos, dissertações e teses por diversos pesquisadores. Esses dados foram agrupados em aterros de grande porte, a exemplo de Caldas (2017), aterro Metropolitano Centro (AMC) em Salvador-Ba; Firmo (2013), aterro da Muribeca, Recife-Pe; Britto (2006), AMC e Cintra (2003), Central de Tratamento de Resíduos, em Belo Horizonte-MG e aterros de pequeno e médio portes, dos quais citamos dados encontrados em Carvalho (2013), aterro de Barreiras-Ba; CDM-PDD, aterro de Feira de Santana-Ba, Santos (2017) que reuniu dados de quatro aterros sanitários brasileiros. Os dados levantados referem-se à composição gravimétrica do RS doméstico, tempo de aterramento, STV (sólidos totais voláteis), teor de lignina, que foram utilizados como dados de entrada e volume de biogás e de metano gerados (dados de saída), para os aterros sanitários estudados. Utilizou-se a composição gravimétrica em base úmida (BU) para os RS domésticos pesquisados, uma vez que a maior parte das informações levantadas se apresenta desta forma. O STV e o teor de lignina correspondentes a esses resíduos foram obtidos em laboratório e, os volumes de biogás e de metano (CH₄) foram medidos nos aterros sanitários ou em biodigestores em escala de laboratório, conforme consta nos trabalhos pesquisados.

Os RSU estudados incluíram resíduos novos (RN), como sendo aqueles que ainda não tinham sido lançados nos aterros sanitários (tempo de aterramento igual a zero) e resíduos velhos (RV), com diferentes tempos de aterramento variando entre 3 meses e 10 anos.

Alguns dos dados levantados e utilizados nas planilhas para simulação com redes neurais artificiais (RNA), estão apresentados nas Tabelas 1 e 2, as quais foram separadas em aterros de grande porte (GP) e de pequeno e médio portes (PqMP), respectivamente.

Embora esses dados estejam apresentados em separado, de acordo com o porte dos aterros sanitários, para as simulações eles foram usados conjuntamente face a reduzida quantidade de informações levantadas para este trabalho.

Para o presente artigo, decidiu-se criar uma numeração própria a partir da identificação das amostras estudadas por cada autor pesquisado.

Tabela 1- Exemplo de parâmetros pesquisados para RS domésticos em aterros de Grande Porte (GP)

Identificação adotada neste artigo	Tempo de aterramento (anos)	Fração pastosa (%)	STV (%)	MO da Fração Pastosa (%)	Teor de Lignina (%)	Biogás (m ³ /Mg RSU)	CH ₄ (m ³ /MgRSU)
1C	2,33	33,66	17,87	6,02	13,02	17,36	10,79
2C	1,58	35,93	18,49	6,64	12,68	31,56	19,88
3C	1	33,93	12,35	4,19	6,99	11,45	7,22
4C	0,58	25,77	22,5	5,8	14,44	38,54	29,86
5C	0,5	33,65	12,7	4,27	6,39	32,57	25,23
6C	0,41	39,5	11,23	4,44	18,31	41,77	32,16
7C	0,24	28,99	14,65	4,25	10,71	16,03	9,84
RN – 1C	0,01	30,3	48,38	14,66	23,35	101,36	60,31
RN – 2C	0,01	28,86	53,73	15,4	18,59	132,61	81,81
RV – 1St	9	60,6	70	42,42	15	63,5	31,75
RV – 2St	7	41,6	70	29,12	15	43,5	21,75
RV – 1MI	0,01	29,11	75,31	21,92	23,57	190,8	95,4

Fonte: Caldas (2017); Santos (2017); Melo (2010)

Tabela 2- Exemplo de parâmetros pesquisados para RS domésticos em aterros de Pequeno e Médio Portes (PqMP)

