Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

Paulo Henrique Toledo de Oliveira e Souza

Rede neural artificial para monitoramento em tempo real da concentração de potássio na vinhaça *in natura.*

São Carlos
2010

Paulo Henrique Toledo de Oliveira e Souza

Rede neural artificial para monitoramento em tempo real da concentração de potássio na vinhaça *in natura.*

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do titulo de Mestre em Sistemas Dinâmicos, no Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo

Área de concentração: Sistemas dinâmicos

Orientador:
Prof. Dr. Dennis Brandão

São Carlos
2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

O48r

Oliveira e Souza, Paulo Henrique Toledo de
Rede neural artificial para monitoramento em tempo real da concentração de potássio na vinhaça *in natura* / Paulo Henrique Toledo de Oliveira e Souza ; orientador Dennis Brandão. -- São Carlos, 2010.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Dinâmicos) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Monitoramento. 2. Vinhaça. 3. Potássio. 4. Fertirrigação. 5. Redes neurais artificiais. 6. Sensores virtuais. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro **PAULO HENRIQUE TOLEDO DE OLIVEIRA E SOUZA.**

Dissertação defendida e julgada em 01/06/2010 perante a Comissão Julgadora:

APROVADO

Prof. Dr. **DENNIS BRANDÃO – (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Dr. **ANDRÉ TREVIZOLI MARTINS**
(Companhia Ambiental do Estado de São Paulo/CETESB)

APROVADO

Prof. Dr. **EVANDRO LUÍS LINHARI RODRIGUES**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa aos meus pais, Paulo e Beatriz, pelo exemplo de persistência e garra frente às adversidades da vida, o que me ajudou a transpor as dificuldades durante este período de mestrado.

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados e queridos pais, Paulo e Beatriz, obrigado por todo o carinho, suporte, presença, paciência que tiveram não só no período do mestrado, mas também durante toda a minha vida, pois, sem tudo o que vocês me proporcionaram, eu não teria chegado até aqui. Muito obrigado!

Ao meu irmão Luiz pela grande amizade, pelos momentos divertidos e também por estar sempre presente em minha vida.

Ao Prof. Dr. Dennis Brandão, pelo apoio, orientação nesta pesquisa e amizade que perdura desde os tempos de graduação. Fica aqui um grande abraço e sinceros agradecimentos por tudo. Obrigado por tudo.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, que se tornou minha segunda casa desde 2003.

Ao Sr. Luiz Cunali de Felippi, amigo do meu pai desde o tempo em que fizeram Eng. Agronômica na ESALQ, que me abriu as portas de suas usinas de cana-de-açúcar, permitindo, assim, toda a trajetória em busca de dados e informações para que conseguisse concluir esta pesquisa.

Ao Sr. Edilson Martins Arantes, gerente da Usina Ipiranga, que sempre me recebeu muito bem, auxiliou na organização da coleta de dados na planta industrial e que me forneceu importantes informações sobre a produção.

Ao Sr. Ivandir de Oliveira da Silva, supervisor de fabricação da Usina Ipiranga, que me explicou detalhadamente todo o processo de produção de álcool.

Ao Sr. Antônio Carlos Tassim, supervisor de laboratório da Usina Ipiranga, que foi o responsável pela coleta e registro de todas as amostras coletadas.

A meu primo Mauricio Antunes, pela colaboração tanto com as redes neurais como também nas análises laboratoriais.

Ao prof. Dr. Valdir Schalch pela disponibilização do Laboratório da Hidráulica e Saneamento para as análises de vinhaça.

A professora de gramática e redação, Fernanda Telles, pela correção deste trabalho e pela amizade de vários anos, desde o tempo em que eu era vestibulando.

RESUMO

OLIVEIRA e SOUZA, P.H.T. (2010). **Rede neural artificial para monitoramento em tempo real da concentração de potássio na vinhaça *in natura.*** 85p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

A cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum*) tem presença marcante na história do Brasil, desde a colonização. Em seu processo industrial, são obtidos os seguintes produtos: açúcar, álcool (anidro e hidratado); e seus principais subprodutos são: bagaço – utilizado para geração de energia – e vinhaça – reaplicada na lavoura como adubo. O uso da vinhaça na lavoura recebe o nome de fertirrigação, pois este subproduto é muito rico em minerais como: potássio, sódio, cálcio e magnésio contêm grande carga biológica e possui 93% de água em sua composição. No entanto, sua aplicação indiscriminada pode causar vários danos ao meio ambiente e à lavoura. Esta pesquisa visa a contribuir tecnicamente para o monitoramento do íon de potássio controlado pela Norma Técnica da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) – P4.231 (Versão Janeiro/2005). O método proposto viabiliza a avaliação da concentração de potássio na vinhaça *in natura* diretamente na saída da destilaria. Para isso utilizaram-se redes neurais artificiais, mais especificamente as redes perceptron multicamadas, como aproximador universal de funções. Utilizam-se, como referência, dados de análises laboratoriais de coletas realizadas durante dois meses na Usina Ipiranga de Descalvado - SP. Os resultados apresentaram margem de erro menor que os aparelhos convencionais, mostrando, assim, sua capacidade de realizar a função de analisador químico. No entanto tal margem foi calculada sobre o erro dos aparelhos, ou seja, se somados ambos os erros – do equipamento e da rede – a metodologia apresentaria um erro maior.

Palavras-chave: Monitoramento. Vinhaça. Potássio. Fertirrigação. Redes neurais artificiais. Sensores virtuais.

ABSTRACT

OLIVEIRA e SOUZA, P.H.T. (2010 **Artificial neural network for real-time monitoring of the concentration of potassium in the stillage *in natura*.** 85p. Thesis (Masters) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

The cultivation of sugar cane (Saccharum officinarum) has significant presence in Brazil's history, from colonization. In its industrial process, are obtained the following products: sugar, ethanol (anhydrous and hydrated), and its main products are: marc - used for power generation - and stillage - re-applied as fertilizer in farming. The use of vinasse on the farm is called fertigation, because this by-product is very rich in minerals such as potassium, sodium, calcium and magnesium containing high biological load and has 93% water in its composition. However, its indiscriminate application can cause extensive damage to the environment and agriculture. This research aims to contribute technically to the monitoring of potassium ion controlled with the Standard Environmental Company of São Paulo (CETESB) - P4.231 (Version January 2005). The proposed method enables the assessment of the concentration of potassium in the stillage in natura directly in the output of the distillery. For this we used artificial neural networks, especially the multilayer perceptron networks, such as universal approximator of functions. Are used as reference data for laboratory analysis of samples collected during two months of Descalvado at Usina Ipiranga - SP. The results showed a margin of error smaller than traditional braces, thus showing its ability to perform the function of chemistry analyzer. However this was calculated on the error of the apparatus, ie, if both errors combined - the equipment and the network - the methodology would present a greater mistake.

Keywords: Monitoring. Vinasse. Potassium. Fertigation. Artificial neural networks. Virtual sensors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa do Brasil com as áreas aptas para o plantio da cana-de-açúcar 7
Figura 2 – Colheitadeira na lavoura da Usina Ipiranga 9
Figura 3 – Setor das moendas 10
Figura 4 – Setor de tratamento do caldo 11
Figura 5 – Setor de fermentação 11
Figura 6 – Coluna A da destilaria da Usina Ipiranga 12
Figura 7 – Fluxograma destilaria da Usina Ipiranga 13
Figura 8 – Tubulação por onde passa vinhaça, na saída da coluna A 15
Figura 9 – Canhão hidráulico em funcionamento 19
Figura 10 – Eletrocardiograma normal, com o nome de cada curva 29
Figura 11 – Neurônio biológico 31
Figura 12 – Ilustração linearmente (esquerda) separável e não linearmente separável (direita). 34
Figura 13 – Funcionamento do *Perceptron* 35
Figura 14 – Passo *feed-forward* (cinza) e *back-propagation* (amarelo) 37
Figura 15 – (a) Função degrau (b) Função sigmoidal (c) Função hiperbólica 38
Figura 16 – Resfriador de vinhaça para coletas laboratoriais 42
Figura 17 – Gráfico do balanço hidrico climatológico da região de São Carlos-SP 43
Figura 18 – Armazenamento de água no solo 44
Figura 19 – Phagâmetro utilizado 46
Figura 20 – Medidor de potássio utilizado 48
Figura 21 – Topologia utilizada 52
Figura 22 – Tela do *WEKA* 55
Figura 23 – Rede perceptron multicamadas no Weka 56
Figura 24 – Gráfico dos resultados com 5 neurônios na camada oculta 58
Figura 25 – Gráfico dos resultados com 8 neurônios na camada oculta 58
Figura 26 – Gráfico do comportamento da rede PMC 59
Figura 27 – Gráfico informativo sobre as referências 73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise de vinhaça safra 2007 da Usina Ipiranga – Descalvado 16
Tabela 2 – Característica do pHmetro 46
Tabela 3 – Características do condutivímetro 47
Tabela 4 – Significado dos valores de *r* 49
Tabela 5 – Coeficientes de correlação 57
Tabela 6 – Trinta e cinco resultados da Rede Neural *Perceptron* Multicamadas funcionando como sensor virtual na busca pelo teor de potássio na vinhaça *in natura* 60
Tabela 7 – Valores calculados pela fórmula da CETESB para aplicação da vinhaça na lavoura 61
Tabela 8 – Diferença de potássio para cada tipo de solo 61
Tabela 9 – Comparativo entre o sensor virtual e os aparelhos de bancada 62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
2 OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO 3
3 ESTADO DA ARTE 5
3.1 Projetos de expansão 6
3.2 O corte da cana-de-açúcar 8
3.3 O processo das indústrias e destilarias de álcool 9
3.4 Vinhaça 13
3.4.1 Composição química 15
3.4.2 Métodos de tratamento de vinhaça 16
3.4.3 Sistemas de distribuição de vinhaça 17
3.4.4 Vantagens e desvantagens do método por aspersão 19
3.4.5 Legislação sobre a vinhaça 20
3.4.5.1 Legislação Federal segundo EMENTÁRIO NACIONAL (2009) 21
3.4.5.2 Legislação específica para o Estado de São Paulo 22
3.4.5.3 Norma técnica da CETESB 23
3.4.6 Predomínio da fertirrigação 24
3.4.7 Funções e comportamento do potássio no solo 26
3.4.8 Funções e comportamento do potássio no corpo humano 28
3.5. Trabalhos relacionados 29
4 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS 31
4.1 Histórico das Redes Neurais Artificiais 32
4.2 Redes neurais artificiais 33
4.3 Redes *Perceptron* Multicamadas (PMC) 36
4.3.1 Treinamento das redes PMC 36
4.3.2 Normalização dos dados 38
4.3.3 Validação 39
4.4 Sensores virtuais 39
4.4.1 Tipos de sensores virtuais 40
5 MATERIAIS E MÉTODOS 41
5.1 Coleta de dados 41
5.2 Método de análise 45
5.3 Equipamentos 45

5.3.1 Phagâmetro – Modelo DM 21 (DIGIMED) 46
5.3.2 Condutivímetro – Modelo DM 21 (DIGIMED) 47
5.3.3 Medidor de teor de potássio – Modelo AA240FS *Fast Sequencial* (Varian) 47
5.4 Validação das entradas 48
5.4.1 Validação das entradas por coeficiente de correlação 50
5.5 Rede Neural Artificial utilizada 50
5.6 *WEKA* 52
5.6.1 Aplicação do *Weka* 52
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 57
7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS 63
8 PUBLICAÇÕES 65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 67

1 INTRODUÇÃO

A produção sucro-alcooleira no Brasil foi impulsionada com a implantação do Pró-Álcool, Programa Nacional do Álcool, lançado em 1975 devido à crise do petróleo em 1973, agravada em 1979. Desde então, o álcool tem aumentado no cenário nacional e, recentemente, o impulso foi ainda maior com o lançamento das versões de veículos automotores com capacidade de trabalhar com álcool ou gasolina e até mesmo com uma mistura dos dois combustíveis em quaisquer proporções. A produção sucro-alcooleira tornou-se responsável por um dos maiores ramos do agronegócio nacional, com grande importância ao país, por movimentar a economia e contribuir para criação a de muitos empregos diretos e indiretos.

A expansão da cultura de cana-de-açúcar fez com que o governo e instituições não governamentais se preocupassem ainda mais com os impactos ambientais que podem ser causados por sua produção. Isso acarretou numa busca mais efetiva por ações de prevenção e cuidados com resíduos, a exemplo da vinhaça, subproduto da produção de álcool. Em vista disso, o Estado de São Paulo tem uma legislação elaborada especificamente para este resíduo, a *Norma Técnica CETESB* - P4.231 (Versão Janeiro/2005).

O Estado de São Paulo já ocupava o lugar de maior produtor nacional de cana-de-açúcar, antes mesmo da instituição do ProÁlcool em 1975, e este estado teve problemas com o descarte inapropriado de vinhaça há algumas décadas. Mesmo com a proibição legal de a vinhaça ser lançada nos rios, lagoas e baixios – Decreto - Lei no 303, de 28 de fevereiro de 1967 – esse resíduo continuou atingindo os mananciais superficiais, dentre os quais os mais atingidos eram os cursos de água como rios e ribeirões, pois a fiscalização ainda não se havia tornado tão eficaz como hoje.

A legislação que regulamenta e, de certa forma, restringe algumas ações corriqueiras dos produtores de álcool foi elaborada porque grandes quantidades de vinhaça são produzidas por litro de álcool, em uma relação de 1 litro de álcool para 11 a 15 litros de vinhaça.

Estão presentes na vinhaça altos teores de sais minerais, como o potássio, sódio, cálcios e magnésios, importantes para a lavoura, mas que, aplicados em excesso, podem tornar-se grande problema para o solo, rios, ribeirões e aquíferos subterrâneos.

Apesar de todo o avanço conquistado no campo da biotecnologia com tentativas bem sucedidas de geração de gás combustível, o produtor rural continua a utilizar

fertirrigação, por ser um método prático, eficiente e de baixo custo, este último é o principal motivo para que o exercício desta atividade seja tão comum. Vale destacar ainda o considerável fator economia, a qual é grande por reduzir bastante o uso de outros fertilizantes, o conhecido NPK – à base de Nitrogênio, Fósforo e Potássio.

Entre os muitos problemas discutidos atualmente, merece destaque a questão da possibilidade de poluição dos aquíferos subterrâneos em que os sais têm grande importância, principalmente o potássio que é encontrado em quantidade bastante significativa. A preocupação com o potássio está baseada no fato de ainda ser discutido o quanto ele pode percolar com o solo; ele é um íon com grande facilidade de movimentação, mas não há, na literatura, informações quanto a esta característica nos vários tipos de solo, uma vez que sua mobilidade é diferente em solo arenoso e em solo argiloso, por exemplo.

Outros impactos preocupantes em relação ao meio-ambiente que dizem respeito à saúde ambiental e humana são, de acordo com Ometto (2000): os fortes odores resultantes de sua fermentação e decomposição; a alta ação redutora que exige elevado consumo de oxigênio para estabilização; as características ácidas e corrosivas, o problemas de insalubridade; a alteração na turbidez e cor da água e a criação de ambiente favorável à proliferação de insetos nos tanques de armazenagem e nos canais condutores.

Este trabalho, conforme os objetivos apresentados no item 2, propõe um método para avaliar *on-line* o teor de potássio na vinhaça conforme exigência da CETESB.

2 OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de sensor virtual para monitoramento *on line* do teor de potássio na vinhaça *in natura*. Para isso, será utilizado o modelo de caixa preta de sensor virtual, aplicação de rede neural artificial ou lógica nebulosa ao problema, sem que seja necessária a compreensão e equacionamento matemático do sistema que será medido. Neste trabalho utilizaram-se redes neurais artificiais.

Este método é mais simples do ponto de vista de entendimento do sistema, mas mais complexo do ponto de vista da elaboração de rede neural que satisfaça a necessidade de forma eficiente.

Este trabalho é motivado pelo aumento da produção de álcool no Brasil que tem como conseqüência, o aumento da produção de vinhaça, a qual deve ser analisada antes de ser lançada na lavoura. Para a norma técnica do Estado de São Paulo, a análise mais importante é a do teor de potássio, pois, a partir desta informação, pode ser calculada a quantidade de vinhaça por hectare.

3 ESTADO DA ARTE

A cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum)* 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 Consultoria e Comércio (2002). No entanto é na região centro-sul que a agroindústria canavieira tem mais força, visto que, na safra de 2007/2008, mais de 90% da produção de álcool foi realizada nesta região.

