



## Sistema de monitoramento em tempo real da concentração de potássio na vinhaça *in natura*.

**Paulo Henrique Toledo de Oliveira e Souza<sup>1</sup>, Prof. Dr. Dennis Brandão<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Elétrica/ Escola de Engenharia de São Carlos/ Universidade de São Paulo (pauloht@sc.usp.br)

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Elétrica/ Escola de Engenharia de São Carlos/ Universidade de São Paulo (dennis@sc.usp.br)

### Resumo

A cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum*) tem presença marcante na história do Brasil, desde a época da colonização. Atualmente, é responsável por um dos maiores ramos do agronegócio nacional. Em seu processo industrial são obtidos os seguintes produtos: açúcar, álcool (anidro e hidratado), bagaço (utilizado para geração de energia) e vinhaça (aplicada na lavoura como adubo). A utilização da vinhaça na lavoura recebe o nome de fertirrigação, prática importante à lavoura, pois este produto é muito rico em sais minerais, como o potássio, tem grande carga biológica e 93% de água em sua composição. No entanto a sua aplicação indiscriminada pode causar vários danos ao meio ambiente e à lavoura. Este artigo apresenta um sistema de monitoramento em tempo real que visa a medição do teor de potássio na vinhaça, como prevê a Norma Técnica CETESB - P4.231 (Versão Janeiro/2005). Nesta norma consta uma equação que limita a aplicação de vinhaça por hectare, na qual a principal variável é a concentração de potássio. O sistema de monitoramento proposto baseia-se em um sensor virtual, software que substitui sensores em hardware, baseado na aplicação de redes neurais artificiais, que possibilita a avaliação da concentração de potássio na vinhaça *in natura* ainda na saída da destilaria, algo que atualmente é realizado em laboratório, o que demanda tempo e pessoal técnico. Os resultados apresentados mostram que o monitoramento proposto é mais preciso e rápido que os analisadores de bancada.

Palavras-chave: vinhaça, potássio, fertirrigação, redes neurais, sensores virtuais.

Tema 2 – Águas Residuárias.

### Abstract

The cultivation of sugarcane (*Saccharum officinarum*) has a strong presence in Brazil's history since the time of colonization. It is now one of the major branches of the national agribusiness. In its manufacturing process are obtained the following products: sugar, alcohol (anhydrous and hydrated), bagasse (used for power generation) and vinasse (applied in the fields as fertilizer). The use of vinasse on the farm is known as fertigation practice important to agriculture because this product is very rich in minerals such as potassium, has a large biological load and 93% water in its composition. However, its indiscriminate application can cause extensive damage to the environment and agriculture. This paper presents a system for real-time monitoring aimed at measuring the potassium content in the stillage, as provided by the Technical CETESB - P4.231 (Version January 2005). In this equation, the standard is set that limits the application to vinasse per hectare, in which the main variable is the concentration of potassium. The monitoring system proposed is based on a virtual sensor, software to replace hardware sensors, based on the application of artificial neural networks, allowing evaluation of potassium concentration in vinasse still fresh off the distillery, something that is currently in the laboratory, which requires time and personnel. These results show that the proposed monitoring is more accurate and faster than analyzers bench.

Keywords: stillage, potassium, fertigation, neural networks, virtual sensors.  
Track 2 - Wastewater.



## 1. Introdução

A cana-de-açúcar tem sido cultivada em escala comercial no Brasil desde a proximidade da linha do Equador, no estado do Amazonas, até regiões subtropicais como no estado do Rio Grande do Sul (FNP, 2002), no entanto é na região centro-sul que a agroindústria canavieira tem mais força, sendo que na safra de 2007/2008, mais de 90% da produção de álcool foi realizada nesta região.

A produção de 01 litro de álcool implica na produção de 10 a 15 litros de vinhaça, maior poluidor no processo de produção sucro-alcooleira segundo fontes da CETESB, que tem grande importância para a lavoura, pois é rica em sais minerais, matéria orgânica e água. A vinhaça depois de depositada em tanques construídos no solo é enviada para a lavoura por três possíveis métodos:

- Em canais por gravidade
- Bombeada por dutos
- Transportada por caminhões tanque

Após o transporte a vinhaça é então lançada ao solo por aspersores especiais, feitos com materiais resistentes à corrosão, uma vez que a vinhaça apresenta características corrosivas, como o baixo pH.

