

# USO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS EM UMA ETAPA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ALUMINA PARA AUXÍLIO DO CONTROLE AMBIENTAL

**Ruy Gomes Silva**

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR  
[ruyrqs@gmail.com](mailto:ruyrqs@gmail.com)

**Maria Teresinha Arns Steiner**

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR  
[maria.steiner@pucpr.br](mailto:maria.steiner@pucpr.br)

## RESUMO

O principal processo de extração de Alumina da bauxita foi desenvolvido em 1858 por Le Chatelier e aperfeiçoado posteriormente em 1888 por Karl Bayer, sendo conhecido atualmente como processo *Bayer*. Tal processo utiliza como principal insumo a soda cáustica que, em determinadas condições de temperatura e pressão, reage quimicamente na bauxita e realiza a extração da alumina. Porém este processo gera rejeito denominado de lama vermelha que contém resíduos de soda cáustica. Tal rejeito é depositado em bacias de contenção, a céu aberto, preparadas para tal fim. Cada empresa deste ramo, mesmo que utilize o mesmo processo de extração, tem um diferente valor de concentração de soda cáustica no rejeito, devido as melhorias tecnológicas implementadas por cada unidade fabril. Estima-se um valor de 15g/l de soda cáustica para cada tonelada de rejeito gerado. Assim sendo, este trabalho tem por objetivo utilizar, inicialmente, a técnica de Redes Neurais Artificiais para o Reconhecimento dos Padrões (RP) dos diferentes teores de soda cáustica gerados pelas diferentes entradas. Com a realização deste RP, pretende-se construir, então, um modelo matemático capaz de minimizar o teor cáustico contido no rejeito, através da melhor combinação entre variáveis de entrada do processo. Assim, ter-se-á o aumento da eficiência de todo o processo, possibilitando o reaproveitamento da lama vermelha na indústria, como na fabricação de cerâmica na indústria civil, ou como componente do concreto obtendo-se, como consequência, a minimização dos impactos ambientais gerados pela mesma. As RNA apresentaram resultados bastante satisfatórios para o RP.

**Palavras-chave:** Redes Neurais Artificiais. Alumina. Processo Bayer.

## ABSTRACT

The main process of extracting alumina from bauxite which was developed in 1858 by Le Chatelier and later perfected in 1888 by Karl Bayer, is currently known as the Bayer process. This process uses the caustic soda as a raw material, that under certain conditions of temperature and pressure, chemically reacts in bauxite and extract the alumina. However, this process generates waste called red mud residues containing caustic soda. Such waste is deposited into catch basins in an open place outside the factory, which is prepared to this purpose. Each company, even use the same extraction process, has a different amount of caustic soda concentration in waste, due to technology improvements implemented by each plant. It is estimated a value of 15g / l of caustic soda per ton of generated waste. Therefore, this study aims to use initially the technique of Artificial Neural Networks for Recognition of Patterns (RP) of different concentrations of caustic soda generated by different inputs. By performing this RP we intend to build, a mathematical model capable of minimizing the caustic content contained in the waste through the best combination of input variables of the process. Thus, it will increase the efficiency of the whole process, allowing the reuse of the red mud in the industry, such as in the manufacture of ceramic or concrete component. The reuse will allow the reduction of the environmental impact generated by these industries. The RNA showed satisfactory results for the RP.

**Keywords:** Artificial Neural Networks. Alumina. Bayer process.

## 1. INTRODUÇÃO

A humanidade vem buscando, ao longo do tempo, formas mais eficientes para executar as atividades de seu dia-a-dia, com o objetivo de reduzir esforços, proporcionar conforto, segurança, saúde, lazer, dentre outros. Segundo Loesch e Heim (1999), “A otimização faz parte da índole humana”. As organizações produtoras desempenham um papel fundamental nesta busca, pois é através de seus produtos e serviços que a humanidade vem desfrutando de melhores condições de vida.

Porém realizar uma otimização, independentemente do processo, não é uma tarefa simples, pois poderemos nos deparar com variáveis qualitativas e quantitativas, que podem ou não estarem correlacionadas e, para isso, existem inúmeras técnicas que auxiliam este processo.

Em processos com sistemas de controle complexos, é possível a utilização de técnicas de Reconhecimento de Padrões (RP) como, por exemplo, Redes Neurais Artificiais (RNA), pelo fato de possuírem uma capacidade de modelar sistemas complexos lineares ou não, e também por possuírem mecanismos de aprendizagem. Por este motivo, as RNA foram idealizadas como uma boa técnica a ser utilizada em controles de processos adaptativos, principalmente em plantas sujeitas a incertezas nos controles das variáveis e dos processos (CAMPOS e SAITO, 2004).