No Estado de São Paulo – o maior produtor brasileiro de cana-de-açúcar – cuja produção é destinada à fabricação de açúcar e álcool, são produzidas 346.292.969 toneladas de cana-de-açúcar que geram 19.107.894 toneladas de açúcar e 13.345.207 mil litros de álcool, dados da safra 2007/2008, o que a torna a maior agroindústria do Estado. Com esses números, o Estado de São Paulo é responsável por 60% da produção de álcool e 62% da produção de açúcar de todo o país (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2009)[1].

A produção de álcool no Brasil vem em ascendência: na safra de 2006/2007, produziu 17.719.209 mil litros de álcool; na safra de 2007/2008, 22.538.917 mil litros de álcool; e na safra 2008/2009, 27.506.096 com aumento de 22,1% em relação à safra anterior – o que superou em 0,1% a estimativa. Se for considerada uma média de 13 litros de vinhaça por litro de álcool, foram produzidos 357.579.248 metros cúbicos de vinhaça na safra 2008/2009 (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2009).

Territorialmente, houve avanço dos canaviais. Por exemplo, no Estado de São Paulo, os canaviais atingiram crescimento de 12,1% em hectares, ou seja, 4.445.281 ha de lavouras, no entanto dois Estados tiveram um crescimento maior dos canaviais em porcentagem – Mato Grosso de Sul com 36,9% chegando a 290.990 ha de lavouras e Goiás com 39,9% de crescimento chegando a 432.009 ha de lavouras (INPE Projeto Canasat).

[1] A União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) é a maior organização representativa do setor de açúcar e bioetanol do Brasil. Sua criação, em 1997, resultou da fusão de diversas organizações setoriais do estado de São Paulo, após a desregulamentação do setor no País. A associação se expressa e atua em sintonia com os interesses dos produtores de açúcar, etanol e bioeletricidade tanto no Brasil como ao redor do mundo.

3.1 Projetos de expansão

O governo federal, com apoio da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa – vai orientar a expansão do cultivo da cana para a produção de etanol e açúcar por meio de Projeto de Lei que definirá as áreas do território nacional adequadas à expansão da lavoura de cana de açúcar.

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2009), o plantio da cana-de-açúcar ocupa menos de 1% das terras agricultáveis do Brasil. Mesmo assim, o país é hoje o maior produtor e exportador de açúcar do mundo e o segundo maior produtor de etanol até 2008.

A partir de estudo do clima e solo brasileiros, pode ser discutida uma série de restrições ambientais, econômicas e sociais. Com base na conclusão deste trabalho da Embrapa o governo federal limita o uso do território do país em não mais que 7,5% para o plantio da cana, como mostra a Figura 1. Um Projeto de Lei será encaminhado ao Congresso Nacional, com regras para a expansão da produção e para a concessão de créditos no setor.

Figura 1 – Mapa do Brasil com as áreas aptas para o plantio da cana-de-açúcar
Fonte: (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2009)

Entre as principais determinações trazidas pelo ZAE Cana estão a proteção do meio ambiente, a conservação da biodiversidade e a utilização racional dos recursos naturais.

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2009), são exemplos desses novos critérios: opção por áreas que não necessitem de irrigação plena e que economizem recursos como água e energia; adoção de áreas com declividade igual ou inferior a 12% que permitam a mecanização e eliminem a prática de queimadas nas áreas de expansão; estimulo à utilização de áreas degradadas ou de pastagens para implantação de novos projetos.

3.2 O corte da cana-de-açúcar

A utilização de máquinas colheitadeiras – Figura 2 – nos canaviais paulistas alcançou 49,1% da área colhida na safra 2008/09. Os dados produzidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) foram divulgados pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Vale ressaltar que a colheita manual da cana-de-açúcar ainda é bastante comum (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2009).

Segundo a UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (2009) o que fez o produtor de cana se preocupar com a mecanização foi a nova legislação que prevê prazos para a erradicação da queima: 2021 (áreas mecanizáveis) e 2031 (áreas não mecanizáveis).

No entanto, devido a acordo firmado em junho de 2007 entre a indústria paulista e o governo do Estado de São Paulo, novos prazos foram fixados. O documento, chamado de "Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético" UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (2010), prevê o cumprimento de metas mais curtas: 2014 (para área mecanizáveis) e 2017 (para áreas não mecanizáveis). O protocolo já foi assinado por 155 usinas instaladas no Estado, o que representa 90% das empresas paulistas do setor, e por mais 24 cooperativas de fornecedores de cana. Um certificado de conformidade, chamado de "Etanol Verde", foi criado para atestar que as usinas signatárias do protocolo vêm cumprindo as metas voluntárias de antecipação da eliminação da queima da cana (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2010).

Figura 2 – Colheitadeira na lavoura da Usina Ipiranga

3.3 O processo das indústrias e destilarias de álcool

Ao chegar à indústria, a cana é analisada por meio de uma amostra retirada mecanicamente do caminhão e levada ao laboratório industrial, no qual é medida a quantidade de açúcar e definido o valor do lote. A seguir, ela é descarregada diretamente na mesa alimentadora por um sistema em que a caçamba do caminhão é tombada por um guincho. No início do processo, a cana é lavada para ser industrializada, exceto naquelas destilarias em que tenha tido início a rotina de não lavar a cana, para evitar uso excessivo de água – que varia de 3 a 10 m^3 por tonelada de cana lavada. Em mesa alimentadora com inclinação de 13° a 16°, o consumo de água é da ordem de 5 a 10 m^3 por tonelada de cana, enquanto que, para a mesa inclinada de 45°, o consumo é de 3 a 5 m^3 por tonelada de cana (LOPES, 1983).

Realizado este primeiro processo, a esteira transporta a cana até o picador, que a corta em pedaços; logo a seguir, a cana picada passa pelo desfibrador, no qual os gomos são quebrados e a cana é aberta para facilitar a extração do caldo (VIANA, 2006).

A extração do caldo é feita na moenda, Figura 3, na qual cada equipamento é conhecido por ternos, uma vez que são constituídas por rolos metálicos que exercem

pressão na cana. No total, a cana passa por quatro a seis ternos na moenda para que todo o caldo seja aproveitado. Para que isso ocorra de forma efetiva, é adicionada água na entrada do segundo terno. Como resultados da moagem, são obtidos o caldo de cana e o bagaço. (LOPES, 1983).

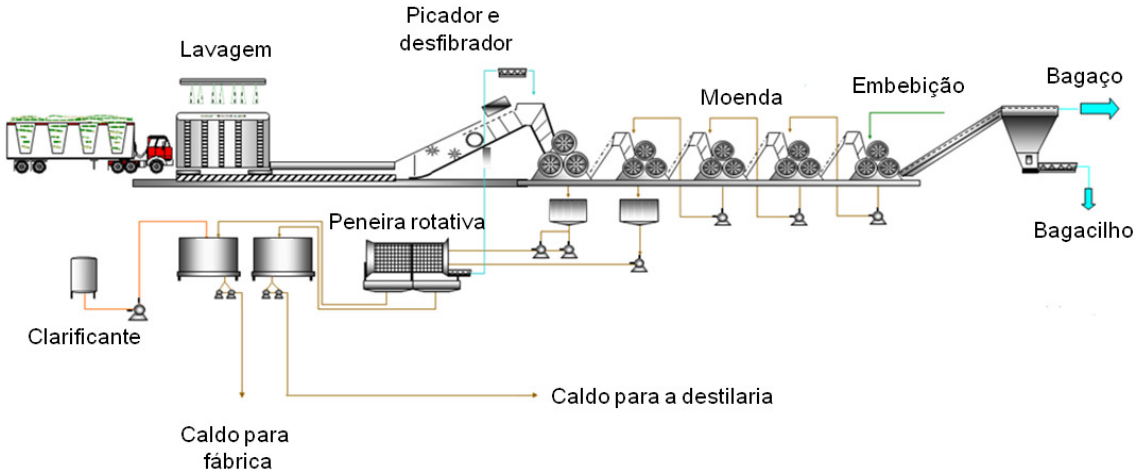

Figura 3 – Setor das moendas
Fonte: ARANTES (2010)

O bagaço é queimado na caldeira, unidade produtora de vapor, que irá gerar toda a energia necessária ao complexo industrial. Por sua vez, o caldo passa por um sistema de tratamento que envolve filtração e alguns processos químicos; no caso de destilarias esta, etapa é simplificada, pois o resultado não precisa ser tão elaborado (LOPES, 1983).

Quase todos os açúcares existentes na cana estão nesse caldo, chamado de caldo misto, que é bombeado para os aquecedores entre 90ºC e 105º C e segue para o decantador, como ilustra a Figura 4, etapa em que o processo químico pelo qual o caldo passou produz efeito e, assim, ocorre a decantação das impurezas nele contidas. No final desta etapa, resultam caldo clarificado e lodo que será processado para recuperação do caldo nele existente por meio de filtros rotativos a vácuo que retiram o caldo limpo, mais a torta, rica em sais minerais, enviada à lavoura como adubo (VIANA, 2006).

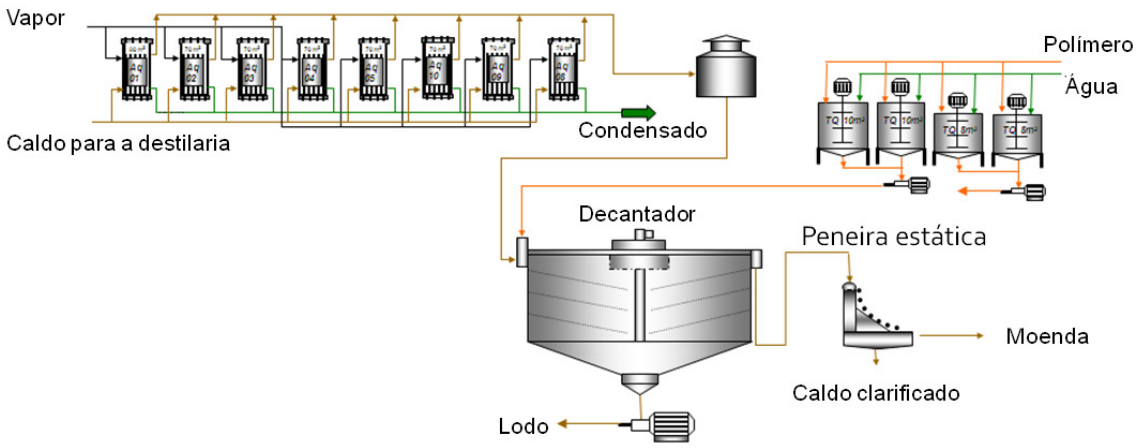

Figura 4 – Setor de tratamento do caldo
Fonte: ARANTES (2010)

O caldo clarificado é bombeado para um tanque "pulmão" e depois segue para um trocador de calor, no qual é resfriado para o processo de fermentação que, pela ação das leveduras, transforma os açúcares em álcool. A levedura consome o açúcar presente no caldo e o transforma em álcool. Essa mistura permanece nas dornas, grandes tanques de armazenagem, por volta de 06 a 08 horas, sob rigoroso controle de temperatura. O caldo fermentado recebe o nome de vinho. A Figura 5 ilustra este processo (VIANA, 2006).

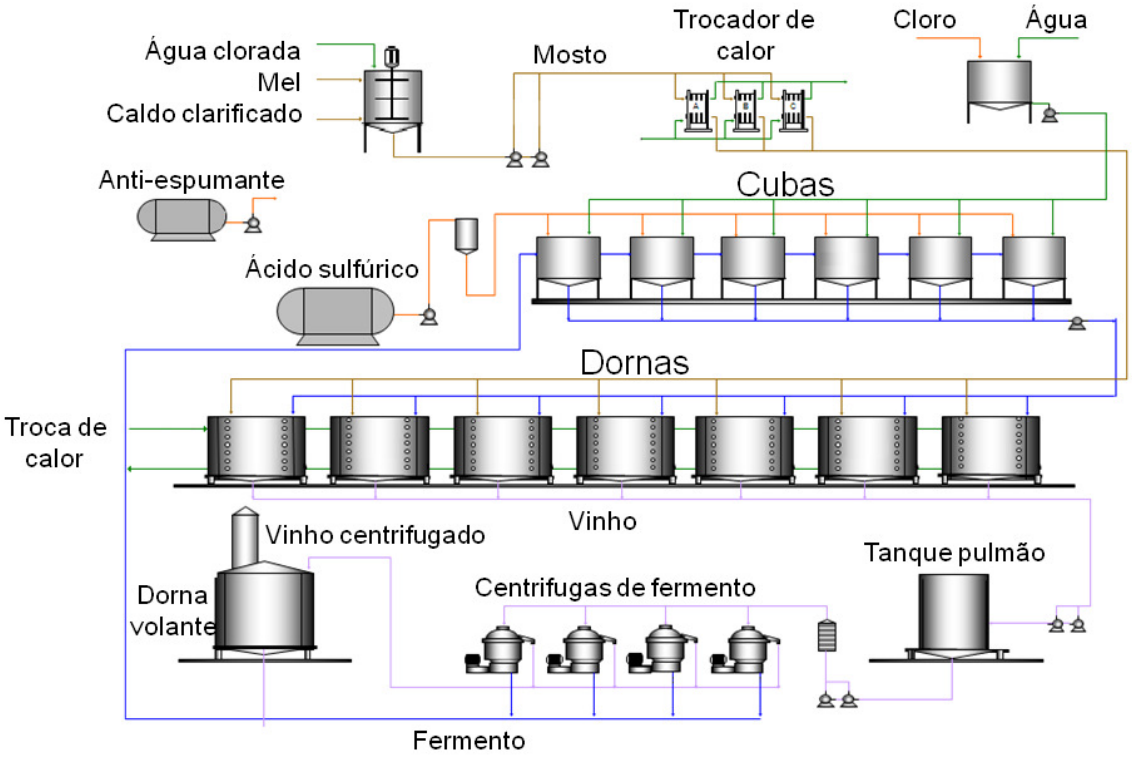

Figura 5 – Setor de fermentação
Fonte: ARANTES (2010)

Esse vinho é centrifugado e separado em duas partes: uma delas é o leite de levedura, responsável pela transformação dos açúcares em álcool reutilizado 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 disso, uma porcentagem do material é desidratada e serve para ração animal. O ponto de ebulição do álcool é menor que o da água, por isso é possível separar os dois por um processo de destilação – etapa que acontece nas colunas de destilação, Figura 6 (ARANTES, 2010).

Figura 6 – Coluna A da destilaria da Usina Ipiranga

Quando o vinho é destilado, tem-se o álcool e seus subprodutos – vinhaça e flegmaça –, que têm grande importância para a lavoura, por serem ricas em sais minerais, matéria orgânica e água. No entanto, utilizada de forma incorreta, a vinhaça pode ser um agente poluidor de meio ambiente. Se não for tratada nem usada de forma racional, pode poluir os rios, o solo, lençóis freáticos, com consequente ameaça às diferentes populações que constituem a comunidade dos ecossistemas. A produção de

01 litro de álcool ,como já citado, gera de 10 a 15 litros de vinhaça, que é depositados em tanques construídos no solo e enviada para a lavoura através de canais, por gravidade, ou bombeado ou, ainda, transportada por caminhões-tanque e finalmente lançada ao solo por aspersão (ARANTES, 2010)

Após a destilação, é obtido álcool hidratado, produzido segundo as normas do Conselho Nacional de Petróleo e Instituto de Açúcar e Álcool (CNP-IAA), isto é, com grau alcoólico entre 92,6º e 93,8º INPM, para ser utilizado como combustível (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2009).

A partir da figura 7 – Fluxograma da destilaria da Usina Ipiranga de Descalvado, pode-se visualizar o processo da mesma.