Identificação adotada neste artigo	Tempo de aterramento (anos)	Fração pastosa (%)	STV (%)	MO da Fração Pastosa (%)	Teor de Lignina (%)	Biogás (m³/Mg RSU)	CH4 (m³/MgRSU)
RN - 1Car	0,01	38,45	42,48	13,86	14,02	91,72	63,47
RN - 2Car	0,01	60,52	49,24	24,68	31,83	78,65	58,88
RV - 1Car	1	18,2	15,08	3,03	9,88	105,40	57,76
RV - 2Car	1	24,82	17,21	4,3	16,92	50,56	38,66
RV - 3Car	10	5,13	17,17	0,92	14,9	12,07	8,93
RV - 4Car	10	9,35	15,1	1,46	14,38	15,12	11,26
RV - 3St	6	48,7	70	34,09	15	10,86	5,43
RV - 4St	6	44,9	70	31,43	15	41,26	20,63
RN - 1Lc	0,01	63	95,19	59,97	15	39,54	19,77

Fonte: Carvalho (2013); Santos (2017); Lucena (2016)

Uma vez reunidos esses dados, foi possível aplicar as RNAs e realizar o treinamento e validação, obtendo-se como resultado equações para previsão de produção de biogás e metano. Após o treinamento da rede e obtenção do modelo, foram inseridos dados de uma amostra de campo, não pertencente ao banco de dados inicial, obtendo-se resultados para validação. Foi utilizado um percentual de 70% dos dados para treinamento, 15% para validação e 15% para o teste.

Na simulação das redes, utilizaram-se diferentes caminhos para entrada de dados: a) composição gravimétrica em base seca (BS) com os demais dados, b) composição gravimétrica em base úmida (BU) com os demais dados e c) composição gravimétrica em base seca e úmida com os demais dados. Para cada um desses três caminhos, obtiveram-se as duas variáveis de saída - quais sejam, volume de biogás e de metano.

Para as RNAs foram utilizadas redes com 2 camadas no *Software Matlab 2015a*. A arquitetura da rede neural utilizada é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1: Tipos de algoritmos utilizados

Tipo de algoritmo	Levenberg–Marquardt	Bayesian Regulation	Levenberg–Marquardt	Bayesian Regulation
Quantidade de neurônios	25	25	30	30

A figura 1 mostra o esquema de funcionamento da RNA utilizada, com cinco entradas (composição gravimétrica do RSU, fração orgânica ou pastosa, STV, matéria orgânica – MO encontrada na fração orgânica ou pastosa, teor de lignina) e duas saídas (volumes de biogás e metano).

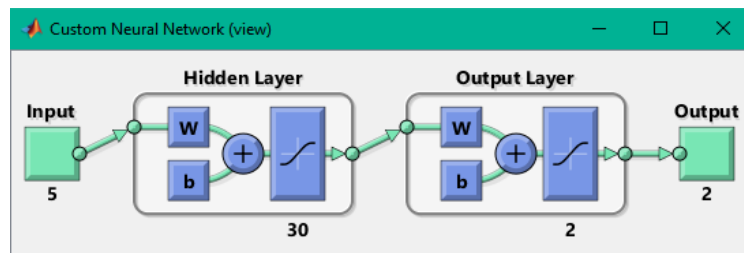


Figura 1 - Imagem esquemática da RNA utilizada com 5 entradas e 2 saídas

A figura 2 apresenta o esquema do treinamento de uma das redes utilizadas no Matlab.