Um dos segmentos industriais que tem como principal característica a utilização de fenômenos físico-químicos para a obtenção de seu produto, é a indústria do alumínio, que segundo Luz e Lins (2005) é o terceiro elemento em abundância na crosta terrestre.

Para a obtenção do alumínio metálico existe uma etapa muito importante, que é a retirada do óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) da rocha de bauxita. O processo mais utilizado industrialmente para este fim é o Processo Bayer, que consiste em misturar a bauxita moída a uma solução de soda cáustica, com a qual a mesma reage sob pressão e temperatura (LUZ e LINS, 2005). Dentro do complexo processo de extração da alumina destaca-se a “Lavagem e Filtração da lama vermelha”, que tem como principal finalidade, a retirada de solução de aluminato de sódio contido no rejeito (lama vermelha) antes de seu descarte.

Os filtros rotativos que compõem o processo de lavagem da lama vermelha operam com a utilização de uma grande quantidade de variáveis, que combinadas promovem a retirada de soda cáustica desta lama que, em seguida, é transferida para uma bacia de contenção exposta preparada para tal fim. Existem ferramentas que empregam métodos exatos de Programação Matemática capazes de nos mostrar de forma quantitativa, a melhor solução para a utilização de variáveis de entrada em um processo produtivo, buscando a maximização de sua eficiência. Este trabalho tem por objetivo utilizar, inicialmente, uma RNA para reconhecer no rejeito de um processo de produção de alumina, a Lama Vermelha, os diferentes teores de soda cáustica gerados pelas diferentes entradas. Realizado este RP, pretende-se construir, então, um modelo matemático capaz de minimizar o teor cáustico contido no rejeito, através da melhor combinação entre variáveis de entrada do processo minimizando, desta forma, o teor de soda cáustica contida na lama vermelha.

Para isto, o presente trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2 apresenta-se o conceito do processo de fabricação de alumina, bem como o processo de lavagem da lama vermelha, tratando da problemática aqui abordada. Na seção 3 são abordados alguns trabalhos correlatos, mostrando como outros autores trabalham com a técnica de RNA em problemáticas diversas. Nas seções 4 e 5, apresentam-se o referencial teórico e os resultados obtidos com o uso do RP, respectivamente e, na seção 6, estão as considerações finais deste artigo.

## 2. PROCESSO E PROBLEMA

Nesta seção são apresentados os principais conceitos do processo de fabricação de alumina bem como o processo lavagem da lama vermelha e suas variáveis que envolvem a problemática aqui abordada.

### 2.1. O PROCESSO BAYER

Nos dias de hoje, o processo de industrialização tem como objetivo principal o crescimento industrial, proporcionando com isso uma melhor qualidade de vida para a população. Dentre os processos industriais, este estudo enfoca o processo de uma refinaria de alumina, denominado Processo *Bayer*.

Segundo Bliss (1993), o Processo *Bayer* é, atualmente, o único processo economicamente viável para a produção de alumina. Desenvolvido pelo químico austríaco Karl Joseph Bayer, em 1889, o invento é de grande valor para as refinarias de alumínio, pois necessita do óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) a Alumina, produto final do Processo *Bayer*, para a produção do alumínio metálico.

Segundo a ALCAN (1994), a química do Processo *Bayer* consiste em digerir a bauxita com solução de soda cáustica ( $NaOH$ ), na presença de aluminato de sódio (soda cáustica) em altas temperaturas ( $150$  à  $250^\circ C$ ) e pressão elevada ( $8$  à  $12$  kgf) para solubilização dos minerais que contém alumina ( $Al_2O_3$ ). Nestas condições, a bauxita dissolve-se formando uma solução de aluminato de sódio ( $Na_2O \cdot Al_2O_3$ ), enquanto as impurezas permanecem na fase sólida conhecida como “lama vermelha”.

O Processo *Bayer* para a produção de alumina está dividido em etapas e o mesmo sendo válido para qualquer outra que utilize esse processo. A Figura 1, a seguir, representa as etapas de todo o processo.