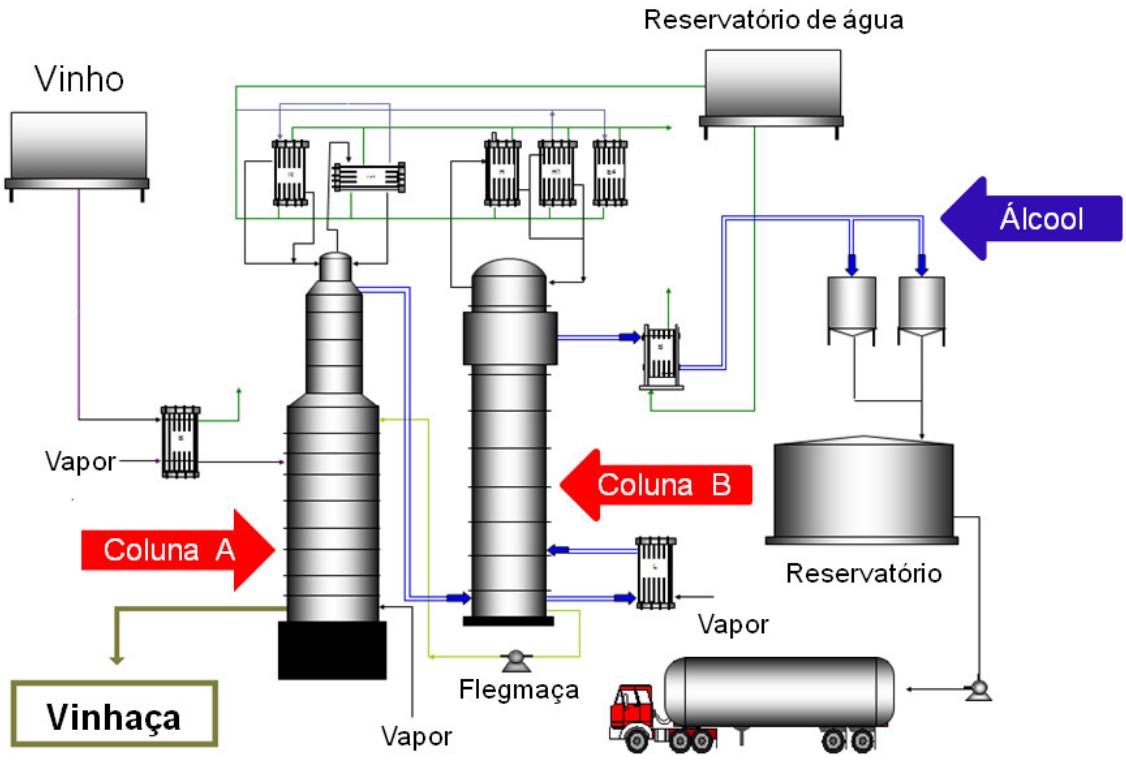

Figura 7 – Fluxograma destilaria da Usina Ipiranga
Fonte: ARANTES (2010)

3.4 Vinhaça

A composição da vinhaça varia em função da natureza da matéria prima e da operação dos aparelhos de destilação (STUPIELLO, 1987; BUZOLIN, 1997). Principal efluente das destilarias de álcool, a vinhaça é também conhecida pelos nomes vinhoto, calda, tiborna, restilo, garapão, vinhote, caxixi e mosto. No Estado de São Paulo, ela é denominada vinhaça.

Segundo Luksemberg; Sá e Durso (1980), a grande preocupação com a vinhaça é decorrente basicamente de três fatores: (i) a composição química que constitui um poluidor, em decorrência da elevada concentração de matéria orgânica e grande quantidade de sais minerais – tais como o potássio, magnésio, sódio –; (ii) a concentração química em que cada 2 litros de vinhaça equivalem ao esgoto sanitário de um habitante/dia; e (iii) a carga volumétrica que pode atingir a proporção de até 15 litros de vinhaça para cada litro de álcool produzido.

Lima (1955) constatou que a vinhaça era a principal causadora da intensa poluição dos cursos de água. Para tanto, coletou amostras de água ao longo de 12 km do rio Piracicaba, no município de Piracicaba - SP e afluentes. Após as análises, verificou-se que, antes do início da safra alcooleira de 1953/54, os valores encontrados para a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) giravam em torno de 0 a 0,4 ppm (parte por milhão). Iniciado o funcionamento das usinas canavieiras, esse valor aumentou gradativamente e, dois meses depois, atingiu 25 ppm e continuou a subir atingindo ao final de mais dois meses, 400 ppm, e mais, superou em muito esse nível no mês seguinte, mesmo após o término da safra alcooleira. Foram estudos como esse que serviram de base para promulgação de leis e decretos para regulamentarem e normatizarem a produção sucroalcooleira de forma a, pelo menos, minimizar os impactos ambientais.

A Figura 8 é foto da tubulação – detalhe no retângulo vermelho – por onde a vinhaça escoa da coluna de destilação; neste ponto, a vinhaça se encontra a temperaturas superiores a 90 graus Celsius.

Figura 8 – Tubulação por onde passa vinhaça, na saída da coluna A

3.4.1 Composição química

Segundo Orlando Filho (1983), a vinhaça é caracterizada como resíduo com alto conteúdo de matéria orgânica, elementos minerais (K, Ca e Mg), baixo pH, cor marrom-escura devido à presença de polímeros de alto peso molecular.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros da vinhaça tal como é aplicada na lavoura da Usina Ipiranga, Descalvado - SP. Nessa tabela nota-se: (i) o baixo teor de potássio, se comparado com a vinhaça in natura que apresenta 4 Kg/m3 K em média; (ii) os altos teores de DQO (demanda química de oxigênio) comparados ao esgoto doméstico; (iii) os altos teores de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) comparados ao esgoto doméstico; (iv) riqueza em minerais.

Tabela 1 – Análise de vinhaça safra 2007 da Usina Ipiranga – Descalvado

Parâmetro	Unidade	Abril	Maio	Junho
pH	Adimensional	4.92	5.04	4.9
Resíduo não filtrável total	mg/L	4562	7863	4716
Resíduo filtrável total	mg/L	1640	875	1160
Dureza Total	mg/L CaCO3	3057	1575	1221
Condutividade	mili S/cm	1.85	3.95	1.66
Nitrogênio Nitrato	mg/L N-NO3	100	53	67
Nitrogênio Nitrito	mg/L N-NO2	0.3	2.5	1
Nitrogênio Amoniacal	mg/L N-NH3	96	38	44
Nitrogênio Total de Kjeldahl[2]	mg/L N-NH3	196	335	107
Sódio	mg/L Na	31	26	22
Potássio	Kg/m3 K	1.35	1.77	1.15
Cálcio	mg/L Ca	154	244	122
Magnésio	mg/L Mg	150	145	172
Sulfato	mg/L SO4	380	475	444
Fosfato	mg/L PO4	37	50	16
DQO	mg/L O2	15262	11767	12975
DBO 5 dias a 20º C	mg/L O2	5397	5000	5000

Fonte: (TASSIM, 2009)

3.4.2 Métodos de tratamento de vinhaça

Publicam-se muitas tentativas para evitar a fertirrigação direta por vários métodos de tratamento da vinhaça. Apesar dos avanços, o custo dos processos ainda não é viável para o produtor alcooleiro. Segundo Luksemberg; Sá e Durso (1980), para tratamento e aproveitamento da vinhaça foram apresentados os seguintes processos que ainda são os mesmos, alterando-se apenas sua tecnologia:

- Tratamentos físico-químicos - coagulação, floculação e sedimentação com baixo consumo de energia e remoção de DQO de até 50%, havendo inclusive remoção de cor;
- Osmose reversa - a vinhaça é passada por pressão por uma membrana seletiva. No permeado, há redução na DQO de 90%. É um processo caro com grande consumo energético e dificuldade em encontrar uma membrana adequada;

[2] O termo nitrogênio total de Kjeldahl refere-se à combinação da amônia e do nitrogênio orgânico.

- Incineração - sistema de reação em leito fluidizado. Apesar de reaproveitar os sais minerais nas cinzas, é economicamente inviável;
- Lagoas aeróbicas de Jacinto - a planta aquática, conhecida vulgarmente como Jacinto (aguapé) é a biomassa vegetal produzida a partir da remoção da matéria orgânica e nutriente da vinhaça e pode ser aproveitada na ração animal ou para produção de biogás;
- Lagoas de estabilização - o resíduo pode ser estabilizado com prazo de até 9 meses por ação fermentativa natural, provocando desprendimento de gases com odor desagradável, infiltrações e contaminações do lençol freático;
- Filtros biológicos - biodegradação anaeróbia;
- Produção de biomassa proteica fúngica ou unicelular, no entanto há necessidade de tratamento posterior;
- Reatores anaeróbios – produção de pelo menos 50 % de gás metano/L de vinhaça durante a degradação anaeróbia;
- Fertirrigação – a vinhaça *in natura* é utilizada na lavoura para reaproveitamento de nitrogênio, fósforo, potássio, água e matéria orgânica.
- Atualmente existe uma nova linha – a redução de volume da vinhaça – que é economicamente viável, consegue-se reduzir em 5 vezes o volume. Assim, ocorre economia no transporte (JORNALCANA, 2009)

Menezes (1989) citou que pode ocorrer contaminação de solos e corpos de água quando quantidades excessivas e seqüenciais de vinhaça são aplicadas numa mesma área. No Brasil, a vinhaça *in natura* é amplamente aproveitada como fertilizante, em lavouras, no entanto o controle de tal aproveitamento ainda tem muito a ser desenvolvido.

3.4.3 Sistemas de distribuição de vinhaça

Matioli e Menezes (1984), em seus estudos, demonstram a otimização dos sistemas de aplicação de resíduos líquidos na lavoura canavieira, destacando a necessidade de serem elaborados projetos fundamentados em critérios técnico-econômicos visando, ao máximo, ao aproveitamento do potencial nutricional da vinhaça e ao enquadramento dos sistemas de aplicação dentro das exigências dos órgãos responsáveis pelo controle de poluição do meio-ambiente. Os autores consideram, de

início, que todos os sistemas de aplicação apresentam certas limitações que resultam em desperdício de vinhaça e prejuízos no custo global de produção do açúcar e álcool. Por exemplo, o sistema de aplicação de vinhaça *in natura* através de sulcos de infiltração, embora se caracterize por certa facilidade operacional, exige rigorosa sistematização do terreno além de extensas áreas para sua aplicação racional. O sistema de aplicação de vinhaça através de irrigação por aspersão no sistema convencional, ou seja, coleta de canais que margeiam os talhões, com o auxílio de uma moto bomba, e sua distribuição através de aspersores convencionais, por um lado permite melhor controle da quantidade de resíduo líquido aplicado (vinhaça diluída ou não em águas residuais) e maior uniformidade de aplicação; por outro, abrevia a vida útil dos aspersores e das tubulações de aço com tratamento de zinco ou alumínio devido ao elevado poder corrosivo da vinhaça. (MATIOLI E MENEZES, 1984).

O sistema de montagem direta, que compreende um conjunto de moto bomba acoplado a um aspersor denominado canhão hidráulico, montado em chassi com rodas, é a melhor alternativa para o sistema de aplicação de vinhaça por aspersão. Todavia esse processo exige a construção de canais com carreadores laterais para a locomoção dos equipamentos do sistema, além de reformulação do formato dos talhões. No entanto o sistema apresenta vantagens como o maior controle da quantidade aplicada de resíduos, a possibilidade de realização de várias aplicações durante a mesma safra, dispensa de grandes sistematizações do terreno e irrigação, em cada posição, de uma área de aproximadamente um hectare. (MENEZES, 1989)

O sistema de aplicação com caminhões-tanque promove a distribuição da vinhaça através de dois processos: por gravidade e por bomba; no entanto está limitado pela distância econômica do ponto de carregamento às áreas de aplicação. Isto posto, os autores concluíram que a não-otimização dos sistemas de aplicação de resíduos líquidos na lavoura canavieira geralmente leva ao desperdício de vinhaça e de sua riqueza mineral e orgânica, deixando de beneficiar outras áreas carentes e – devido ao excesso de resíduos aplicados – pode até mesmo, provocar prejuízos à qualidade tecnológica da cana-de-açúcar proveniente das áreas fertirrigadas por aspersão e/ ou infiltração. (LEME, 1987).

3.4.4 Vantagens e desvantagens do método por aspersão

O método de aplicação de vinhaça por aspersão com canhão hidráulico é mostrado na Figura 9 na qual é possível perceber tanto a simplicidade do sistema apresentado como grande vantagem, quanto a não uniformidade apontada com uma das grandes desvantagens

Figura 9 – Canhão hidráulico em funcionamento
Fonte: (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2010)

As vantagens do uso do canhão hidráulico segundo Leme; Rosenfeld e Baptistella (1979) são: não haver necessidade de sistematização do terreno ou sulcação em desnível, poder ser usado em áreas com declive acentuado e operado em qualquer tipo de solo, poder ser usado em todos os ciclos e fases da cultura, permitir perfeito controle da quantidade de vinhaça aplicada, irrigar extensas áreas por unidade de tempo, apresentar baixo custo operacional e promover economia de mão-de-obra.

Já as desvantagens desta prática são: ser desuniforme em conseqüência de chuva e das variações instantâneas da direção do vento; exigir um sistema de distribuição da vinhaça por canais adequados; requerer alta pressão de serviço e necessitar de mão-de-obra operacional adequada (LEME; ROSENFELD e BAPTISTELLA, 1979).

Alguns anos mais tarde, Leme (1987) propôs um sistema otimizado de operação do equipamento de montagem direta para fertirrigação das soqueiras de cana-de-açúcar

que, segundo ele, resulta em economia de combustível, redução da pressão de operação, aumento da vida útil dos equipamentos e maior eficiência operacional.

Muito embora este sistema otimizado proporcione maior eficiência operacional em função da redução das posições de estacionamento do equipamento ou redução da área perdida com canais, ele também dá origem a problemas de ordem técnico-operacionais, como desuniformidade da distribuição de pressão, maior necessidade de mão-de-obra para transporte da tubulação e dificuldade de operar o sistema no período noturno. Por isso Leme (1987) apresentou nova alternativa para aplicação de vinhaça por aspersão, através de equipamento autopropelido com tubulação de polietileno de média densidade.

Em relação ao sistema montagem direta, Leme (1987) relacionou as seguintes vantagens da nova alternativa de aplicação: a redução da mão-de-obra necessária, maior automatização operacional de todo o sistema; possibilidade de aplicação de vinhaça no período noturno; menor perda de área com canais para transporte de vinhaça, maior rendimento operacional; menor número de mudanças e transporte dos equipamentos, menor quantidade de tubulação de alumínio e acessórios; possibilidade de aplicação da vinhaça com uma distribuição de pressão de aspersão mais equilibrada e a grande flexibilidade de trabalho.

No entanto também existem algumas desvantagens nesse sistema como: maior pressão requerida na entrada da máquina; maior consumo de combustível (óleo diesel); a necessidade de transporte da máquina e do conjunto moto bomba por ocasião da mudança de posição de estacionamento desta e o fato de que o equipamento é mais pesado que o de montagem direta. (LEME, 1987)

A escolha de um dos dois sistemas – ou de um terceiro – no entanto deve ser feita em função da avaliação das condições locais de operação e do manejo da área de fertirrigação (LEME; ROSENFELD e BAPTISTELLA, 1979).

3.4.5 Legislação sobre a vinhaça

Devido à grande produção deste subproduto do álcool, desde 1965 houve preocupação em desenvolver um código jurídico que restringisse o descarte de vinhaça em qualquer ecossistema. Com o passar dos anos, os códigos evoluíram de forma a ser possível tornar a reutilização da vinhaça cada vez mais controlada. Apresenta-se, nos

próximos dois itens, um breve resumo com algumas das mais importantes leis criadas tanto pelo governo federal, quanto as específicas para o Estado de São Paulo.

3.4.5.1 Legislação Federal segundo EMENTÁRIO NACIONAL (2009)

Algumas das mais importantes leis para a manutenção do meio ambiente vigentes no país mostram, desde a criação do Código Florestal, em 1965, uma crescente preocupação com os impactos causados pela indústria sucroalcooleira. Nesta coletânea não estão citadas todas as leis, mas sim aquelas de maior impacto para o setor em relação à vinhaça e, consequentemente, mais importantes em relação ao foco da pesquisa:

- Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 – código Florestal;
- Portaria MINISTÉRIO n° 323, de 29/11/1978 – proíbe o lançamento da vinhaça nos mananciais superficiais;
- Portaria do Ministério do Interior nº 158, de 03 de novembro de 1980 – dispõe sobre o lançamento de vinhoto em coleções hídricas e sobre efluentes de destilarias e usinas de açúcar;
- Portaria do Ministério do Interior nº 124, de 20 de agosto de 1980 – normas para localização e construção de instalações que armazenem substâncias que possam causar poluição hídrica;
- Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA – n°0002, de 05/06/1984 – determinação da realização de estudos e apresentação de projeto de resolução contendo normas para controle da poluição causada pelos efluentes das destilarias de álcool e pelas águas de lavagem da cana;
- Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA – n°0001, de 23/01/1986 – obrigatoriedade da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) e do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para novas indústrias instaladas ou qualquer ampliação efetuada nas existentes;
- Resolução do CNRH nº 15, de 01 de junho de 2001 – diretrizes para a gestão integrada das águas superficiais, subterrâneas e meteóricas;

- Portaria do Ministério da Saúde nº 518/04, de 25 de março de 2004 – estabelece procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA é o órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente-SISNAMA, foi instituído pela Lei 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, regulamentada pelo Decreto 99.274/90. O CONAMA é composto por Plenário, CIPAM, Grupos Assessores, Câmaras Técnicas e Grupos de Trabalho. O Conselho é presidido pelo Ministro do Meio Ambiente e sua Secretaria Executiva é exercida pelo Secretário-Executivo do MMA. O Conselho é um colegiado representativo de cinco setores, a saber: órgãos federais, estaduais e municipais, setor empresarial e sociedade civil. CONAMA (2010).