A relevância do problema ambiental da destinação da vinhaça produzida na indústria alcooleira associa-se à importância econômica histórica da própria agroindústria canavieira em nosso país. O estado de São Paulo, em particular, já ocupava o lugar de maior produtor nacional de cana-de-açúcar mesmo antes da institucionalização do ProÁlcool em 1975. Dessa maneira a linha de pesquisa com foco na defesa do meio-ambiente ganhou muita força e no final dos anos 70 foi proibido lançar aquele produto nos mananciais superficiais, dentre os quais os mais atingidos eram os cursos d'água.

Os impactos decorrentes da aplicação da vinhaça na lavoura tornaram-se notáveis com o crescimento do setor, ocorrido principalmente após a instituição do Programa Nacional do Álcool, o que fez muitos pesquisadores, tanto nas universidades quanto na iniciativa privada, iniciassem um busca por soluções que fossem inovadoras e que resultassem em um método sustentável para o aproveitamento da vinhaça.

Tamanha preocupação tem um forte motivo: as grandes quantidades de vinhaça produzidas por litro de álcool. Este produto tem um grande potencial para consumo de oxigênio, com DBO(demanda biológica de oxigênio) e DQO(demanda química de oxigênio) muito elevados, o que junto com a alta concentração de sais podem causar sérios impactos ao meio ambiente.

Por algum tempo as pesquisas mantiveram-se focadas na biotecnologia com os avanços na direção da digestão anaeróbica VIANA(2006). Tanto os pesquisadores quanto as agencias financeiradoras e até as indústrias acreditavam ser esse o melhor destino para a vinhaça. No entanto, apesar de todo o avanço conquistado no campo da biotecnologia com tentativas bem sucedidas até de geração de gás combustível, a fertirrigação se apresentou como a prática mais interessante para o setor sucro-alcooleiro. Este método é fortalecido fundamentalmente graças a seu baixo custo e simplicidade tecnológica.

Aparentemente não se teriam mais problemas ligados à destinação deste produto, mas com o desenvolvimento da tecnologia e o interesse crescente em manutenção do meio-ambiente foram detectados novos problemas ligados a prática da fertirrigação. Dentre todos os pontos discutidos atualmente, dois merecem destaque: a questão sobre a possibilidade da contaminação dos aquíferos subterrâneos por potássio e a salinização do solo agrícola, principalmente porque este íon é encontrado em quantidade bastante significativa na vinhaça.

Outros impactos menos preocupantes, pois a legislação já é eficiente nestes casos, mas



## 2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 28 a 30 de Abril de 2010

ainda assim relevantes ao meio-ambiente e à nossa saúde são, de acordo com Ometto (2000):

- Fortes odores resultantes de sua fermentação e decomposição, podendo o mau cheiro permanecer por até dois dias
- Alta ação redutora, exigindo elevada taxa de oxigênio para estabilizar
- Características ácidas e corrosivas
- Problemas de insalubridade
- Alteração na turbidez e cor da água
- Proliferação de insetos nos tanques de armazenagem e nos canais condutores, possibilitando assim a proliferação de doenças

Com base na problemática descrita, o objetivo deste artigo é apresentar uma rede neural *perceptron* multicamadas que analisa o teor de potássio (K+) a partir de dados selecionados entre: temperatura, DBO, vazão, Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e potencial hidrogeniônico (Ph) medidos na linha de vinhaça in natura e em tempo real e em concordância com a Norma Técnica CETESB - P4.231 (Versão Janeiro/2005). Este artigo é organizado em uma sucinta explicação sobre a produção de álcool para que se entenda a origem da vinhaça, a apresentação da metodologia desenvolvida, os resultados e a conclusão.

### 2. Produção de álcool

A partir da chegada da cana à indústria, esta é analisada e processada seqüencialmente em uma série de processos físico-químicos complexos que visam a extração, tratamento, concentração e fermentação do caldo. O caldo fermentado recebe o nome de vinho.

O vinho é centrifugado, separando-se em duas partes: uma delas é o leite de levedura, responsável pela transformação dos açúcares em álcool e é reutilizada em novas fermentações, logo após sofrer um tratamento químico adequado; a outra parte é o vinho sem levedura, que contém de 7% a 8% de álcool e o restante das impurezas líquidas. Além do processo de transformação, uma porcentagem é desidratada, servindo para ração animal VIANA (2006).

Como o álcool tem um ponto de ebulição menor que o da água, é possível separar os dois por um processo de destilação, etapa que acontece nas colunas de destilação. Após a destilação, obtém-se o álcool hidratado, produzido dentro das normas do "CNP-IAA", isto é, com grau alcoólico entre 92,6° e 93,8° INPM, para ser utilizado como combustível segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA).