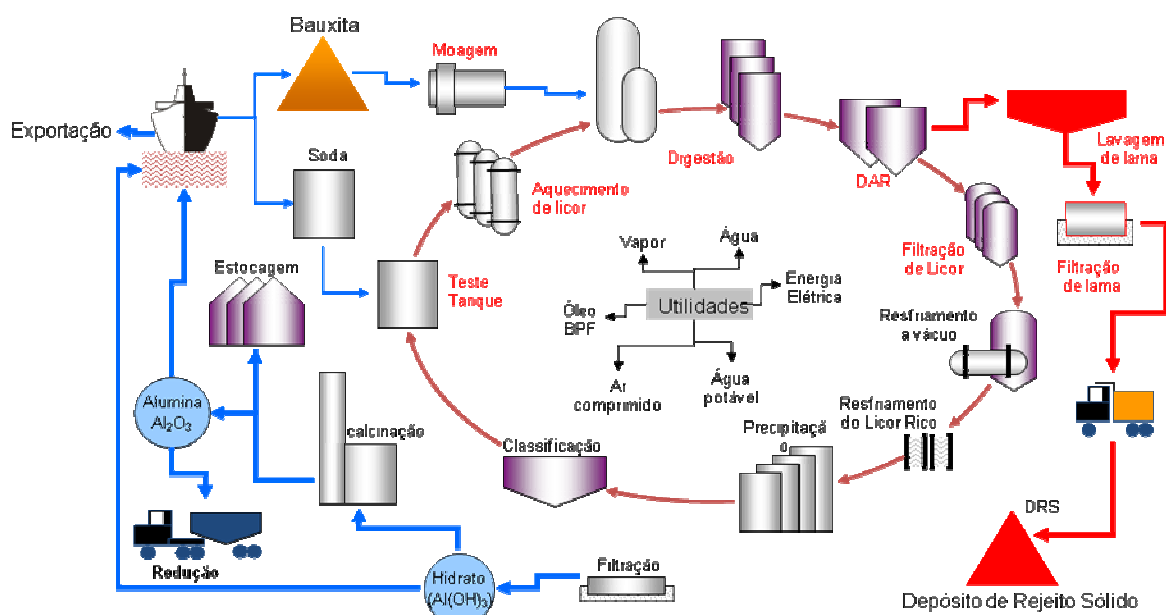


Figura 1. Fluxograma das etapas do processo Bayer

Fonte: Adaptado de IAI (2013)

### 2.2. PROBLEMÁTICA

A lama vermelha, antes de ser descartada na bacia de rejeito sólido, passa por um processo de lavagem a fim de reduzir ao máximo a concentração cáustica contida na mesma. Para a lavagem da lama vermelha, uma série de variáveis são combinadas visando o melhor desempenho possível da atividade, sendo que tais variáveis serão descritas a seguir.

**Densidade da Polpa de lama:** Representa a quantidade de sólido e líquido que o produto contém, e pode ser manipulada por intermédio de adição de condensado durante o bombeamento do processo de decantação para o processo de lavagem de lama.

**Vácuo:** O sistema de vácuo tem como principal objetivo formar uma camada da lama vermelha na parte externa do filtro rotativo, sendo o vácuo é uma pressão negativa, ele succiona o condensado que lavou a lama e transfere para um tanque de armazenagem.

**Nível da Bacia de Lama:** O filtro rotativo fica parcialmente submerso em uma bacia que contém a polpa de lama para facilitar a aderência da mesma no filtro.

**Rotação do Filtro:** Os filtros são cilíndricos e possuem uma rotação variável e recebe a lama para a lavagem.

**Condensado:** A água que realiza a lavagem da lama vermelha é reaproveitada do processo de resfriamento da polpa, que gera vapor e após resfriar transforma-se em condensado que é lançado sobre o filtro com a lama vermelha.

**Teor Total de Soda (TTS):** Refere-se à quantidade de soda cáustica que a polpa de lama vermelha contém antes de entrar no processo de lavagem.

De posse dessas informações, pode-se inferir que este conjunto de variáveis combinadas de tal forma resultará no bom desempenho do processo de lavagem da lama vermelha. Na Figura 2, a seguir, ilustra-se o filtro rotativo com as variáveis que o envolve.

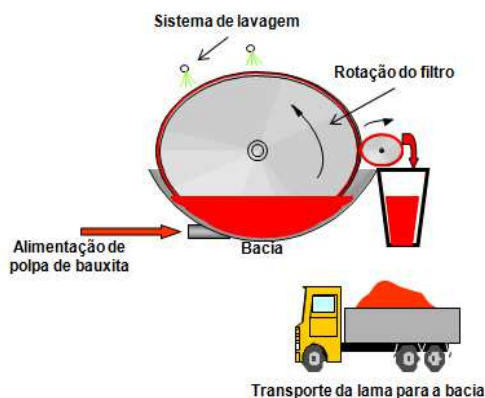


Figura 2 – Processo de lavagem da lama vermelha.  
Fonte – Autores (2013).

A Figura 3, a seguir, apresenta uma bacia de contenção de lama vermelha de uma empresa refinadora de bauxita, denominada de Depósito de Rejeito Sólido (DRS), onde se observa a área desmatada que é destinada ao acondicionamento da lama vermelha, que já toma grandes dimensões.



Figura 3 – Depósito de rejeito sólido.  
Fonte: Souza (2010).

Os DRS's são planejados de tal forma que não tenha contato direto com o solo. Há um revestimento no fundo da bacia com um material de polipropileno, com objetivo de evitar contaminação ambiental, pois como ela fica exposta ao meio ambiente, em períodos chuvosos, a água da chuva sofreria contaminação e poderia contaminar o lençol freático.