3.4.5.2 Legislação específica para o Estado de São Paulo

Listam-se algumas das mais importantes leis focadas na manutenção do meio ambiente específicas do Estado de São Paulo com o objetivo de mostrar que a preocupação nesse Estado foi maior, principalmente, por conter mais de 60% produção de cana-de-açúcar. Vale ressaltar o Decreto nº 8.468 de 08/09/1976 e a Lei n° 6.134 de 02/06/1988.

Legislação do Estado de São Paulo:

- Lei nº 997, de 31 de maio de 1976 – dispõe sobre o controle da poluição do meio-ambiente;
- Decreto nº 8.468, de 08 de setembro de 1976 – aprova o regulamento da Lei nº 997 de31 de maio de 1976 – Controle da poluição das águas, ar, resíduos, padrões, exigências, licenciamento, penalidades;
- Lei n° 6.134, de 02/06/1988, art. 5°, do Estado de São Paulo. – "Os resíduos líquidos, sólidos ou gasosos, provenientes de atividades agropecuárias, industriais, comerciais ou de qualquer outra natureza, só poderão ser conduzidos ou lançados de forma a não poluírem as águas subterrâneas";
- Lei nº 6.171, de 04 de julho de 1988 – dispõe sobre o uso, conservação e preservação do solo agrícola;

- Constituição do Estado de São Paulo de 05 de outubro de 1989 – dispositivos constitucionais de interesse para a área ambiental;
- Decreto nº 32.955, de 07 de junho de 1991 – regulamenta a Lei nº 6.134, de 02 junho de 1988 que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas;
- Lei nº 7.641, de 19 de dezembro de 1991 – dispõe sobre a proteção ambiental das bacias dos Rios Pardo, Mogi-Guaçú e Médio Grande e estabelece critérios para uso e ocupação do solo;
- Decreto nº 41.719, de 16 de abril de 1997 – regulamenta a Lei nº 6.171, de 04 de julho de 1988 que dispõe sobre uso, conservação e preservação do solo agrícola;
- Decisão de Diretoria da CETESB nº 023/00/C/E, de 15 de junho de 2000 – aprova a implantação de procedimento para a atuação em áreas contaminadas, tendo como base o documento intitulado "Procedimentos para Gerenciamento de Áreas Contaminadas";
- Decisão de Diretoria da CETESB nº 014/01/E, de 26 de julho de 2001 – aprova o relatório sobre estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo e aplicação dos valores orientadores pela CETESB.
- Resolução SMA - 88, de 19-12-2008 – Define as diretrizes técnicas para o licenciamento de empreendimentos do setor sucroalcooleiro no Estado de São Paulo. (CETESB, 2010).

3.4.5.3 Norma técnica da CETESB

No Estado de São Paulo, existe ainda a normativa técnica que tem como objetivo dispor sobre os critérios e procedimentos para a aplicação da vinhaça, gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento de cana-de-açúcar.

Segundo a norma técnica CETESB (P4.231), versão Janeiro de 2005 até a data de 2 (dois) de abril de cada ano, o empreendimento deverá encaminhar à CETESB o Plano de Aplicação de Vinhaça.

Este plano no solo constitui-se de um memorial descritivo sobre a pratica de aplicação pretendida, acompanhado de "planta" na escala de 1:20.000, ou superior, contendo as taxas indicativas de dosagem a serem aplicadas, em m3 ha-1, diferenciadas em cores, com intervalos de aplicação a cada 150 m3.

Este plano ou planilha complementar deverá também, no mínimo, indicar a localização dos tanques de armazenamento, dos canais mestres ou primários (de uso

permanente de distribuição), a localização dos cursos de água; poços utilizados para abastecimento, dados de geologia e hidrogeologia local, os resultados analíticos dos solos e as áreas de interesse ambiental e formas e dosagens da aplicação de vinhaça.

Para calcular a quantidade máxima de vinhaça a ser aplicada aos solos agrícolas, elaborou-se a seguinte equação (1), contendo características do solo e concentrações de potássio:

(1) m³ de vinhaça/ha = [(0,05 x CTC - ks) x 3744 + 185] / kvi

Em que:

0,05 = 5% da capacidade de troca catiônica (CTC)**;**
CTC = capacidade de troca catiônica, expressa em cmolc dm-3 a pH 7,0**;**
ks = concentração de potássio no solo, expresso em cmolc dm-3, a profundidade de 0,80 m;
3744 = constante para converter os resultados da analise de fertilidade, quando expressos em cmolc dm-3 ou meq 100 cm-3, para kg de potássio em um volume de um hectare por 0,80 m de profundidade;
185 = quantidade de "kg" de K2O extraído pela cultura por ha, por corte;
kvi = concentração de potássio na vinhaça, expressa em kilogramas de K2O m-3, apresentada em boletim de resultado analítico.

O cálculo do item Kvi da fórmula da CETESB para aplicação da vinhaça na lavoura foi o objetivo desta pesquisa.

Com toda a legislação apresentada buscou-se demonstrar que, de fato, o Estado está preocupado com o meio ambiente e que existem várias leis, decretos e normas para regularização da atividade sucroalcooleira, de modo que a mesma seja sustentável.

3.4.6 Predomínio da fertirrigação

A vinhaça é rica em água e sais minerais que, associados às dificuldades técnicas e econômicas envolvidas em seu tratamento, aparecem como principais razões para justificar a adoção e a ampla difusão da prática de sua destinação por aspersão. A

fertirrigação – nome pelo qual ficou conhecida a prática adotada pela agroindústria canavieira nacional a partir da década de 80, em substituição ao lançamento do resíduo em cursos de água consiste na infiltração da vinhaça *in natura* no solo, com objetivo de fertilizá-lo e, ao mesmo tempo, de irrigar a cultura da cana-de-açúcar. A fertirrigação é empregada como expediente substituto ao uso da fertilização química, constituindo uma fonte de nutrientes minerais, principalmente de potássio (CORTEZ, 1992).

Com o aumento da produção da vinhaça ocasionado pela implementação do Proálcool e com a proibição da descarga do resíduo nos cursos d'água no final dos anos 70, a fertirrigação tornou-se solução alternativa para a sua disposição direta nos rios. Assim, nasceu a técnica de aplicação da vinhaça *in natura* em áreas plantadas com cana. As principais vantagens que levam à ampla difusão desta técnica hoje são segundo Cortez (1992):

- O baixo investimento inicial requerido (tanques de decantação, caminhões, e atualmente bombas e dutos);
- O baixo custo de manutenção (pouca mão de obra, diesel e eletricidade);
- A rápida disposição da vinhaça no solo (sem necessidade de grandes reservatórios reguladores)
- Os ganhos compatíveis com o investimento (há lucros com a reciclagem do potássio no solo e o retorno do investimento é bastante rápido);
- O fechamento do ciclo interno que envolve a parte agrícola e a industrial no mesmo setor, diminuindo a dependência de insumos externos (fertilizantes), ausência do envolvimento de tecnologia complexa e ainda o aumento da produtividade da safra e da produtividade na fabricação do açúcar.

Mesmo diante das vantagens proporcionadas pela adoção da fertirrigação, ainda existem dúvidas quanto à adequação da prática do ponto de vista da proteção do meio ambiente, principalmente no que diz respeito a seus efeitos de longo prazo, tanto no solo quanto nos aquíferos (HASSUDA, 1989).

Hirata (1991) identificou a atividade sucroalcooleira como um dos fatores de vulnerabilidade dos aquíferos subterrâneos paulistas.

Sabe-se que a aplicação sem critérios de diversos teores de vinhaça ao solo pode causar desequilíbrio de nutrientes, gerando resultados diferentes dos esperados. A quantidade "ideal" de aplicação da vinhaça em função do tipo de solo e segundo as variedades de cana é explicitado nos padrões exigidos pela CETESB. Convém lembrar que a CETESB é órgão estadual e suas normas atingem apenas as lavouras do Estado de São Paulo. Os riscos da aplicação de grandes volumes de vinhaça por hectare incluem salinização do solo, pois há quantidades significativas de potássio e sódio na vinhaça. Atualmente, a CETESB disponibiliza mapa com informações da situação anual de cada usina sobre a fertirrigação, detalhando os volumes de vinhaça aplicados à região de cada produtor (CORTEZ, 1992).

Segundo Cortez (1992), levando em consideração a quantidade de vinhaça produzida no Brasil, a fertirrigação constituiu, sem dúvida, um progresso, se quando comparada ao expediente anterior, quando era despejada nos mananciais de superfície. No entanto em muitos casos, apesar das legislações existentes e das fiscalizações que ocorrem, o descarte ou mesmo a fertirrigação são realizados de forma inadequada. Os produtores têm despejado, nas lavouras quantidades excessivamente elevada ou, ainda, próximo a mananciais superficiais.

3.4.7 Funções e comportamento do potássio no solo

O potássio, segundo Malavolta (1980), é um macronutriente[3] absorvido da solução do solo pelas raízes, predominando o contato pelo processo de difusão. No Brasil, sua aplicação nas culturas é feita quase totalmente no plantio e/ou cobertura em aplicação direta ao solo (ZANINI, 1991).

Tavora (1982) atentou para o fato de que o potássio está presente na maioria das rochas em combinação com outros elementos, principalmente o alumínio e a sílica, sob a forma de silicatos de alumínio e de potássio, em minerais tais como a moscovita e a biotita. Cerca de 95% da produção mundial de potássio são consumidos sob a forma de fertilizantes.

[3] Os macronutrientes são os elementos básicos para o desenvolvimento das plantas e necessários em maior volume. São eles: Carbono, Oxigênio, Hidrogênio, Nitrogênio, Fósforo , Potássio, Cálcio, Magnésio e Enxofre.

Ele é absorvido pelas raízes na forma de K+ e desempenha várias funções na planta entre os quais pode-se citar a melhor eficiência de uso da água, em conseqüência do controle da abertura e fechamento dos estômatos, maior translocação de carboidratos produzidos nas folhas para outros órgãos da planta, maior eficiência enzimática e melhoria da qualidade comercial da planta (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

O potássio também é requerido para a síntese proteica em plantas, portanto, quando deficientes deste nutriente, as plantas apresentam menor síntese de proteínas e acúmulo de compostos nitrogenados solúveis, como aminoácidos, amidas e nitrato (FAQUIN, 1994). Segundo Scaloppi e Brito (1986), o potássio solúvel ou trocável geralmente está presente em pequena proporção, mas, ocasionalmente, pode estar incluído entre os principais constituintes da salinidade do solo. Cloreto, sulfato e, menos freqüentemente, nitrato e pequenas quantidades de bicarbonatos, representam os anions principais.

Sparks e Huang (1985) reportam que o potássio do solo pode ser lixiviado[4], absorvido pelo solo ou pela planta. Os fatores que influenciam no seu movimento no solo são a condutividade da água, o pH do solo, o método e a taxa de aplicação deste elemento, a umidade do solo e a absorção pela planta.

Segundo Lelis Neto (2008), a habilidade do solo em reter o potássio aplicado é muito dependente da capacidade de troca de cátions do solo (valor que está na equação da CETESB para fertirrigação, "CTC"). Assim, as quantidades de argila e matéria orgânica no solo, influenciam, fortemente, o grau de lixiviação. Portanto o solo, com alta capacidade de troca, tem grande habilidade em reter o potássio aplicado.

Lelis Neto (2008) também comentou sobre os mecanismos que controlam o transporte do potássio no solo e afirmou que são baseados na rápida troca com outros cátions e, quando sua quantidade no solo é relativamente pequena com relação à capacidade de troca de cátions, a adsorção é controlada, principalmente, pelas variações da concentração de potássio na solução do solo. Quando a concentração de potássio em solução do solo aumenta, a capacidade tampão do potássio decresce e a sua velocidade de transporte aumenta.

[4] Lixiviado: Consiste no movimento do vertical do íons no solo, para profundidades abaixo daquelas alcançadas pelas raízes.

3.4.8 Funções e comportamento do potássio no corpo humano

Segundo Felippe Jr. (1990), o potássio é o mais importante íon do espaço intracelular e exerce papel fundamental na manutenção de algumas das funções básicas da célula. São dois os principais efeitos celulares do íon potássio, ele é o responsável principal pela manutenção do volume intracelular, da mesma forma que o sódio constitui o principal cátion do espaço extracelular; faz alterações relativamente modestas da concentração intracelular de potássio que podem acarretar grandes variações do pH intracelular, uma vez que os íons K+ e H+ competem por sítios de ligação junto às macromoléculas intracelulares e, como o potencial de membrana depende crucialmente do K+, as variações das concentrações desse íon, especialmente no espaço extracelular, podem levar a importantes perturbações funcionais das células cardíacas, dando origem a arritmias potencialmente fatais. Por essa razão, a concentração de K+ no espaço extracelular deve ser mantida dentro de limites estreitos, entre 3,5 e 5,5 mEq/L em condições normais.

Segundo Goodman e Gilman (1975), a hipercaliemia (excesso de potássio) é um distúrbio eletrolítico comum cujas principais causas são doenças que inibem o funcionamento correto dos rins. O eletrocardiograma, Figura 10, possui um padrão progressivo de alterações, de acordo com a gravidade e a rapidez de instalação da hipercaliemia. A primeira alteração eletrocardiográfica é a diminuição do intervalo QT, associada a uma onda T – re-polarização do ventrículo – alta e apiculada. A explicação para essa alteração é a re-polarização ventricular precoce. Em seguida, a lentidão na condução miocárdica manifesta-se com o aplainamento da onda P – despolarização do átrio – e o alargamento do Q R S – despolarização do ventrículo. No final, a onda P desaparece. Entretanto, o ritmo continua a ser sinusal, porém sem atividade miocárdica atrial.

As principais alterações eletrocardiográficas da hipercaliemia:

- Redução do intervalo QT, com ondas T altas e apiculadas;
- Achatamento da onda P;
- Alargamento do QRS;
- Desaparecimento da onda P.

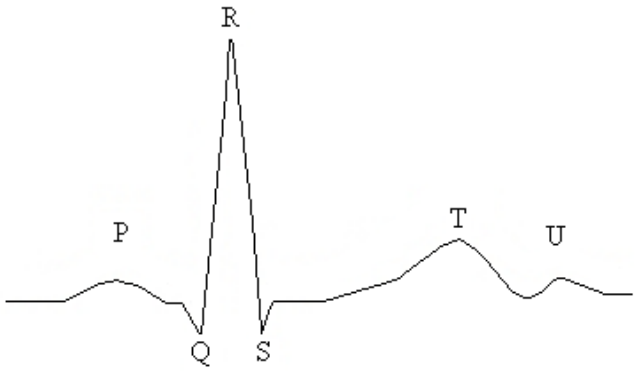

Figura 10 – Eletrocardiograma normal, com o nome de cada curva

3.5. Trabalhos relacionados

Salviano (2002), realizou a modelagem do processo de tratamento de efluentes orgânicos da Rhodia Paulínia sendo o foco de seu trabalho a predição da concentração de nitrogênio no seio do reator biológico para auxiliar o controle manual deste sistema, mais especificamente a dosagem de hidróxido de amônio, o que pode evitar o excesso de nitrogênio enviado para a bacia fluvial. A aplicação de redes neurais a este sistema se justificou pela difícil modelagem uma vez que existe uma extensa base de dados com todas as informações das variáveis de entrada e saída. A topologia utilizada foi de rede neural de 11 neurônios na camada de entrada, 27 na camada oculta e 1 na camada de saída. Este trabalho teve, como principal resultado, a eliminação da adição de anti-espumante ao reator o que, segundo Salviano (2002), contribuiu para a estabilização do reator.

Hanisch et al. (1997) realizou um trabalho em uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) com finalidade de contribuir para o correto funcionamento da estação, isto para não acarretar problemas tanto do ponto de vista social, quanto do biológico. Segundo o autor, os resíduos provenientes das atividades humanas devem ser tratados antes de serem dispostos no ambiente. Como em outros sistemas já citados, a ETE apresenta problemas em relação à modelagem dos processos dinâmicos que são difíceis de serem descritos por métodos matemáticos convencionais.

Além disso, o controle desses processos apresenta algumas dificuldades, como por exemplo, a presença de sistemas não-lineares com vários graus de liberdade e incerteza. A modelagem de uma ETE é um problema com tais características. As aplicações que utilizam redes neurais aumentaram significativamente nos últimos anos

em diversas áreas. Essa tecnologia se encaixa muito bem em problemas de controle, possibilitando um desempenho superior ao dos modelos convencionais (HANISCH et al.,1997).