Ao se separa o álcool dos outros componentes do vinho durante a destilação tem-se como subproduto a vinhaça, que é depositadas em tanques construídos no solo e posteriormente enviada para a lavoura através de canais por gravidade ou adutoras por bombeamento ou, ainda, transportada por caminhões tanque e então é lançada ao solo por aspersores. No entanto se utilizada de forma incorreta pode tornar-se um agente poluidor de meio ambiente. Se não for tratada ou usada de forma correta, pode poluir os rios, o solo, lençóis freáticos, o que ameaça a fauna, a flora e as populações que vivem dentro deste ecossistema.

Ainda como agravante de seus impactos ao meio ambiente temos a alta temperatura que esse resíduo se encontra na saída dos destiladores, por volta de 85 a 90°C.

Sua composição varia de acordo com alguns fatores, tais como a natureza e o teor de matéria prima, do tipo de aparelho destilatório e da condução da operação na destilaria.

A composição média deste subproduto segundo Ometto (2005) é a seguinte:

- 93,2% de água
- 5,1% de matéria orgânica



## 2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 28 a 30 de Abril de 2010

- 1,7% de substâncias minerais (nitrato, sulfato, potássio, cálcio, magnésio, e fósforo)

Os principais aspectos químicos da vinhaça são:

- Grande carga de Demanda Biológica de Oxigênio (DBO);
- Apresenta características ácidas e corrosivas
- Alta nocividade aos animais aquáticos
- Problemas de insalubridade
- Alteração da turbidez e cor da água

A Norma Técnica CETESB - P4.231 (Versão Janeiro/2005) regulamenta a fertirrigação e determina os padrões de dosagem máxima de vinhaça a ser utilizada no tratamento de solos agrícolas em cultura de cana de açúcar, e como será demonstrado pela fórmula o fator de relevância para tal cálculo é o potássio, segue abaixo a equação:

$$m^3 \text{ de vinhaça/ha} = [(0,05 \times CTC - ks) \times 3744 + 185] / kvi$$

Sendo que:

- 0,05 = 5% da CTC
- CTC = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em cmolc /dm<sup>3</sup> a pH 7,0, dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo e utilizando metodologia do Instituto Agronômico de Campinas de Análise de Solo, devidamente assinado por responsável técnico.
- ks = concentração de potássio no solo, expresso em cmolc /dm<sup>3</sup>, à profundidade de 0,80 metros, dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo utilizando metodologia de Análise de Solo do Instituto Agronômico de Campinas, devidamente assinado por responsável técnico.
- 3744 = constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em cmolc/dm<sup>3</sup> ou meq /100cm<sup>3</sup>, para kg de potássio em um volume de um hectare por 0,80 metros de profundidade.
- 185 = kg de K<sub>2</sub>O extraído pela cultura por ha, por corte.
- kvi = concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de K<sub>2</sub>O /m<sup>3</sup>, apresentada em boletim de resultado analítico, assinado por responsável técnico.

São três os principais impactos causados pelo excesso de potássio no solo, quando não se observa o limite de aplicação da vinhaça:

- A salinização da lavoura, caso seja distribuído em excesso, impossibilitando por tempo indeterminado que qualquer planta cresça nesse solo.
- Eutrofização, pois o potássio contribuirá para o crescimento de plantas aquáticas que por sua vez consumirão o oxigênio disponível na água.
- Contaminação dos aquíferos por íons de potássio.

### 3. Metodologia

A partir desses dados, os autores propõem uma técnica inteligente baseada em uma rede neural que determina concentração de íons de potássio (K<sup>+</sup>), kvi na fórmula (1), a partir de dados selecionados entre a temperatura, o DBO, a vazão, a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e potencial hidrogeniônico (Ph) medidos na linha de vinhaça in natura diretamente na saída da torre de destilação em tempo real e continuamente. É importante mencionar que existem transdutores industriais que medem os dados de entrada citados diretamente no processo.



## 2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 28 a 30 de Abril de 2010

Foi utilizada uma rede neural *perceptron* multicamadas, que segundo Haykin (2000) é um rede neural artificial de múltiplas camadas de unidades neurais interconectadas, o que implica em que cada unidade neural de uma determinada camada tenha conexões diretas com todos os neurônios da próxima camada. Em muitas aplicações, as unidades dessas redes utilizam uma função sigmóide como função de ativação. Uma de suas aplicações e a que gera os resultados deste artigo é a função de aproximação universal.