Este desmatamento poderá ser amenizado, caso esta lama vermelha seja reaproveitada em outro processo de fabricação, porém devido ao elevado volume de soda cáustica contida e também, a sua instabilidade, torna-se inviável tal processo.

Rossi *et al.* (2008), Souza (2010) e Macêdo *et al.* (2011)) realizaram estudos objetivando o reaproveitamento da lama vermelha em outros processos produtivos. A Figura 4, a seguir, apresenta uma casa construída com tijolos feitos com uma mistura de 60% de lama vermelha.



Figura 4 – Casa construída com resíduo do processo Bayer.

Fonte: Souza (2010).

Assim, objetivando um melhor controle e previsão do teor cáustico na lama vermelha e com a possibilidade de atuação nas variáveis de entrada, pode-se reduzir ao máximo este valor, fazendo com que a lama vermelha possa ser aproveitada economicamente, reduzindo os impactos ambientais. Por meio desse estudo, pretende-se implantar uma nova metodologia para o monitoramento e previsão de resultados, a partir da concepção de um modelo matemático baseado em análise do comportamento das variáveis de controle.

### 3. TRABALHOS CORRELATOS

Esta seção apresenta, de forma bem resumida, alguns trabalhos que têm utilizado a técnica da RNA, como ferramenta de predição, em variados tipos de problemáticas. Com isso, este artigo também segue a mesma linha de objetivo em realizar a predição em um processo de uma indústria química.

Fontes e Mendes (2008) desenvolveram, com base em uma estratégia de controle preditivo não linear aplicada a um reator tanque agitado de polimerização em lama para a produção de polietileno de alta densidade. O desempenho do controle analisado no sentido de se obter o peso molecular médio numérico, composição de comonômero e temperatura desejados, foi realizado através de um algoritmo de controle baseado em RNA do tipo *feedforward*. Os resultados de simulação mostram o bom desempenho do algoritmo baseado em um modelo neural treinado para a predição da variável de saída.

Oliveira *et al.* (2010) aplicaram as técnicas de RNA na previsão da produção de álcool no Brasil no ano de 2006, a partir de dados de produção dos anos anteriores. A previsão de produção de álcool favorece uma tomada de decisão no sentido de planejar o volume de estoque para o consumo ao longo dos períodos subsequentes. Os resultados obtidos por este

método foram comparados com os obtidos utilizando técnicas de séries temporais, sendo que os resultados com as RNA foram mais satisfatórios.

Baptistella *et al.* (2007) objetivando a estimação de valores venais de imóveis na cidade de Guarapuava, PR, utilizaram a técnica de RNA fazendo uso de dados do cadastro imobiliário fornecidos pelo setor de Planejamento da Prefeitura Municipal. As RNA desenvolvidas foram do tipo *feedforward*. Os resultados obtidos, quando da separação por setores, foram melhores em relação ao modelo sem tal separação, ou seja, quando setorizou-se a amostra, tanto os erros de treinamento quanto de testes, foram significativamente melhores.

#### 4. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As RNAs podem ser definidas como ferramentas computacionais que utilizam modelagem matemática baseada nos conceitos do funcionamento dos neurônios dos seres humanos. Segundo Haykin (2005), uma RNA pode ser vista como uma máquina adaptativa com capacidade de aprendizagem, graças à interligação maciça de células computacionais denominadas neurônios. O mesmo autor diz que uma RNA pode ser definida ainda como “um processador paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, que tem a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso”.

Uma RNA funciona baseada na estrutura do cérebro humano que é responsável pela execução das funções sensoras, motoras e autônomas do corpo, além das emoções, pensamento e percepção. O cérebro com suas redes de neurônios tem ainda a capacidade de reconhecer padrões, armazenar conhecimento através de experiências e interpretar observações (BRAGA *et al.*, 2000).

As unidades de processamento, denominadas neurônios artificiais, são programadas para realizar cálculos matemáticos baseados em funções. Segundo Braga *et al.* (2000), estas unidades são dispostas em uma ou mais camadas interligadas por um grande número de conexões normalmente unidirecionais. Um neurônio artificial é uma versão simplificada de um neurônio biológico, que utiliza modelagem matemática para realização das funções. Eles possuem  $n$  terminais de entrada e um terminal de saída. Para simular o efeito da sinapse são atribuídos pesos na conexão de entrada que podem ter valores variados. Para a ativação do neurônio é utilizada uma função que ativa ou não na sua saída, dependendo dos valores obtidos com o resultado desta função. A Figura 5 ilustra a descrição de um neurônio artificial.