Rodríguez (2003) desenvolveu um sensor virtual para a determinação da concentração de biomassa em reatores anaeróbios baseado em sensores físicos de pressão e um observador de estados adaptativo. O projeto do observador de estados foi realizado a partir da lei da conservação da massa das espécies químicas e biológicas relevantes do processo e a cinética de crescimento microbiano segundo o modelo de Monod.

Rodríguez (2003) construiu um equipamento denominado Respirômetro Anaeróbio que possibilitou a obtenção de dados a partir de ensaios experimentais de digestão anaeróbia em regime estritamente metanogênico e com isso validou o sensor virtual. O Respirômetro Anaeróbio consiste de uma série de oito reatores de bancada em batelada.

Carvalho et al. (1998) se propôs a realizar a modelagem de um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), utilizando Redes Neurais Artificiais como uma técnica de modelagem baseada nos sinais medidos de entrada e saída do processo.

Tal reator é parte integrante do projeto STEPAA – Sistema de Tratamento de Esgotos por Processos Aeróbios e Anaeróbios – localizado no Laboratório de Instalações Piloto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais. O reator em questão realiza a etapa de pré-tratamento do referido projeto, que conjuga tecnologias anaeróbias e aeróbias. Os modelos do reator UASB derivados incorporam as variações dinâmicas e não linearidades intrínsecas do tratamento, permitindo-se predizer a qualidade do afluente (CARVALHO et al.,1998).

4 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Segundo Haykin (2000), o cérebro humano é considerado o mais fascinante processador baseado em carbono existente. É composto por aproximadamente 10 bilhões de neurônios. Todas as funções e movimentos do organismo estão relacionados ao funcionamento dessas pequenas células. Os neurônios estão conectados uns aos outros através de sinapses e, juntos, formam uma grande rede, chamada rede neural. As sinapses transmitem estímulos através de diferentes concentrações de Na+ e K+, e o resultado pode ser estendido por todo o corpo humano. Esta grande rede proporciona uma fabulosa capacidade de processamento e armazenamento de informação.

Os principais componentes dos neurônios biológicos – Figura 11 –, segundo Silva (2009) são: os dendritos, que têm por função receber os estímulos transmitidos pelos outros neurônios; o corpo de neurônio, também chamado de soma, que é responsável por coletar e combinar informações vindas de outros neurônios; e o axônio, que é constituído de uma fibra tubular que pode alcançar até alguns metros, e é responsável por transmitir os estímulos para outras células.

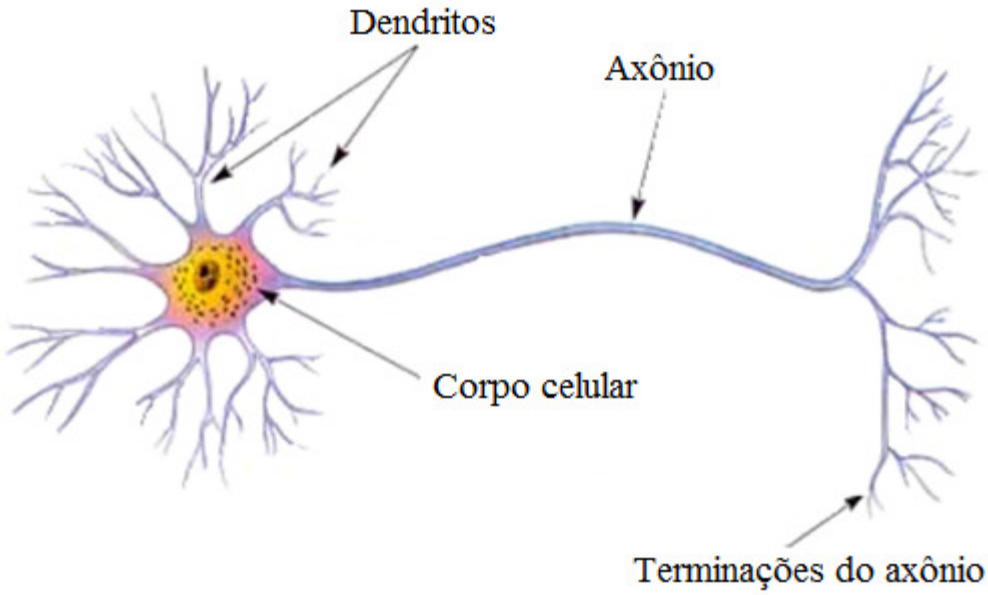

Figura 11 – Neurônio biológico
Fonte: (INSTITUTO FRANCISCO PACHECO DIAS, 2010)

O sistema nervoso é formado por um conjunto extremamente complexo de neurônios, cuja comunicação é realizada através de impulsos. Quando um impulso é recebido, o neurônio o processa e, passado um limite de ação, dispara um segundo impulso que produz uma substância neurotransmissora a qual flui do corpo celular para o axônio (que por sua vez pode ou não estar conectado a um dendrito de outra célula). O neurônio que transmite o pulso pode controlar a frequência de pulsos aumentando ou diminuindo a polaridade na membrana pós sináptica. Eles têm um papel essencial na determinação do funcionamento, comportamento e raciocínio do ser humano. Ao contrário das redes neurais artificiais, as naturais não transmitem sinais negativos; sua ativação é medida pela freqüência com que emitem pulsos, freqüência esta de pulsos contínuos e positivos. As redes naturais não são uniformes como as artificiais e apresentam uniformidade apenas em alguns pontos do organismo. Seus pulsos não são síncronos ou assíncronos, devido ao fato de não serem contínuos, o que as difere de redes artificiais (LABORATOTY OF COMPUTATIONAL INTELLIGENCE – LABIC, 2010).

Assim, o sistema nervoso humano pode ser visto como um sistema com três estágios: o centro do sistema (cérebro), representado pela rede neural que recebe informações e toma decisões; os receptores, que convertem os estímulos do corpo ou do ambiente em impulsos elétricos que transmitem informação para a rede neural; e os atuadores, que, por sua vez, convertem impulsos elétricos em respostas para a saída do sistema (LABORATOTY OF COMPUTATIONAL INTELLIGENCE – LABIC, 2010).

4.1 Histórico das Redes Neurais Artificiais

Os primeiros documentos mencionados sobre redes neurais ou neurocomputação datam de 1943 com McCulloch e Pitts que projetaram a estrutura conhecida como a primeira rede neural. Esses pesquisadores propuseram um modelo de neurônio como uma unidade de processamento binária e provaram que esta unidade é capaz de executar muitas operações lógicas. Esse modelo, apesar de muito simples, trouxe uma grande contribuição para as discussões sobre a construção dos primeiros computadores digitais, permitindo a criação dos primeiros modelos matemáticos de dispositivos artificiais que buscavam analogias biológicas (uma máquina baseada ou inspirada no cérebro humano). Muitos outros artigos e livros surgiram, desde então, porém pouco resultado

foi obtido. Finalmente em 1948, N. Wiener criou a palavra cibernética para descrever, de forma unificada, controle e comunicação nos organismos vivos e nas máquinas. Em 1949, Donald O. Hebb apresentou uma hipótese a respeito da maneira com que a força das sinapses no cérebro se altera em resposta à experiência. Em particular, ele sugeriu que as conexões entre células ativadas ao mesmo tempo tendem a se fortalecer, enquanto as outras conexões tendem a se enfraquecer. Essa hipótese passou a influir decisivamente na evolução da teoria de aprendizagem em RNAs. Ele escreveu o livro intitulado "*The Organization of Behavior*" defendia a ideia de que o condicionamento psicológico clássico está presente em qualquer parte dos animais pelo fato de constituirem propriedade de neurônios individuais. Suas ideias não eram completamente novas, mas Hebb foi o primeiro a propor uma lei de aprendizagem específica para as sinapses dos neurônios. Este primeiro passo serviu de inspiração para que muitos outros pesquisadores perseguissem a mesma ideia (GEROMEL, 2003).

Segundo Aronne (2009), foi durante as décadas de 50 e 60 que os trabalhos inovadores nessa área foram criando novas técnicas e descobrindo novas características do cérebro humano que estimularam a criação de novos modelos de organização das redes neurais. Os desenvolvimentos de modelos e teorias ficaram, no entanto, aquém das suas aplicações e, durante a década de 70, havia certo desânimo na área. Essa situação foi revertida na década de 80 com a introdução do algoritmo de retro-propagação e com a difusão do uso de microcomputadores, que permitiram implementar e testar os complexos modelos desenvolvidos. Portanto a utilização e o desenvolvimento de redes neurais assim como a compreensão do cérebro têm evoluído intensamente nos últimos vinte anos.

4.2 Redes neurais artificiais

Segundo Geromel (2003), as RNAs são técnicas computacionais que têm capacidade para solucionar problemas por intermédio de circuitos simples que simulam o funcionamento e o comportamento do cérebro humano. Elas apresentam um modelo inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes, que adquirem conhecimento através da experiência, ou seja, aprendendo, errando e fazendo descobertas. Uma rede neural artificial pode ter centenas ou até milhares de unidades de processamento, enquanto o cérebro de um mamífero pode conter muitos bilhões de neurônios.

A forma mais simples de rede neural artificial é o *perceptron* – utilizado na classificação de padrões. Os *perceptrons,* quando em única camada, são capazes de resolver problemas lineares, ou seja, classificar grupos de dados que podem ser separados por uma reta (SILVA, 2009).

Em 1969, foram provadas algumas ineficiências da rede *perceptron* de uma camada e conjecturou-se, na época, que um resultado similar penderia para uma rede multicamadas do *perceptron*, o que não é verdade, pois as limitações para os cálculos das redes *perceptron* multicamadas são poucas. Embora uma única unidade do ponto inicial fosse completamente limitada em seu poder computacional, mostrou-se que as redes de unidades paralelas do ponto inicial podem aproximar toda a função contínua de um intervalo compacto dos números reais no intervalo [- 1, 1] (LABORATORY OF COMPUTATIONAL INTELLIGENCE, 2010).

A Figura 12 exemplifica os termos linearmente separáveis e não linearmente separáveis – muito utilizados na compreensão das redes neurais de um modo geral.

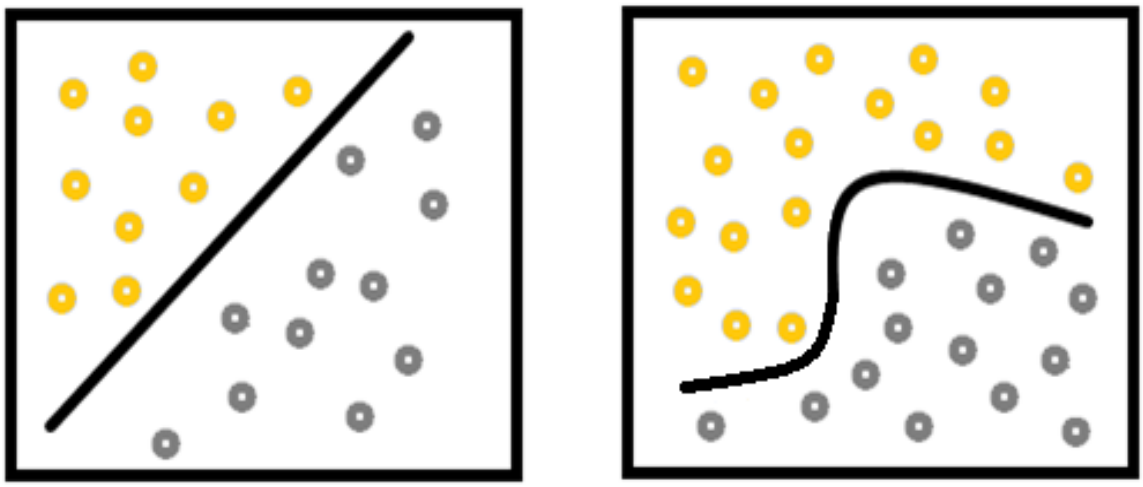

Figura 12 – Ilustração linearmente (esquerda) separável e não linearmente separável (direita)

As redes *Perceptrons* podem ser treinadas por algoritmo conhecido como regra-delta de aprendizagem simples. Tal método de treinamento calcula os erros entre a saída encontrada pela rede neural e a desejada – dados reais do sistema – e utiliza isso para ajustar os pesos (LABORATORY OF COMPUTATIONAL INTELLIGENCE, 2010).

Funcionamento do *perceptron*, após o treinamento:

- Leitura dos valores de entrada;
- Multiplicação por pesos (P1 para entrada 1, P2 para entrada 2 e assim por diante até PN para a entrada N);
- Somatória dos resultados;
- Comparação dos resultados do somatório ao valor de bias;
- Aplicação dos valores na função sigmóide;
- Obtenção da saída.

A Figura 13 ilustra o funcionamento do *perceptron,* já treinado.

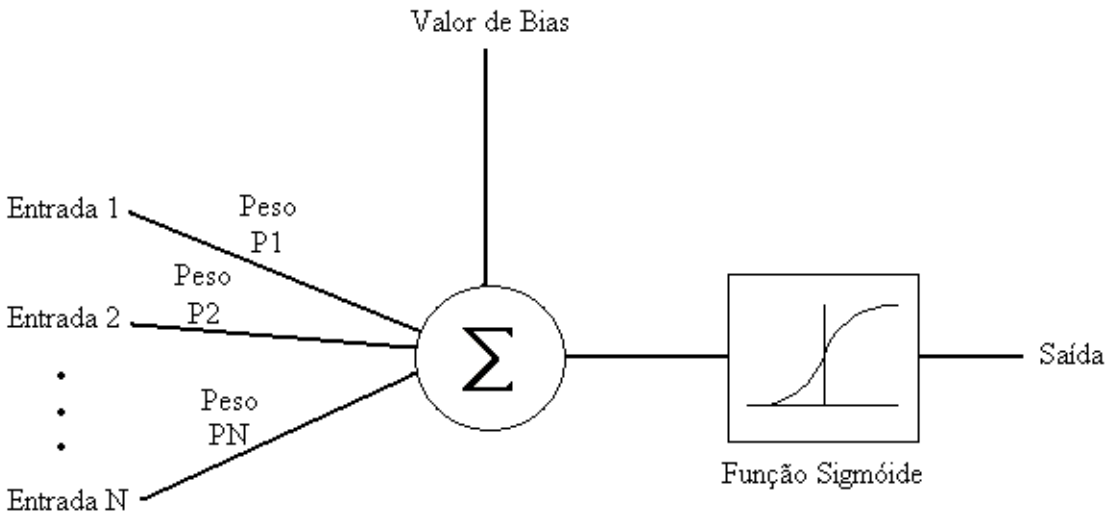

Figura 13 – Funcionamento do *Perceptron*

Caso esta rede ainda não tivesse passado por treinamento, o valor de saída seria comparado com o valor desejado, ou seja, treinamento supervisionado[5] e, após o cálculo do erro, através da regra delta, os valores dos pesos seriam alterados, em busca do melhor resultado.

[5] No caso da aprendizagem supervisionada, assume-se a presença de um "professor", que fornece fornecidas as respostas corretas para cada situação. A aprendizagem é realizada a partir de exemplos (instâncias ou casos de treino) compostos por um vetor de entradas e por um vetor de saídas desejadas. Existem dois tipos de aprendizagem supervisionada: por Classificação, caracterizada por saídas com valores discretos (classes) e por regressão, caracterizada por saídas com valores contínuos, reais. Nesse caso, observa-se uma convergência rápida no resultado. Esse tipo de aprendizagem pode ser comparado à nota de um aluno em uma prova.

4.3 Redes *Perceptron* Multicamadas (PMC)

Esse tipo de rede neural é formado por um conjunto de unidades sensoriais que constituem a camada de entrada, uma ou várias camadas escondidas de nós de processamento, e uma camada de neurônios de saída. Nelas, o sinal de entrada é propagado para as camadas escondidas de forma unidirecional até alcançar os nós de saída. Esse tipo de rede tem sido aplicado na solução de problemas complexos usando a estratégia de treinamento supervisionado combinada com um algoritmo de treinamento largamente usado, chamado *backpropagation*. As redes multicamada baseiam-se em três características fundamentais para resolver os problemas nos quais são aplicadas – Jimenez Cifuentes (2005). A primeira é que se utiliza uma função de ativação não-linear suave, sem descontinuidades, e continuamente diferenciável (ex. sigmóide); a segunda é a presença de neurônios escondidos entre as camadas de entrada e saída são os responsáveis pelo processamento da informação; e a terceira é o alto grau de conectividade entre os neurônios de cada camada.