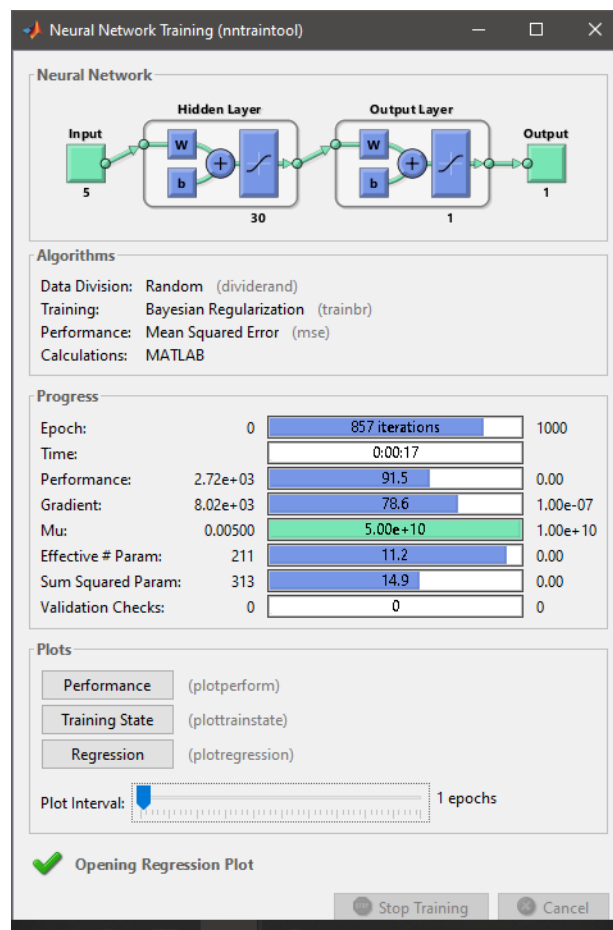


Figura 2 - Treinamento de uma das redes no Matlab

Para os trabalhos pesquisados, que não realizaram a medição de biogás e metano gerados nos aterros, decidiu-se utilizar a planilha do IPCC (2006) com o objetivo de gerar esses dados de saída. Para avaliar os resultados gerados na planilha, inicialmente utilizou-se os dados de entrada apresentados nas Tabelas 1 e 2. Em seguida, os resultados calculados foram comparados com os valores medidos, que se encontram também nas Tabelas 1 e 2, observando-se a dispersão dos dados, para verificar a possibilidade de utilizar essa planilha.

A planilha do IPCC (2006) aplica a equação de decaimento de primeira ordem e, para os cálculos, ela utiliza os seguintes parâmetros de entrada: quantidade de habitantes, composição gravimétrica do RSU, geração per capita de RSU, quantidade de RSU gerado anualmente e que é depositado no aterro sanitário, país, região. Estas informações foram encontradas nos trabalhos pesquisados. Para os demais parâmetros solicitados pela planilha, e que não foram encontrados nas publicações, adotou-se o valor padrão sugerido pelo IPCC (2006). São eles: carbono orgânico degradável, temperatura da região, fator de correção do metano, forma de manuseio na disposição final do RSU.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta os dados de entrada da amostra de campo, escolhida aleatoriamente, para validar e testar a equação gerada pela RNA.

Tabela 3 – Dados de entrada da amostra de campo aleatória

Tempo de aterramento (anos)	Fração pastosa (%)	STV (%)	MO da Fração Pastosa (%)	Teor de Lignina (%)
0,66	22,87	21,97	5,02	11,21

Na Tabela 4 apresentam-se a quantidade de biogás de campo comparada com o valor previsto pela RNA, nas primeiras tentativas.

Tabela 4 – Primeiros resultados de simulação da RNA

Dados da amostra de campo	Dados previstos pelo Modelo da RNA
Biogás (m ³ /Mg RSU)	Biogás (m ³ /Mg RSU)
49,78	52,38

Observa-se que os valores gerados através das redes neurais guardam certa similaridade com aqueles medidos em campo e laboratório, conforme se observa na Tabela 4. O resultado levemente aumentado para o biogás (5% superior) e abaixo (5% inferior) mostra um bom potencial de previsão com o uso da RNA. Essas diferenças podem ser atribuídas ao número reduzido de amostras no banco de dados utilizado, que ainda não é representativo.

A figura 3 apresenta os ajustes para as fases de treinamento, validação e teste.