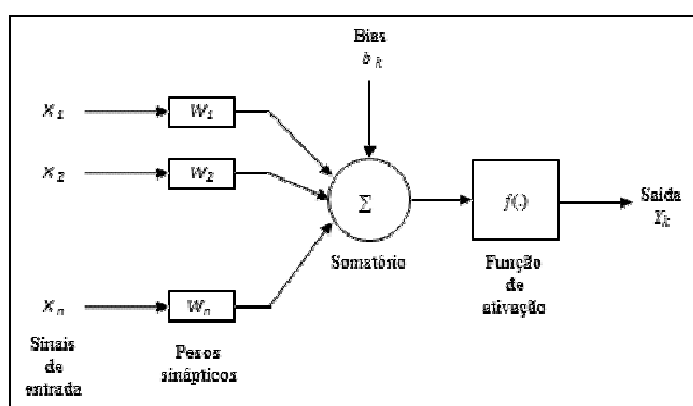


Figura 5 – Modelo de um neurônio artificial.

Fonte: Haykin (2005).

**Entrada:** Os sinais de entrada representados por  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_n$  conectados ao neurônio são multiplicados pelos pesos sinápticos  $W_1$ ,  $W_2$  e  $W_n$  respectivo a cada sinal de entrada. Os pesos sinápticos podem assumir valores negativos e são responsáveis pelo ajuste dos dados de entrada para correção dos erros no valor de saída.

**Somatório:** Realiza o somatório dos sinais de entrada, ponderados pelas respectivas sinapses. Ele conta ainda com a entrada de um *bias* que tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada da função de ativação.

**Função de ativação:** A função de ativação tem por finalidade restringir a amplitude da saída de um neurônio em um intervalo de valor finito, normalmente com valor unitário  $[0,1]$  ou  $[-1,1]$  determinando a relação entre a entrada e saída do neurônio.

A estruturação de uma RNA está relacionada com o tipo de algoritmo de treinamento que vai ser usado. De acordo com a estrutura de ligações dos neurônios de uma RNA, têm-se tipos diferentes de arquiteturas. Segundo Haykin (2005), existem três classes de arquiteturas de redes diferentes, são elas: redes de camada única, redes de múltiplas camadas e redes recorrentes.

As redes de camada única são formadas por uma camada de entrada de nós e uma camada de saída de neurônios. A camada de entrada projeta sobre a camada de neurônios em sentido único. Braga *et al.* (2000) enfatizam que as redes de camada única só são capazes de resolver problemas linearmente separáveis. Nas redes de camada única só existe um nó entre qualquer entrada e qualquer saída da rede.

Uma das RNA mais utilizadas, segundo Campos e Saito (2004), é a RNA multicamadas com o algoritmo de retropropagação do erro (*backpropagation*) para a aprendizagem. Seu desenvolvimento alavancou o uso das RNA por permitir a sua utilização em estruturas mais complexas, que são capazes de resolver problemas que não podiam ser tratados por outros tipos de redes.

As redes de multicamadas são formadas por mais de uma camada de neurônios entre alguma entrada e uma saída da rede. Ela “se distingue pela presença de uma ou mais camadas ocultas, cujos nós computacionais são chamados correspondentemente de neurônios ocultos ou unidades ocultas” (HAYKIN, 2005).

A camada oculta tem a função de interagir entre a camada dos nodos de entrada e a camada de saída da rede. Estas camadas ocultas não fazem parte da entrada ou da saída da RNA, por isso são denominadas ocultas.

Segundo Haykin (2005), os sinais de entrada se propagam para frente através da rede, camada por camada. Os nós da fonte da camada de entrada fornecem os padrões de ativação para os neurônios da segunda camada. Os sinais de saída da segunda camada são utilizados como entrada para a terceira camada, e assim sucessivamente para o restante da rede. O conjunto de sinais de saída da camada final de neurônios da rede constitui a resposta para os padrões de entrada na primeira camada de nós de ativação.

Uma das características que chama a atenção na RNA é a capacidade de aprendizagem, que é feita através de treinamento, tomando como base os valores das variáveis de entrada e os resultados das variáveis respostas. “A capacidade de aprender através de exemplos e de generalizar a informação aprendida é, sem dúvida, o atrativo principal da solução de problemas através das RNAs” (BRAGA *et al.*, 2000).

O processo de aprendizagem de uma RNA inicia-se pela formação do banco de dados que, de acordo com Campos e Saito (2004), pode ser dividido em dois conjuntos, sendo um conjunto para o treinamento, que deve corresponder de 80 a 90% dos dados, e um segundo conjunto para testes e validação da rede com 10 a 20% dos dados. O banco de dados para o treinamento da rede deve ter tamanho suficiente para conter todas as condições possíveis do processo operacional para garantir que o treinamento da rede seja abrangente. O mesmo critério deve ser observado com o conjunto de dados para a avaliação da rede.