Algo interessante desse modelo é que cada camada tem uma função específica: a camada de saída é estimulada por dados provenientes da última camada intermediária e, utilizando esses dados, constrói a saída; as camadas intermediárias são comparadores de características e seus pesos, interpretações dos padrões apresentados à camada de entrada. Essa interpretação possibilita que a rede em treinamento crie sua própria representação, muitas vezes mais rica e complexa, do problema e a camada de entrada da rede multicamadas funciona como a camada de entrada do *perceptron*. Vale ressaltar que, se tivermos muitas camadas, as entradas vão perdendo a importância frente ao sistema (SILVA, 2009).

4.3.1 Treinamento das redes PMC

Segundo Alves (2007), o método de treino por retropropagação, ou *backpropagation*, foi o primeiro método de treino para a RNA. Este método consiste basicamente de duas etapas executadas através das camadas da rede: um passo para frente a propagação (*forward*); e um passo para trás – a retropropagação (*backward*). A Figura 14 ilustra os dois passos.

No passo *forward,* valores são aplicados à camada de entrada, são multiplicados e propagados para a frente, camada por camada, até a camada de saída, produzindo um conjunto de valores de saídas como resposta da rede. Após a propagação (passo *forward*), a resposta é comparada ao valor desejado pelo usuário da rede. Caso não seja igual – ou dentro da margem de erro escolhida – é calculado um erro que é retropropagado para a correção de todos os pesos da rede (HAYKIN, 2000).

Este ajuste dos pesos é executado de acordo com uma taxa de aprendizado, de tal modo que se for muito pequena irá convergir muito devagar; se for muito grande, irá saltar e nunca irá convergir (ALVES, 2007).

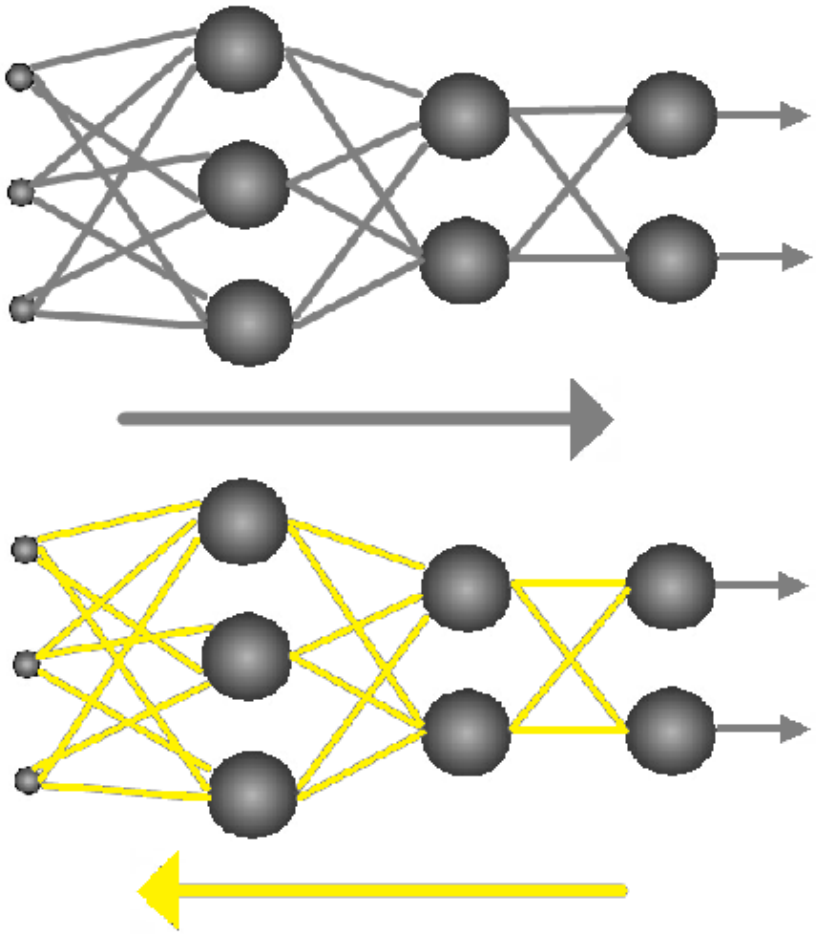

Figura 14 – Passo *feed-forward* (cinza) e *back-propagation* (amarelo)

O que difere a rede multicamadas são suas funções não-lineares, como por exemplo, a função de degrau, a função sigmoidal e a função hiperbólica – como ilustra a Figura 15. Observa-se preferência para as sigmóides por elas serem normalizáveis e diferenciáveis.

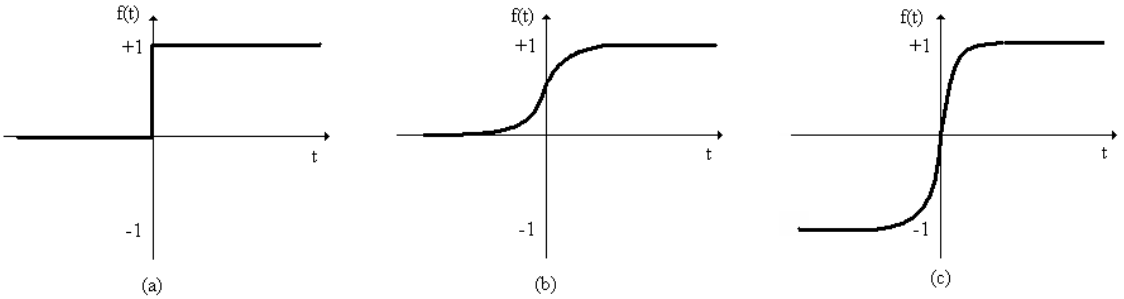

Figura 15 – (a) Função degrau (b) Função sigmoidal (c) Função hiperbólica

Os parâmetros ajustáveis durante o treinamento das redes *perceptron* multicamadas, são:

- Taxa de aprendizagem;
- Erro;
- *Momentum*

Esses parâmetros são ajustados empiricamente, ou seja, a cada simulação podem-se testar novos valores. Para a taxa de aprendizagem, existem limites para que o software convirja, sendo que, no caso deste estudo, valores iguais ou acima de 0,5 já dificultaram a convergência. Quanto ao valor de erro leva-se em consideração aquilo que o usuário espera da rede. Já o *momentum* tem a finalidade de aumentar a velocidade de treinamento da rede neural e, também, de reduzir o perigo de instabilidade, sendo este um termo opcional, sendo o valor utilizado igual a 0,3.

4.3.2 Normalização dos dados

As variáveis referentes às entradas da rede devem ser normalizadas para a faixa [0,1] se estiver sendo utilizada a função sigmóide, ou então, para [-1,1] se for utilizada a tangente hiperbólica. O algoritmo *backpropagation* padrão é muito lento para várias aplicações e seu desempenho piora sensivelmente quando há problemas maiores e mais complexos. Mesmo para problemas relativamente simples, este algoritmo geralmente requer que todos os padrões de treinamento sejam apresentados centenas ou até mesmo

milhares de vezes. Isso limita as utilizações práticas deste algoritmo, permitindo apenas o treinamento de pequenas redes, com poucos milhares de pesos ajustáveis. Embora alguns problemas do mundo real (problemas práticos) possam ser tratados utilizando redes desse tamanho, a maioria dos problemas para os quais a tecnologia neural poderia apresentar uma solução adequada, demandariam redes maiores e mais complexas (ALVES, 2007).

4.3.3 Validação

Segundo Silva (2009), a metodologia utilizada para testar a rede *perceptron* multicamadas nesta pesquisa é chamada de validação cruzada, constituindo-se no seguinte: (i) o conjunto de dados é particionado em dois conjuntos: (ii) o primeiro conjunto de treinamento que se utiliza para treinar a rede com 80% a 90% do total de dados (iii) o segundo conjunto, chamado de conjunto de teste, utilizado para avaliar se a rede está trabalhando de forma satisfatória conta com o restante dos dados, ou seja, de 10% a 20% do total.

Para que seja possível comparar a eficiência de todas as topologias de rede, elas são testadas com o mesmo conjunto de treinamento e comparadas de acordo com os erros entre os resultados e o conjunto de testes. Em alguns casos, uma determinada topologia pode ter desempenho satisfatório no treinamento, mas, durante a fase de validação (aplicação do conjunto teste), a rede produz resultados insatisfatórios.

4.4 Sensores virtuais

Segundo Berni (2004), o sensor virtual – também conhecido como *soft sensor* nos meios acadêmico e industrial – é um modelo computacional que estima variáveis de interesse a partir de uma ou mais variáveis.

O uso de Redes Neurais Artificiais para criação de *soft sensor* deve-se principalmente à sua capacidade de representação de comportamentos não lineares arbitrários, que são bem adequados às aplicações deste trabalho. Dados com ruídos podem ser usados (ATALA et al., 2008).

Ainda segundo Atala et al. (2008), os sensores virtuais apresentam vantagens como possibilidade de desenvolvimento do software próprio, com linguagens abertas

não sendo necessários gastos com Licenças. Além disso, a instalação pode ser feita em qualquer sistema operacional simplificando assim a utilização do *software.* Pode-se citar ainda como vantagem, a simplicidade de treinamento da rede e o curto tempo de desenvolvimento, pois esta técnica permite que o desenvolvedor não precise estudar todo o processo para conseguir elaborar o programa.

No entanto este método apresenta a desvantagem de ser necessária assistência para implementação, operação e possíveis manutenções sempre que ocorrerem mudanças de tecnologia, ou de processo.

Segundo Zanata (2005), a ideia de utilização de sensores virtuais remonta à modelagem matemática de processos com enfoque na predição de propriedades a partir de dados da planta. Os primeiros sensores virtuais surgiram a partir de sistemas de controle indiretos, nos quais a variável de interesse era controlada através do comportamento de outras variáveis – normalmente temperaturas.

4.4.1 Tipos de sensores virtuais

Os sensores virtuais são divididos em três classes. Na primeira classe, um modelo matemático é obtido através de equações que descrevam a natureza do processo; na segunda classe, estão os modelos obtidos através de modelagem caixa preta ou modelagem empírica que fornecem uma descrição do processo através de um mapeamento dos dados de entrada-saída; na terceira classe, estão os sensores virtuais compostos pela modelagem híbrida que combina, em um mesmo modelo do processo, abordagens das duas classes anteriores (AGUIRRE, 2004).

Segundo Zanata (2004), as vantagens dos sensores de segunda classe são que não há necessidade de conhecimentos prévios do sistema, que se podem conseguir bons resultados com pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema, é necessário pequeno esforço computacional após o treinamento, as respostas são rápidas e o sistema é simples o suficiente para ser adaptado após alterações na planta industrial.

Já as desvantagens são a existência de dificuldades para selecionar a estrutura mais apropriada, para selecionar as funções a serem utilizadas e para encontrar a quantidade de termos necessários, sejam modelos matemáticos ou computacionais.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

No desenvolvimento desta pesquisa, foi aplicada a técnica de Redes Neurais Artificiais para simplificar o sistema pretendido e também para conseguir precisão no sensor virtual. Tais cálculos não seriam simples, e talvez nem possíveis, lançando mão de álgebra convencional e técnicas de cálculos químicos. Neste capitulo será discutida a realização da pesquisa, detalhes na coleta de material, análises laboratoriais e redes testadas.

5.1 Coleta de dados

Utilizaram-se, como primeiros valores para os testes com redes neurais artificiais, dados do histórico que a Usina Ipiranga de Descalvado mantém, pois, por exigência da CETESB, os produtores de álcool devem armazenar o histórico dos parâmetros de toda a produção de vinhaça dos últimos 5 anos, no entanto este histórico refere-se a vinhaça aplicada no solo – já diluída em água residuária – o que afeta um pouco os parâmetros escolhidos para os testes.

Com a mistura desta água, a oscilação de valores é menor e, de certa forma, controlada o que torna mais fácil o trabalho das RNA´s, mas os parâmetros que são de interesse para a rede não seriam significativamente, em termos de proporção, alterados em relação à vinhaça *in natura*, razão pela qual foi possível a utilização de tal banco de dados.

No entanto para satisfazer o treinamento da RNA que melhor se adaptou aos testes preliminares para o projeto final, foi realizada uma coleta de vinhaça que aconteceu segundo procedimento descrito:

- A coleta de vinhaça *in natura* foi feita na saída da coluna A da destilaria, no entanto como a vinhaça sai à temperatura de aproximadamente 90 graus, ela passa por um resfriador em espiral logo após, goteja no frasco de amostra, vide Figura 16;
- Cada frasco de vinhaça coletada recebeu uma etiqueta com os seguintes dados: dia da coleta, hora da coleta, tipo de alimentação das dornas de fermentação e numeração sequencial para testar a rede de forma contínua;

- As amostras foram coletadas de 6 em 6 horas e tinham um volume de 200ml. Para completar este volume, foi utilizado sistema de amostragem contínuo que funciona regularmente na usina – detalhe na parte inferior da Figura 16 – que retira pequenas amostras, a cada dois minutos, da tubulação de saída;
- As amostras foram coletadas por sistema automático que conta com temporizador e válvula a solenóide – detalhe na Figura 16;
- Uma vez por semana, durante 40 dias, um lote de frascos foi levado ao Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – USP;
- Total de 140 amostras coletadas.

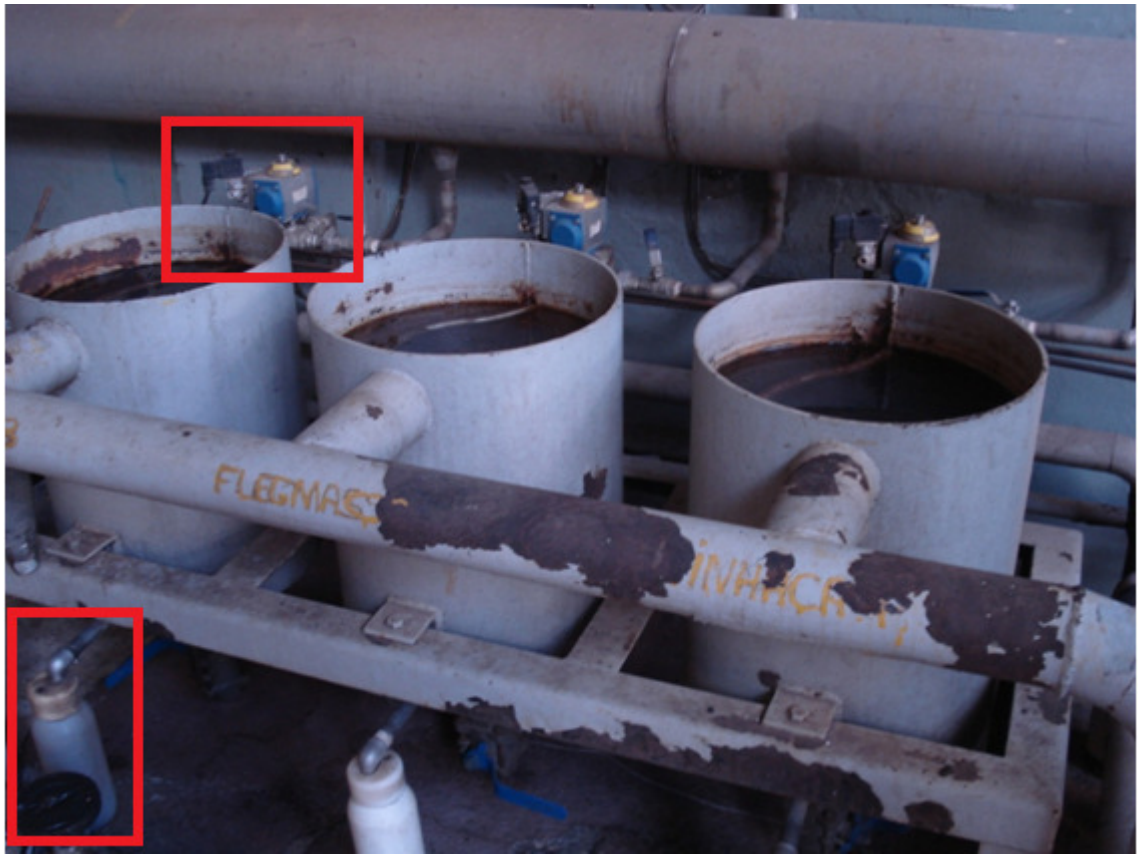

Figura 16 – Resfriador de vinhaça para coletas laboratoriais

Alguns pontos importantes a se mencionar sobre as amostras são: tipo de alimentação das dornas e chuva. O tipo de alimentação das dornas torna-se um dado interessante, pois é um fator que gera grande alteração na quantidade de potássio. Tal alteração se faz necessária quando se pretende produzir mais álcool ou mais açúcar, pois, nessa ocasião, é alterada a quantidade de mel destinado às dornas de fermentação.