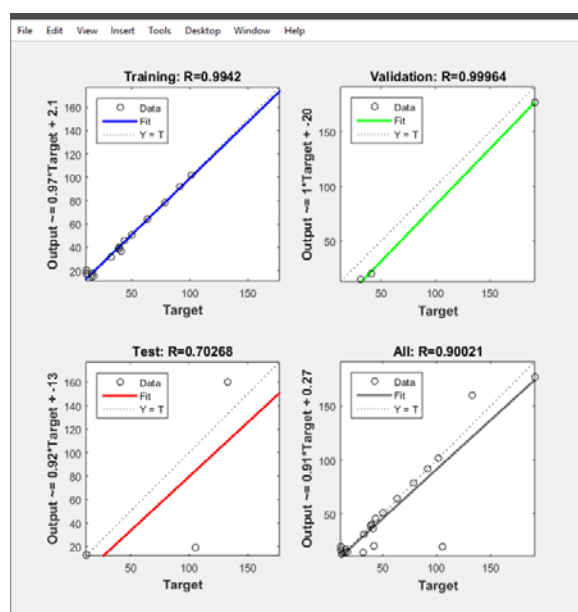


Figura 3 - Correlação e equações para treinamento, validação e teste

Na figura 3, observa-se que as fases de treinamento e validação dos dados apresentaram um ajuste muito bom com valores de “R” superiores a 0,99. Na fase de treinamento, obteve-se o modelo e, em seguida, as equações para previsão da geração de biogás e metano, a partir da qual realizou-se a validação. Por outro lado, a fase de

teste ainda apresenta um ajuste baixo com $R = 0,70268$, havendo necessidade de uma maior quantidade de dados.

No Quadro 2, está apresentada a série de dados da geração de biogás utilizando os diferentes tipos de algoritmos e neurônios.

Quadro 2 - Série de dados da geração de biogás

Amostras	Dados experimentais (m³ / MgRSU)	Levenberg–Marquardt 25 neurônios (m³ / MgRSU)	Bayesian Regulation 25 neurônios (m³ / MgRSU)	Levenberg–Marquardt 30 neurônios (m³ / MgRSU)	Bayesian Regulation 30 neurônios (m³ / MgRSU)
Amostra 1	17,36	19,09	23,82	15,39	23,22
Amostra 2	31,56	19,14	26,08	14,56	26,76
Amostra 3	11,45	18,45	22,21	16,95	27,19
Amostra 4	38,54	47,66	42,15	38,52	50,66
Amostra 5	32,57	20,67	24,13	31,22	30,95
Amostra 6	41,77	41,24	38,47	20,15	35,71
Amostra 7	16,03	29,98	31,12	17,03	38,94
Amostra 8	101,36	151,71	107,45	101,52	105,44
Amostra 9	132,61	133,79	135,73	159,96	137,86
Amostra 10	91,72	33,26	84,56	92,02	83,29
Amostra 11	78,65	78,94	78,55	78,40	78,94
Amostra 12	105,40	99,88	29,67	19,46	94,98
Amostra 13	50,56	44,37	38,57	50,88	35,95
Amostra 14	12,07	20,13	13,96	13,04	35,16
Amostra 15	15,12	16,93	13,47	14,45	23,21
Amostra 16	10,86	45,47	30,17	20,03	54,16
Amostra 17	41,26	41,72	37,52	36,53	50,32
Amostra 18	39,54	40,96	108,67	40,04	43,21
Amostra 19	63,50	63,15	12,91	63,96	58,63
Amostra 20	43,50	41,03	34,77	45,78	39,50
Amostra 21	190,80	183,23	178,30	176,86	175,32

Baseado nos resultados do Quadro 2, é possível observar que o algoritmo Levenber-Marquardt com 30 neurônios é o que fornece dados mais próximos dos resultados experimentais. Isto significa dizer que essa arquitetura mais se adaptou ao modelo de geração de biogás e acredita-se que é possível obter melhores aproximações, com a inserção de mais amostras e pequenos ajustes na rede neural usada.

A figura 4 mostra os resultados apresentados para a geração de biogás, utilizando os diversos algoritmos, em comparação com os resultados experimentais, para cada amostra estudada. Ou seja, a representação dos dados mostrados no Quadro 2.