São muitos os algoritmos de aprendizagem para o treinamento de uma RNA, que podem ser divididos em dois grupos distintos, Aprendizagem Supervisionada e Aprendizagem não supervisionada. O algoritmo *backpropagation* é um algoritmo supervisionado que utiliza pares (entrada, saída desejada) que, por meio de um mecanismo de correção de erros (algoritmo *backpropagation*), ajusta os pesos da rede (BRAGA *et al.*, 2000).

De acordo com Braga *et al.* (2000), o treinamento acontece em duas fases. A propagação *forward* que é utilizada para definir a saída da rede utilizando o padrão de entrada e a propagação *backward* que utiliza a saída obtida pela rede e a saída desejada para realizar as devidas atualizações dos pesos.



## 5. OBTENÇÃO DOS RESULTADOS

O procedimento de amostragem da pesquisa será feito através de observação sistemática, pois conforme Silva e Menezes (2005), este tipo de coleta de dados tem planejamento e realiza-se em condições controladas de forma que os resultados sejam de acordo com o pré-estabelecido.

Uma série de amostras foram coletadas e filtradas pelo especialista de processo da referida área, que os identificou como sendo os atributos de entrada e a variável de saída, em seguida realizado um breve tratamento estatístico para retirada dos *outliers*.

Cada grupo de dados coletados para este estudo obedeceu todos os critérios de coleta de amostra da empresa, a fim de evitar falhas ou erros de leitura nos instrumentos. A Tabela 1, a seguir, mostra um exemplo de como os dados foram ordenados e que serviram de base para a aplicação da RNA. As amostras foram coletadas diariamente (três por dia), sempre em horários pré-estabelecido pelo especialista, perfazendo um total de 400 amostras.

Os seis atributos (entradas), apresentados na referida Tabela 1 foram: Densidade (X1), Vácuo (X2), Nível de Bacia (X3), Rotação (X4), Condensado (X5) e Teor Total de Soda (TTS) (X6). Nesta Tabela 1 é apresentada, também, a variável de saída, ou seja, a Concentração de Soda Cáustica na da lama vermelha (Y).

	Densidade (gl/cm <sup>3</sup> )	Vácuo (kgf)	Nível de Bacia (%)	Rotação (RPM)	Condensado (m <sup>3</sup> /h)	TTS (g/l)	Concentração (g/l)
N	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y
1	1,49	0,51	26	1,6	24,8	66,6	5,9
2	1,54	0,49	19	1,9	26,0	53,8	9,1
3	1,54	0,46	17	1,9	25,8	45,2	8,6
4	1,43	0,44	20	2,1	24,0	58,8	8,2
5	1,52	0,42	18	2,1	23,8	60,	8,2
6	1,49	0,35	24	2,2	26,0	49,	10,2
7	1,49	0,4	22	2,2	25,2	52,2	10,3
8	1,47	0,35	21	2,3	24,1	55,8	10,8
9	1,48	0,33	21	2,2	22,6	60,	11,4
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
393	1,44	0,31	22	2,1	19,4	89,4	12,2
394	1,49	0,32	20	2,1	20,0	90,9	12,7
395	1,51	0,32	20	2,4	19,9	91,7	13,2
396	1,53	0,32	20	1,9	19,0	80,1	13,6
397	1,56	0,32	20	1,9	22,6	86,9	12,7
398	1,51	0,31	21	2,0	23,6	79,	11,4
399	1,54	0,38	23	1,8	21,9	77,4	10,0
400	1,53	0,4	23	1,8	20,6	81,1	8,7

Tabela 1 – Dados referente ao processo de lavagem de lama

Fonte – Autores (2013)

Foi, então, desenvolvida uma RNA de multicamadas, utilizando o algoritmo *backpropagation* onde se têm os seis neurônios na camada de entrada; um número variável nas camadas oculta/intermediária e um neurônio na camada de saída. Para a construção/treinamento da rede utilizou-se 70% do total de amostras e os demais 30% para os



testes. Foram realizadas 10.000 épocas (iterações) como condição de parada. A Figura 6, a seguir, mostra a configuração da RNA realizada neste trabalho.

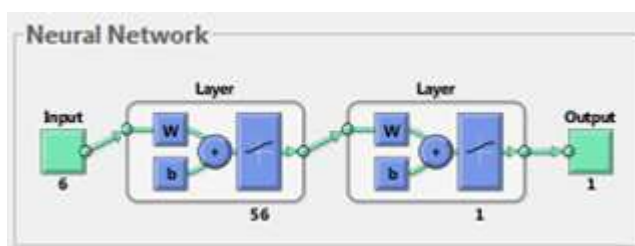


Figura 6 – Configuração da RNA.  
Fonte: Autores (2013).