A outra alteração bastante comum não depende da escolha da indústria, mas sim do clima local, pois, com muita chuva, a colheita é prejudicada; logo o estoque de cana para moer acaba e as dornas passam a ser alimentadas com água e mel, até que acabe o estoque e, então, acontece a parada da indústria. Nos meses de outubro e novembro, em que os dados deste trabalho foram coletados, o tempo encontrava-se bastante instável, como mostra a Figura 17 com o gráfico do balanço hídrico da região no ano de 2009 feito pelo INMEP – Instituto Nacional de Metrologia. Assim o potássio passou por alterações significativas, pois, quando as dornas são alimentadas com mel e água (comum no período de chuvas), tem-se um aumento significativo do teor de potássio na vinhaça. Na Figura 18, tem-se o armazenamento efetivo de água no solo da região.

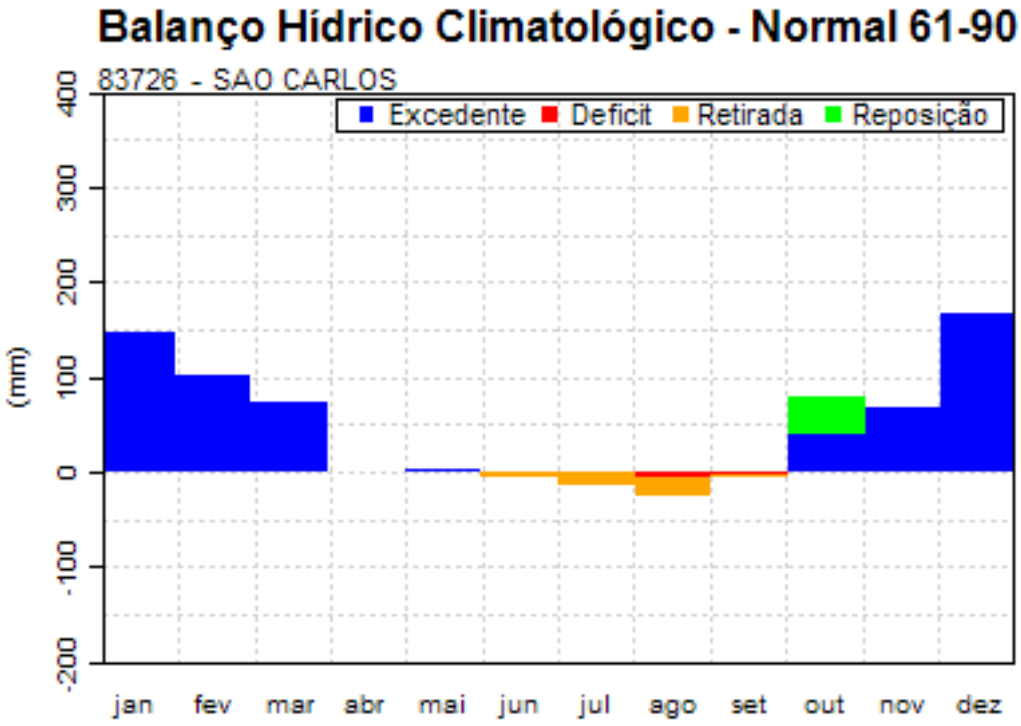

Figura 17 – Gráfico do balanço hidrico climatológico da região de São Carlos-SP

Fonte: (INMET, 2010)

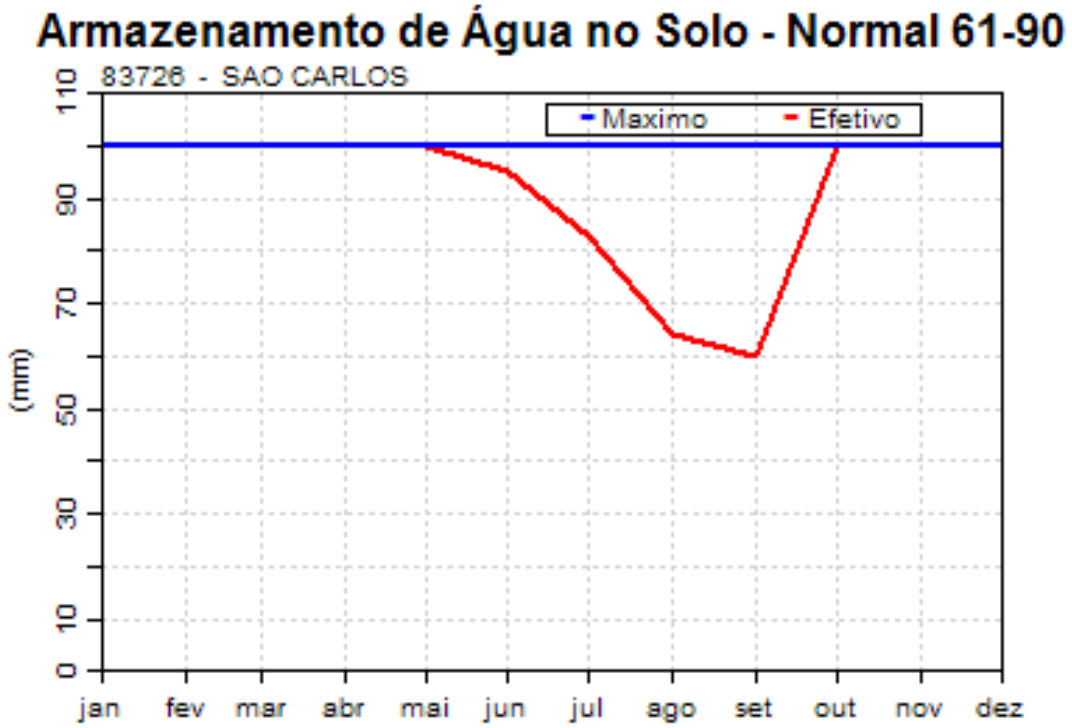

Figura 18 – Armazenamento de água no solo

Fonte: (INMET, 2010)

Para a utilização dos dados na rede neural, foram realizados dois processos: escolha de dados e normalização. Alguns dados recebidos do laboratório tiveram erros de análise, com valores muito discrepantes e foram retirados.

Posteriormente, os dados foram normalizados, processo que é de suma importância para o sistema, pois é nele que ocorrerá o tratamento dos valores coletados para que sejam entregues à rede neural. A normalização é um cálculo que ajusta a escala de valores obtidos aos limites 0 e 1. Deve-se tomar cuidado para que não se confunda a normalização em RNA´s com a normalização de dados em estatística, pois são dois processos absolutamente diferentes. As análises de similaridade dos componentes do vetor de dados apresentam escalas de medidas distintas, podendo a variância ser menor ou maior em função desta escala. Assim, para que possa ser avaliado adequadamente, é interessante transformá-lo em busca da menor variância. Os dados normalizados não perdem o significado da informação; são apenas convertidos em nova escala de valores, de modo a tornar a avaliação de similaridade nos mapas mais adequada.

A normalização faz uma projeção dos dados não somente para ajustar as regiões de contorno, como também para que cada componente contribua de forma igualitária na avaliação de similaridade. As variáveis referentes às entradas da rede devem ser

normalizadas para a faixa [0, 1] se estivermos utilizando a função sigmóide ou então, para [-1, 1] se utilizarmos a tangente hiperbólica. No caso desta pesquisa, utilizou-se a função sigmóide.

5.2 Método de análise

A vinhaça coletada na usina foi armazenada em refrigerador e analisada em um prazo máximo de uma semana para que não houvesse alterações dos parâmetros.

Os equipamentos de que o laboratório dispõe têm algumas limitações, portanto utilizaram-se algumas técnicas de análise química para obter resultados realmente confiáveis, como por exemplo, a amostra de potássio passou por diluição em uma proporção de 1:200, para que o medidor de potássio realizasse a análise com precisão.

Quanto às medições de pH e condutividade, estas são mais simples não requerendo técnicas para que os valores dos parâmetros fossem aferidos.

Motivos da escolha desses parâmetros:

- Simplicidade das medidas;
- Precisão dos equipamentos;
- A existência equipamentos também de laboratório para fazer o banco de dados;
- Disponibilidade de equipamentos de campo.

O método proposto para medir o potássio foi a utilização de medidores que utilizam o fenômeno de fluorescência do elemento químico potássio. Este equipamento mede a concentração de potássio entre outros elementos por efeito de excitação dos elétrons da última camada. Esses elétrons, ao retornarem para suas posições, emitem energia. Medindo-a o aparelho infere o teor de potássio.

5.3 Equipamentos

Os equipamentos utilizados no laboratório do departamento de hidráulica e saneamento foram: phagâmetro, condutivímetro e o medidor de concentração de potássio. Tais analisadores são de simples manuseio e obtenção das análises, no entanto são equipamentos de bancada e possuem uma margem de erro de 5%.

5.3.1 Phagâmetro – Modelo DM 21 (DIGIMED)

O phagâmetro – Figura 19 – mede o pH em líquidos sendo sua característica a Tabela 2, segundo o fabricante. Para a análise de pH, deve-se calibrar o equipamento em líquido preparado na laboratório, com pH de acordo com as exigências de cada fabricante. Após esse cuidado deve-se colocar o eletrodo (detalhe na figura) dentro do béquer contendo o líquido cujo pH se quer obter, neste caso a vinhaça. O aparelho, em poucos segundos, indica que terminou a analise e entrega os resultados, com valores que variaram de 3,73 a 4,78 (adimensional).

Tabela 2 – Característica do pHmetro

pHmetro	
Faixa de medição	-2 a 20 pH

Fonte: (Digimed, 2010).

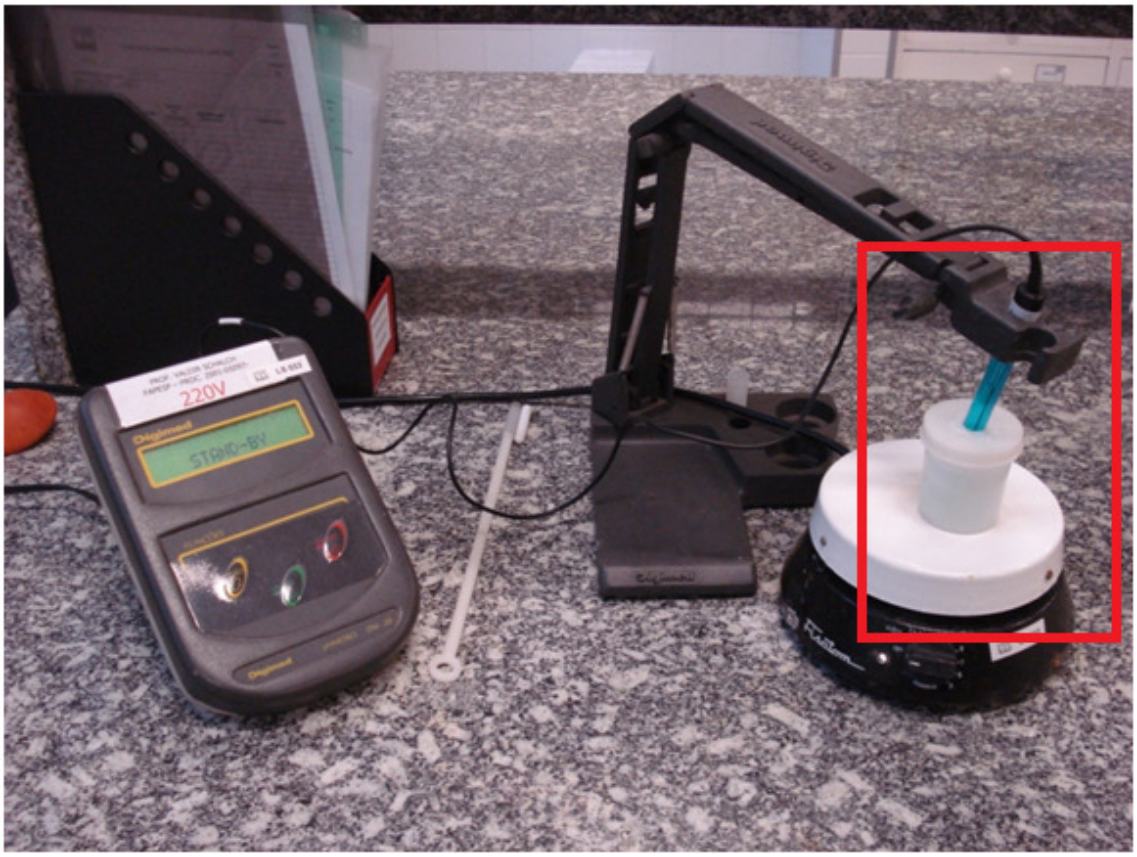

Figura 19 – Phagâmetro utilizado

5.3.2 Condutivímetro – Modelo DM 21 (DIGIMED)

O condutivímetro (aparelho igual ao phgâmetro modificando apenas o eletrodo) mede a condutividade de qualquer líquido, que esteja entre os padrões da Tabela 3,possui um eletrodo semelhante ao do phagâmetro. O processo, para efetuar medidas, também é semelhante ao phagâmetro, portanto também se deve calibrar o equipamento em líquido preparado no laboratório com condutividade de acordo com as exigências de cada fabricante. Posteriormente, deve-se colocar o eletrodo dentro do béquer e esperar a estabilização da medida. Como este aparelho encontrava-se com defeito, a estabilização foi realizada com a aproximação de três valores indicados pelo aparelho.

Tabela 3 – Características do condutivímetro

Condutivímetro	
Condutividade	0,01 µS/ cm a 2 S/ cm
Seleção de resolução	0,001 / 0,01 / 0,1 / 1

Fonte: (Digimed, 2010).

5.3.3 Medidor de teor de potássio – Modelo AA240FS *Fast Sequencial* (Varian)

O medidor de teor de potássio – Figura 20 – mede concentração de potássio em miligrama de potássio/litro com 2% de margem de erro. Para que a medida fosse realizada com sucesso, a vinhaça foi diluída em proporção de 1:200 com água deionizada. Esse procedimento é comum em laboratório quando o líquido a ser mensurado contém um teor muito elevado de potássio o que pode saturar o aparelho. A água deionizada é fundamental para esse processo, pois ela é pura o suficiente para não interferir no conteúdo da amostra e assim somente contribui para a diluição.

Figura 20 – Medidor de potássio utilizado

5.4 Validação das entradas

As entradas foram escolhidas por disponibilidade de equipamentos no mercado e algumas vantagens dos mesmos – como precisão em vasta gama de temperatura e pressão, facilidade de encontrá-los nos laboratórios e baixo custo. Para justificar a escolha de um valor de entrada é necessário ter conhecimento da influencia dos dados na rede neural artificial, portanto os dados foram testados com a função de validação cruzada com auxilio do *software Matlab* e também com o método estatístico de coeficiente de correlação, os quais demonstram a influência dos valores no resultado da rede neural.

Funções de correlação são funções matemáticas que determinam o grau de interdependência entre duas funções de mesma natureza (COSTA; TOMMASELLI; GALO, 2005). A função correlação, que é aplicada em dois conjuntos de dados, recebe o nome de função correlação cruzada e a função correlação que é aplicada em um conjunto de dados com ele mesmo é chamada de função de autocorrelação. É importante diferenciar a função correlação e o coeficiente de correlação.

O coeficiente de correlação é um número simples relacionado à covariância e desvios-padrão de dois conjuntos de dados. Essa análise ocorre sem que seja realizado deslocamento no tempo, ou seja, os vetores de dados não se deslocam um sobre o outro, o que ocorre na função correlação. Portanto o coeficiente de correlação compara a interdependência de um banco de dados com outro de forma estática, e a função de correlação cruzada investiga se existe interdependência entre todos os dados deslocando um vetor em relação ao outro, no entanto não quantifica de forma sintética como o coeficiente de correlação, sendo necessária interpretação gráfica. Para as análises realizadas neste trabalho, ambas as técnicas são interessantes.

A equação 2, que define o coeficiente de correlação entre os valores do vetor "x" e do vetor "y", é:

$$r = \frac{\Sigma(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x-\bar{x})^2\Sigma(y-\bar{y})^2}} \quad (2)$$

O valor *r*, que é resultado do cálculo da equação, tem seu significado mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Significado dos valores de *r*

Valor de *r*	Descrição
1	Correlação perfeita
0,70 a 0,99	Correlação muito forte
0,50 a 0,69	Correlação forte
0,30 a 0,49	Correlação moderada
0,10 a 0,29	Correlação baixa
0,01 a 0,09	Correlação ínfima
0	Nenhuma Correlação

Fonte: (SILVA D.; FILHO J.B., 2009).