Segundo o Teorema de Cybenko (1989), qualquer função contínua pode ser uniformemente aproximada por uma rede neural contínua de apenas uma camada escondida (camada entre a de entrada e saída) e com função sigmoidal contínua não-linear arbitrária. O teorema de aproximação universal afirma que para qualquer função contínua não-constante, limitada, e monotonicamente crescente, existe um inteiro  $M$  e conjuntos de constantes reais  $a_i$  e  $w_{ij}$ , onde  $i = 1, \dots, M$  e  $j = 1, \dots, m$ , tais que pode-se definir:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{i=1}^M \alpha_i f\left( \sum_{j=1}^m w_{ij} x_j - w_{oi} \right)$$

Figura 1 – Expressão do teorema de aproximação universal

Comparando-se a expressão do teorema de aproximação universal com a expressão que define os neurônios da rede neural artificial, perceptron multicamadas, conclui-se que basta uma camada escondida e a utilização de função linear no neurônio de saída para que a rede neural artificial atendida o teorema.

As redes multicamadas utilizam na maioria das vezes a *backpropagation*, propagação reversa, para realizar seu treinamento. Nesse caso, os valores de saída são comparados com a resposta correta para computar o valor por uma função de erro. Então este valor volta e é usado para ajustar os pesos de cada conexão reduzindo o valor da função de erro. Após esta etapa de ajuste o *backpropagation* não é mais utilizado e a propagação de valores ocorre somente em um sentido.

### 4. Resultados

Os resultados do método proposto estão apresentados na tabela 1. O erro percentual médio de tais resultados é menor que 3% e acredita-se que venha a melhorar a partir da utilização de um número maior de amostras e também de um maior rigor em relação ao tempo entre uma coleta e outra visando assim constituir um sistema mais confiável.

Tabela 1 – Resultados da rede neural artificial

Rede Neural Artificial	Potássio real
0.1275	0.1350
0.2302	0.1770
0.1125	0.1150
0.1125	0.1150
0.1077	0.1010
0.1107	0.1490
0.1427	0.1430
0.0791	0.0550
0.1117	0.1170
0.1566	0.1180



## 2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 28 a 30 de Abril de 2010

0.0896	0.0770
0.0912	0.1140
0.0947	0.0706
0.0962	0.0560
0.7631	0.7920
0.1386	0.0960
0.1331	0.0680
0.1777	0.0980
0.1720	0.1560
0.1617	0.1460
0.1100	0.1080

O método de analise do teor de potássio proposto neste artigo tem seus resultados apresentados também no gráfico abaixo em uma comparação entre os valores reais e os aproximados pela rede perceptron multicamadas (PMC), sendo que o eixo Y do gráfico (Figura 2) representa os dados de concentração de potássio normalizados para a rede neural e o eixo X as coletas de vinhaça durante uma safra.