O erro médio obtido pela RNA, após o seu treinamento, consiste na diferença entre os valores reais de soda cáustica contidos na lama vermelha ( $V_r$  ou “Concentração” da Tabela 1) e os valores estimados pela RNA ( $V_e$ ) com o banco de dados dos 30% reservados à validação da rede. Os dados demonstram uma forte tendência dos resultados estimados pela RNA apresentarem na maioria das simulações valores aproximados dos valores reais.

O erro médio quadrático (EQM) foi calculado de acordo com a equação (1) a seguir, onde  $n$  é o número de padrões utilizados ( $n = 280$  para o treinamento e  $n = 120$  para o teste).

$$EQM = \frac{\sum(V_r - V_e)^2}{n} \quad (1)$$

Para a resolução do problema aqui apresentado, utilizando as RNA, fez-se uso do *Neural Network Toolbox* do Matlab® R2011b, pacote que contém soluções para redes neurais com funções já definidas, na tabela 2 a seguir mostra-se os parâmetros utilizados na construção da rede.

Parâmetros	Valor
Taxa de aprendizagem	0,8
Taxa de momento	0,8
Neurônios da camada de entrada	6
Neurônios da camada oculta	56
Neurônios da camada de saída	1
Função de transferência da camada oculta	Logística
Função de transferência da camada de saída	Logística

TABELA 2 – Parâmetros de treinamento da RNA  
Fonte: Autores (2013).

A Figura 7, a seguir, apresenta o ajuste realizado pela RNA com os dados de entrada em relação aos dados de saída durante a fase de treinamento da rede, demonstrando a boa aderência dos dados para a estimativa dos valores na fase de simulação.

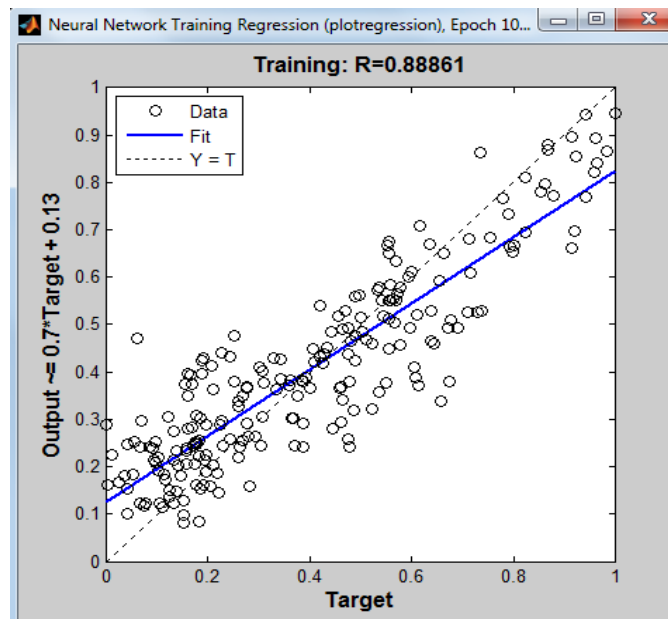


Figura 7 – Configuração da RNA.  
 Fonte: Autores (2013).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados na seção 5 anterior mostram a possibilidade do uso de uma RNA para predição da concentração cáustica na lama vermelha. A análise gráfica obtida pela resposta da rede treinada permite inferir que os valores previstos pela RNA em sua grande maioria consegue retratar os valores reais do processo conforme podemos visualizado na Figura 8, a seguir.