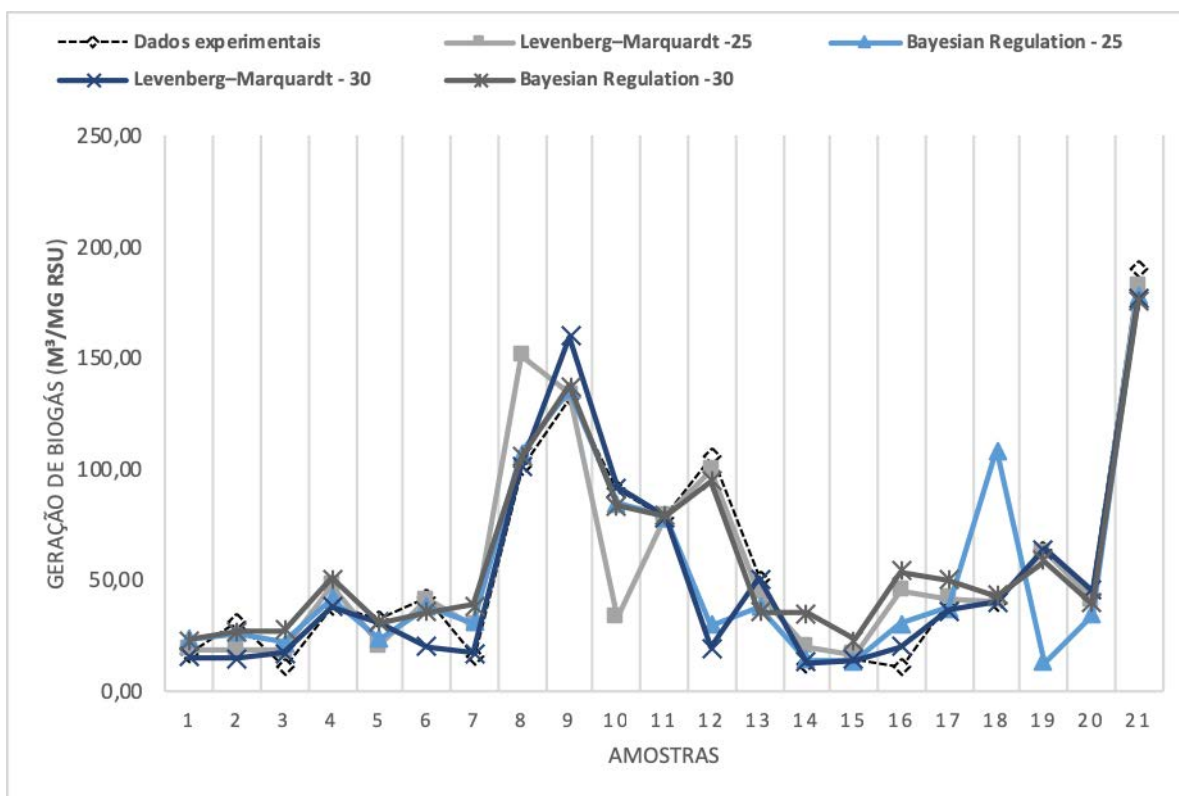


Figura 4 - Saída da rede neural com a comparação dos diferentes algoritmos

Os resultados apresentados na figura 4 são bastante promissores, mostrando uma boa aproximação entre os dados experimentais e os algoritmos utilizados, para a maior parte das amostras estudadas. Entretanto, há a necessidade de formação de um banco de dados com maior quantidade de informações, para se obter uma amostra representativa dos processos envolvidos com a geração do biogás e do metano a partir dos RSU e, alcançar um ajuste adequado.

CONCLUSÕES

A necessidade de se aumentar a eficiência da gestão de RS torna imprescindível o uso constante de ferramentas computacionais, entre as quais as redes neurais mostram aplicabilidade muito boa. Este instrumento, em condições bem delimitadas, decerto traz contribuições muito úteis para que sejam previstas situações a serem devidamente avaliadas, quanto aos potenciais de aproveitamento econômico e de mitigação de impactos ambientais.