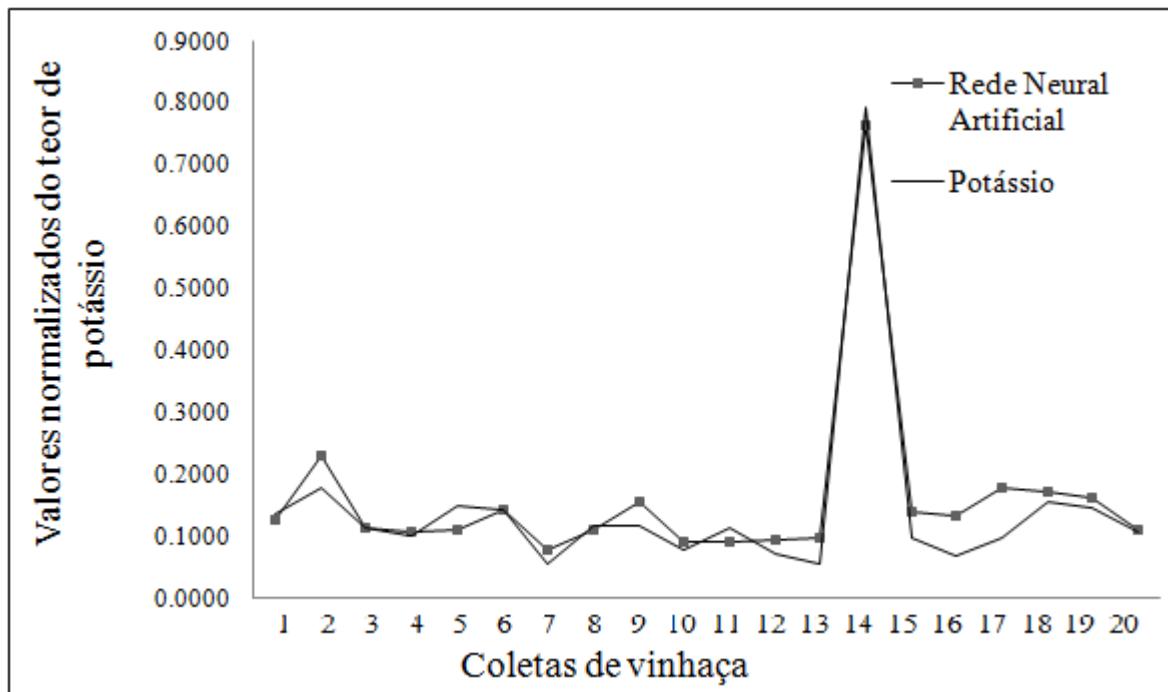


Figura 2 – Gráfico comparativo entre dados reais e valores da rede neural

## 5. Conclusão

A partir dos resultados mostrados graficamente no item anterior pode-se concluir que a pesquisa atingiu seu objetivo e que se obteve significativa melhora nas analises da vinhaça *in natura* pois a rede neural artificial superou os aparelhos de bancada, segue abaixo quadro comparativo das duas tecnologias: redes neurais perceptro multicamadas (PMC) e aparelhos de bancada.



## 2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 28 a 30 de Abril de 2010

Item	Perceptro multicamadas	Aparelhos de bancada
Erro percentual	Menor que 3%	Menor que 5%
Tempo de resposta	Instantânea	Alguns segundos
Tempo total	Bastante reduzido pois não depende de coleta de vinhaça	Grande pois depende de coleta de vinhaça
Praticidade	Não depende de técnicos químicos	Depende de técnicos químicos para preparação da amostra para que o aparelho de bancada possa medir

Quadro 1 – Comparativo entre redes neurais e aparelhos de bancada

Com o quadro comparativo conclui-se que esta pesquisa contribui tecnologicamente aos analisares em tempo real, mostrando-se muito superior aos aparelhos de bancada disponíveis atualmente para estas análises. Se aplicada, esta tecnologia pode trazer vantagens ao tratamento e aproveitamento da vinhaça como adubo, dispensando, por exemplo, a estocagem de vinhaça em grandes açudes, o que causa: mau cheiro devido a decomposição, ambiente propício a proliferação de insetos vetores de doenças que podem atingir trabalhadores e comunidades vizinhas e o risco de contaminação do solo e aquíferos.

Como as indústrias sucro-alcooleiras estão fazendo a opção pela fertirrigação, o íon de potássio passou a ser um novo ponto de estrangulamento, uma vez que, pode saturar o solo, impossibilitando o plantio e também pode atingir mananciais subterrâneos contaminando a água o que a torna imprópria para consumo de algumas pessoas. Como a movimentação deste elemento químico no solo é grande tem-se que mensurá-lo precisamente para que não ocorra aplicação indevida na lavoura.

Com o desenvolvimento de um sensor virtual esta pesquisa proporciona às indústrias sucro- alcooleiras e aos órgãos de vigilância ambiental, maiores informações sobre o que está sendo aplicado no campo. Isto trará à empresa uma melhor produção e a garantia de que o solo não ficará saturado de potássio. Em relação ao meio-ambiente este sistema também será útil, pois os órgãos responsáveis pela fiscalização da fertirrigação poderão medir a concentração de potássio, juntamente com o volume de vinhaça, prática já obrigatória.

### Referências

CYBENKO, G.V. **Approximation by Superpositions of a Sigmoidal function, Mathematics of Control, Signals and Systems.** vol. 2. 1989. 303-314p.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Anuário de Agricultura Brasileira,** São Paulo. 2002. 536 p.

HAYKIN, SIMON. **Redes Neurais: Princípios e Práticas.** Editora BOOKMAN. 2 edição. 2000. 899p.

LOPES, C.H. **Lavagem de cana e tratamento de seus efluentes.** Saccharum, 6 edição , 1983. p.26-31.

OMETTO, ALDO ROBERTO. **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos edip, exergia e emergia.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2005. 209p.



## 2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 28 a 30 de Abril de 2010

**NERY, M. S. Desempenhos operacional e econômico de uma colhedora em cana crua /**  
Moizéis Silva Nery, Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba 2000, 108 p.

Norma Técnica **CETESB - P4.231**. Versão Janeiro. 2005. 17p.

**VIANA, A.B. Tratamento anaeróbio de vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica (55°C) e submetido ao aumento progressivo de carga orgânica.,** Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2006. 102p