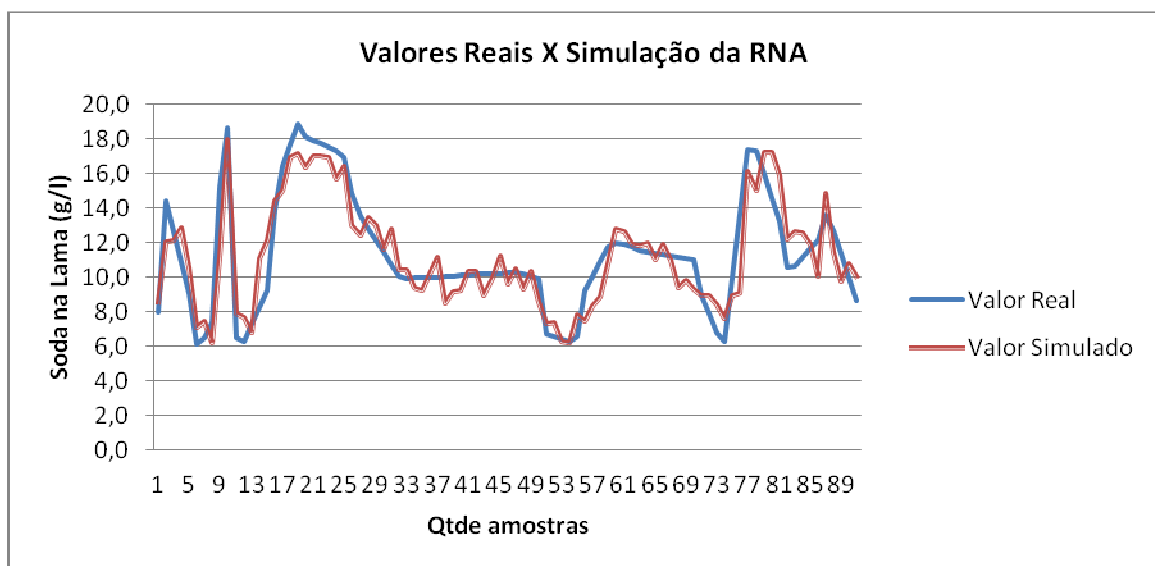


Figura 8 – Gráfico dos valores reais com os valores previstos pela RNA.  
 Fonte – Autores (2013)

Após a simulação, a RNA usada conseguiu gerar valores aproximados aos dados reais com um bom desempenho. Comparando as saídas dos dados reais com os dados simulados obteve-se um erro médio quadrático calculado de 0,0222, dentro do intervalo de especificação do processo para os limites de segurança verificados previamente. Desta forma, tem-se demonstrado o fato das RNAs serem uma ferramenta bastante adequada para o tratamento do problema aqui abordado.

Pretende-se utilizar, ainda, outras técnicas para o RP para o problema aqui abordado, verificando qual delas conseguirá obter o mínimo erro, além da construção do referido modelo matemático que deverá fazer uso da técnica com o melhor desempenho.

Com isso o rejeito da produção de alumina terá a possibilidade de ser utilizada em outros processos produtivos como o exemplo da construção civil. Tal ferramenta também auxilia a tomada de decisão tornando o processo mais eficaz, sendo que com a possibilidade de prever e resultado, a equipe de operação poderá tomar ações pró-ativas.

## REFERÊNCIAS

- ALCAN. Introdução ao Processo Bayer: *manual de operação*, Ouro Preto, Minas Gerais. 1994.
- BAPTISTELLA, M; CUNICO, L. H. B; STEINER, M.T.A. O Uso de Redes Neurais na Engenharia de Avaliações: Determinação dos Valores Venais de Imóveis Urbanos. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, Vol.9 nº 2, Jul/Dez 2007.
- BLISS, N.W. Curso Processo Bayer: Bauxita, *Canadá: Alcan Internacional*: v, 1, 1993.
- BRAGA, A, P; LUDEMIR, T.B; CARVALHO, A.C.P.L. Redes Neurais Artificiais: *Teoria e Aplicações*. LTC – Livros Técnicos e Científicos / Editora S.A. – Rio de Janeiro, 2000.
- CAMPOS, M.M; SAITO, K. Sistemas inteligentes em controle e automação de processos. *Rio de Janeiro*: Editora Ciência Moderna Ltda, 2004.
- FONTES, C.H; MENDES, M.J. Nonlinear predictive control of an industrial slurry Reactor. *Revista Controle & Automação*, Vol.19 no.4/Outubro, Novembro e Dezembro 2008.
- HAYKIN, S. Redes Neurais: *Princípios e Práticas*; trad. Paulo Martins Engel. – 2. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2005.
- INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE (IAI) <<http://www.world-aluminium.org/>> Acesso em março/13.
- LOESCH, C; HEIM, N. Pesquisa Operacional: *Fundamentos e Modelos*. Blumenau: FURB, 1999.
- LUZ, A.B; LINS, F.A.F. Rochas & Minerais Industriais: *usos e especificações*. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005.
- MACÊDO, A.N; COSTA, D.H.P; TRINDADE, S.R.S; SOUZA, J.A.S; CCARNEIRO, R.J.F.M. Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de lama Vermelha e argila. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 25-36, out./dez. 2011.
- OLIVEIRA, A.C.S; LACERDA, W,S; GONÇALVES, L.R. Aplicação de Redes Neurais Artificiais previsão da produção de álcool. *Ciênc. agrotec., Lavras*, v. 34, n. 2, p. 279-284, mar./abr., 2010.
- ROSSI, C.R.C; RAMOS, M.A; NEGRÃO, A.M; OLIVEIRA, D.R.C. Estudo Experimental das Propriedades Físicas e Mecânicas de Agregados para a Construção Civil Produzidos a partir de Lama Vermelha. *50º congresso brasileiro do concreto – CBC - 2008 – 50CBC0351*.
- SILVA, E.L; MENEZES, E.M. Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação. *4ª ed. rev. atual*. Florianópolis: UFSC, 2005.
- SOUZA, J.A.S. Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria-prima na produção de Agregados sintéticos para a construção civil. *Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, Universidade Federal do Pará – 2010*.