Embora com quantidade de dados de entrada ainda limitados, obteve-se um cenário de similaridade entre os valores medidos em campo e os valores calculados com a RNA. Além disto, vale ressaltar que a modelagem está sendo realizada com 5 parâmetros de entrada disponíveis até o momento e 2 de saída, havendo necessidade de aumentar essa quantidade por meio da introdução de novos parâmetros, como carbono orgânico degradável (COD) e carbono orgânico a ser degradado em condições anaeróbias (COD_f). Além disto, é imprescindível o levantamento de trabalhos, que apresentem medições de volume de biogás e metano em campo.

As variações encontradas entre os dados obtidos das medições em campo e laboratório e, aqueles gerados pela simulação de cálculo mostram bom potencial de previsão. Algumas diferenças encontradas nos resultados precisam ser ajustadas, a partir da utilização de um banco de dados com maior quantidade de informações. Essas diferenças não invalidam a utilização das RNA como instrumento, para determinar as quantidades de biogás geradas, sob condições controladas que devem prevalecer nos aterros sanitários. Ao contrário, este estudo confirma a pertinência do uso de redes neurais no levantamento, com razoável precisão, daquelas quantidades reforçando a recomendação deste procedimento. A popularização desta ferramenta, que pode

gerar equações para previsão de biogás e metano, vai contribuir para aumentar o aproveitamento desse sub-produto, satisfazendo de maneira ambientalmente adequada parte das demandas de energia.

A utilização da planilha do IPCC (2006), para gerar os dados de biogás e metano que faltavam na literatura pesquisada, ainda requer cuidados e ajustes para conseguir representar as situações estudadas. Os processos de geração de biogás em aterros sanitários são bastante complexos e as medições realizadas em campo e em laboratório apresentam dispersão significativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZEVEDO, F. M.; BRASIL, L. M. e OLIVEIRA, R. C. L. *Redes neurais com aplicações em controle e em sistemas especialistas*. Florianópolis: Visual Books Editora, 2000, 401p.
2. BRITTO, M. L. C. P. S. de. Taxa de Emissão de Biogás e Parâmetros de Biodegradação de Resíduos Sólidos Urbanos no Aterro Metropolitano Centro. 185p. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo. Ênfase em Produção Limpa). Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2006.
3. CALDAS, Átila. Produção de Metano em Aterro Sanitário: Influência das Técnicas Operacionais no Aterro Metropolitano em Salvador - Ba. 263 p., Tese (Doutorado - Doutorado em Ciências, Energia e Ambiente) - Universidade Federal da Bahia, Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente, Salvador, 2017.
4. CARVALHO, J. L. V. de Carvalho. Estimativa energética e recuperação de metano de RSU por digestão anaeróbia e poder calorífico: Estudo de caso Barreiras – BA. 128 p., Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.
5. CINTRA, I. S. Estudo da Influência da Recirculação de Chorume Cru e Chorume Inoculado na Aceleração do Processo de Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos. 352p., Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, 2003.
6. FIRMO, A. L. B. Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2013.
7. HAYKIN, S. *Redes Neurais: Princípios e prática*. Porto Alegre (RS): Editora Brookman, 2001. 900p.
8. IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change (2006).
9. LUCENA, T. V. de. Avaliação da Geração de Biogás sob diferentes condições de Biodegradação de Resíduos Alimentares. 132p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2016.
10. MELO, E. S. R. L. de. Análise de Biodegradabilidade dos Materiais que compõem os Resíduos Sólidos Urbanos através de Ensaios BMP (Biochemical Methane Potential). Dissertação de Mestrado. UFPE-CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 148p., 2011.
11. SANTOS, M. M.; ROMANEL, C.; van ELK, A. G. H. P. Análise da Eficiência de Modelos de Decaimento de Primeira Ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros. Artigo Técnico. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, no. 6, pp. 1151-1162, 2017.