Segundo Bloch (1999), como a função correlação percorre os vetores comparando-os, ela é utilizada habitualmente para detectar a presença de um sinal conhecido em meio ruidoso. A função de correlação cruzada atinge seu valor máximo para um retardo que corresponde ao intervalo de tempo de chegada de um sinal que lembra a réplica armazenada. O valor máximo é uma medida da semelhança do sinal recebido e da réplica armazenada. O valor máximo é 1 quando há uma coincidência

perfeita e o 0 significa ausência total de similaridade, analogamente ao coeficiente de correlação.

5.4.1 Validação das entradas por coeficiente de correlação

Para simplificar o cálculo do coeficiente de correlação, foi utilizado o software, EXCEL da Microsoft. Este possui uma função pré-programada que realiza o cálculo de forma rápida e simples basta que o usuário identifique os valores a serem comparados informando as linhas e colunas.

Sintaxe:

PEARSON(matriz1;matriz2)

Matriz1 é um conjunto de valores independentes.

Matriz2 é um conjunto de valores dependentes.

5.5 Rede Neural Artificial utilizada

Para definir qual seria a melhor rede neural artificial, duas delas foram testadas: redes *perceptrom* multicamadas e as redes de funções de base radial. As redes *perceptron* multicamadas obtiveram resultados melhores do que as redes de função de base radial, pois, diferentemente do que ocorre em classificação de padrão, no qual as redes de função de base radial têm melhor desempenho, segundo Dong (2003), na aproximação as redes *perceptron* multicamadas são mais eficientes.

Isso é justificado pelo tipo de função utilizado pela rede a de base radial utiliza, na maioria dos casos, a gaussiana o que a torna muito eficiente quando se utiliza um banco de dados pequeno; já quando se utiliza um banco de dados extenso, como é o caso desta pesquisa, a função de ativação sigmóide, utilizada nas redes *perceptron* multicamada, mostrou-se mais eficiente.

A topologia utilizada é justificada pelo teorema da aproximação universal de Cybenko (1989), que afirma: seja f(.) uma função contínua não-constante, limitada, e

monotonicamente crescente. Seja Im um hipercubo unitário m-dimensional (0,1)m. O espaço das funções contínuas em Im é denominado C(Im). Então, para qualquer função, existe um inteiro M e conjuntos de constantes reais ai e wij, onde i = 1,..., M e j = 1,...,m, tais que se pode definir a equação 3:

$$(3) \quad F(x_1, x_2, ..., x_m) = \sum_{i=1}^{M} \alpha_i f\left(\sum_{j=1}^{m} w_{ij} x_j - w_{oi} \right)$$

Com uma aproximação da função g(.) tal que respeite a equação 4,

$$(4) \quad \left| F(x_1, x_2, ..., x_m) - g(x_1, x_2, ..., x_m) \right| < \varepsilon$$

Este teorema se assemelha à saída de uma rede *perceptron* multicamadas com a seguinte estrutura: uma camada de entrada, uma camada intermediária com neurônios com função de ativação sigmoidal e um neurônio na camada de saída com função de ativação linear. A quantidade de neurônios na camada intermediaria pode ser alterada em busca de maior perfeição dos valores procurados, assim como o parâmetro erro e a taxa de aprendizagem:

- Erro: parâmetro utilizado no treinamento da rede no *backpropagation*, sendo aplicado na derivada que dá como resultado o valor que reajustará os pesos de toda a rede neural;
- Taxa de aprendizagem: parâmetro utilizado com a finalidade de que a rede encontre mais rapidamente o valor procurado definindo a área de varredura da função. Também é importante, pois é um dos fatores que fazem a rede convergir ou não.

A Figura 21 demonstra a topologia da rede neural utilizada para efetuar os cálculos do método proposto:

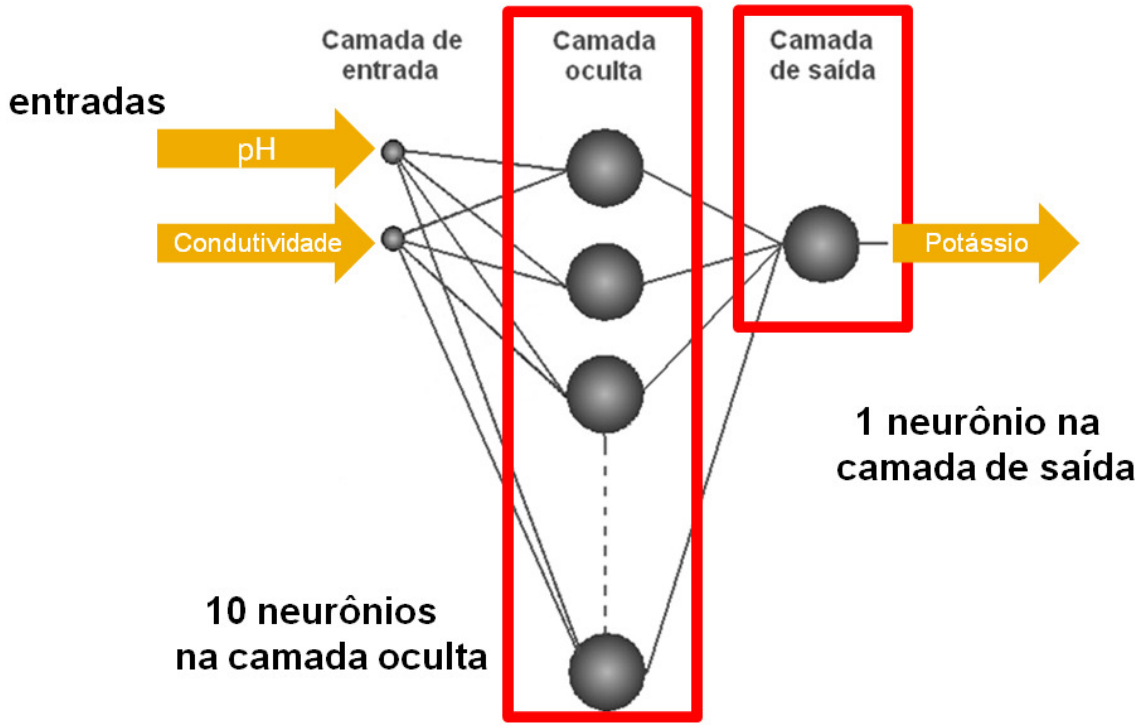

Figura 21 – Topologia utilizada

5.6 *WEKA*

Segundo Perissinotto (2007), a extração dos dados consiste na configuração dos parâmetros e na aplicação dos algoritmos selecionados e pode ser feita pelo *WEKA* (*Waikato Environment for Knowledge Analysis)* que é uma ferramenta para Mineração de Dados desenvolvida pela Universidade de *Waikato* (Nova Zelândia), em 1999. *WEKA* é um *software* livre e disponível para download. O pacote *WEKA* é formado por um conjunto de implementações de algoritmos de diversas técnicas de Mineração de Dados.

5.6.1 Aplicação do *Weka*

Segundo Raymundo (2009), é possível processar conjuntos de dados em um regime de aprendizagem, analisar o resultado de determinado classificador e seu desempenho sem qualquer restrição ao tipo, programa ou código escrito, o que inclui métodos padrão para todos os problemas de mineração de dados. Após os testes, todos os algoritmos são exibidos em forma de tabela única, relacionada no formato ARFF

(*Attribute Relationship File Format*) e podem ser lidos ou gerados por consulta em forma de banco de dados.

O formato de dados ARFF é o único formato em que o *WEKA* trabalha. Esse arquivo pode ser gerado no bloco de notas – no caso daqueles que utilizam *Windows* – ,desde que seja salvo como ".arff " . Para que o *WEKA* leia os dados, também é necessário que se siga o padrão abaixo, demonstrado com o início do banco de dados utilizado para encontrar os valores neste trabalho.

@*RELATION* vinhaça
@*ATTRIBUTE* condutividade *real*
@*ATTRIBUTE* ph *real*
@*ATTRIBUTE* potássio *real*
@*DATA*
0.7270, 0.6286, 0.2327
0.6689, 0.6381, 0.2131
0.5113, 0.5810, 0.1643
0.5553, 0.6000, 0.2601
0.5760, 0.6095, 0.2503
0.5366, 0.6286, 0.2522
0.6107, 0.6190, 0.2777
0.6398, 0.6571, 0.2483
0.6745, 0.6286, 0.2757
0.8068, 0.6571, 0.3598
0.7439, 0.6857, 0.3969

Essa estrutura de dados respeita a seguinte regra:

@*RELATION*: É somente o nome do arquivo, não será utilizado para cálculos ou classificações.

@*ATTRIBUTE*: Nome que a coluna de dados receberá quando rodar o programa. Esse nome será utilizado na identificação dos dados e também aparecerá nos resultados. Também é importante, nesta etapa, identificar o tipo de dado com que o sistema trabalhará. Por exemplo: *real* (todos os números), *integer* (números inteiros) ou *string*

(para palavras). É importante salientar que os atributos devem ser inseridos de acordo com as colunas de dados abaixo.

@*DATA*: Apenas o local onde serão inseridos os dados seguindo a organização definida nos atributos.

Assim, o *WEKA* foi utilizado para simplificar os testes realizados com várias topologias – além do *Matlab* – essa ferramenta de mineração de dados, desenvolvida na Universidade de *Waikato,*também possibilita, por simples comandos, a aplicação em diversas topologias de redes neurais artificiais.

Este *software* possui um grande banco de redes neurais para as mais diversas aplicações. A Figura 22 apresenta a variedade de redes possíveis para os classificadores, sendo que cada pasta abre vasta gama de opções. Nos ensaios realizados para aproximador universal de funções, foi utilizada a função *multilayerperceptron* que está localizada dentro da pasta *functions*.

Esse programa possibilita que sejam alterados – na função *perceptron* multicamadas – os itens seguintes:

- Número de neurônios na camada escondida;
- Taxa de aprendizagem;
- Momentum;
- Tempo de treinamento;
- Tamanho do conjunto de treinamento;
- Tamanho do conjunto de dados.

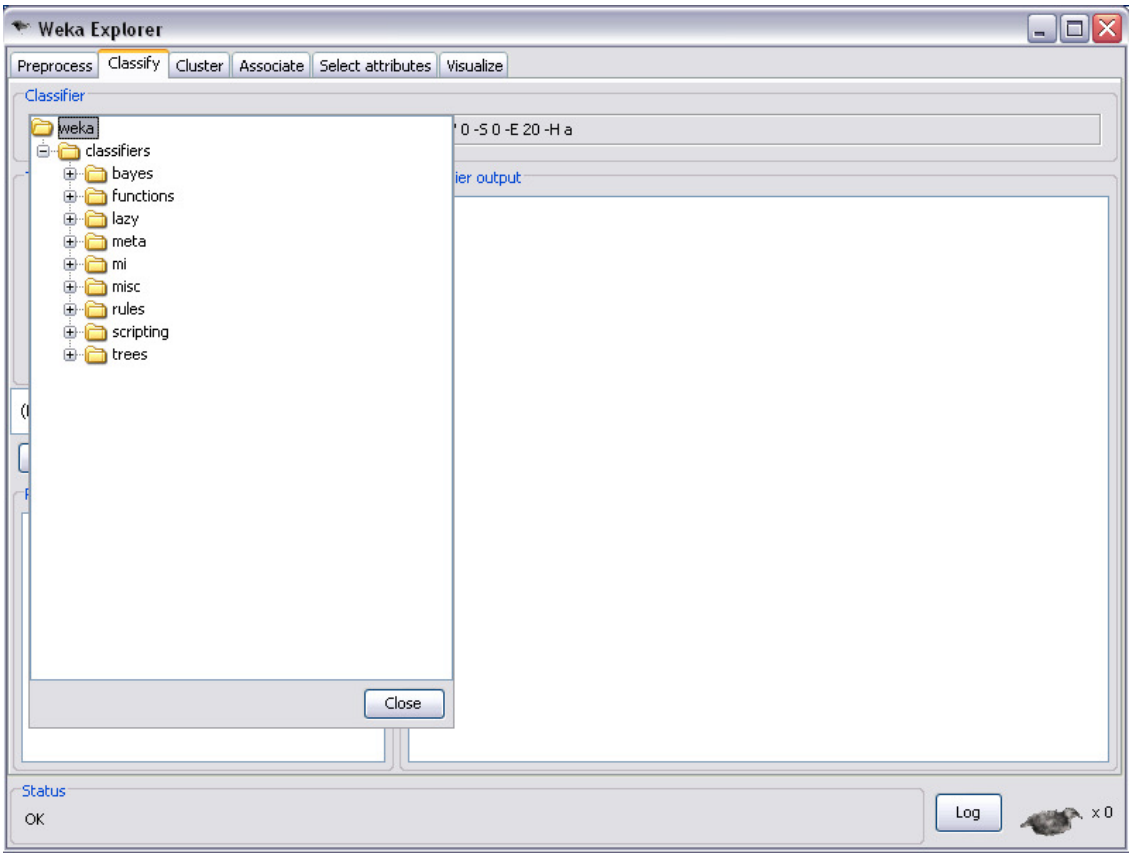

Figura 22 – Tela do *WEKA*

O *WEKA* também oferece a opção de desenhar a rede que está em teste. A Figura 23 mostra teste com *perceptron* multicamadas com 10 neurônios na camada escondida; também são mostradas pelo software as entradas e a saída indicadas em *@ATTRIBUTE*. O *software* também fornece, nesta tela, o tempo de trabalho gasto nos cálculos e o número de épocas – quantas vezes o programa executou os cálculos para atingir os resultados.

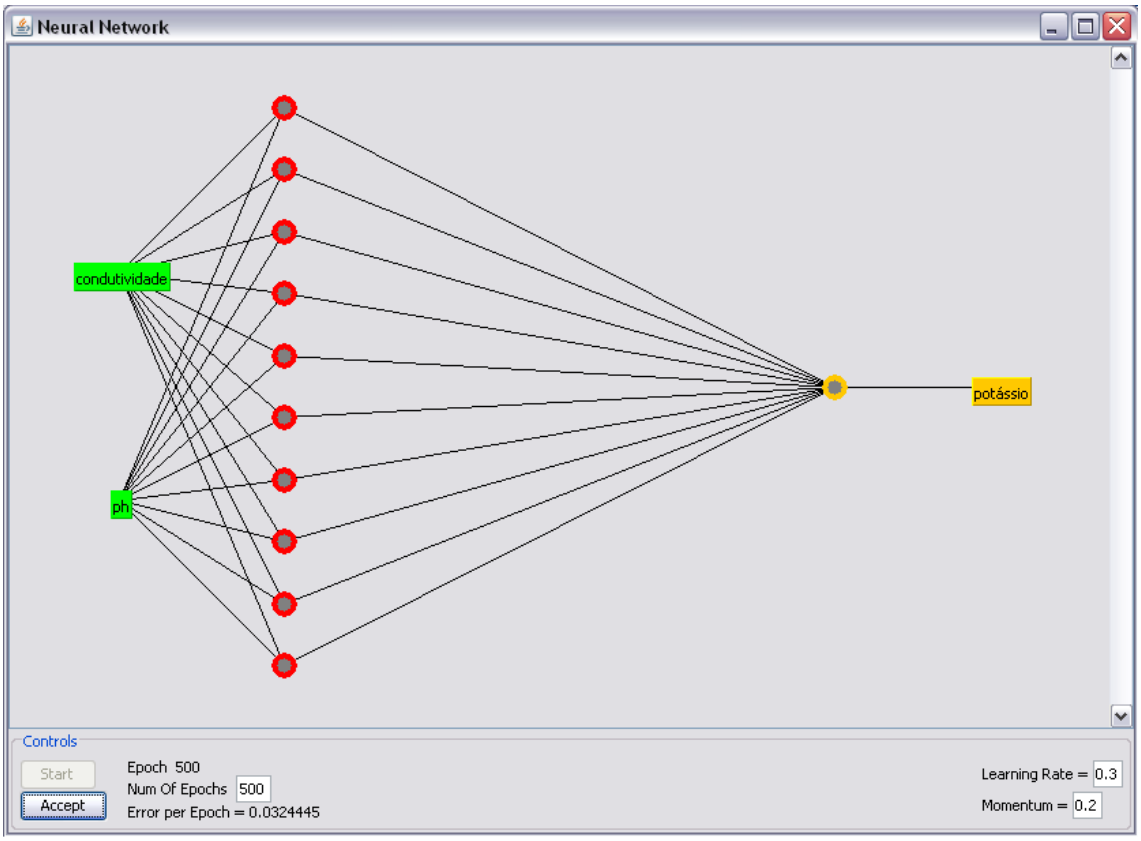

Figura 23 – Rede perceptron multicamadas no Weka

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A rede neural, proposta para ser utilizada como sensor virtual, na busca por método *on line* para medir o teor de potássio na vinhaça *in natura*, apresentou resultados com erro dentro do padrão esperado em relação aos equipamentos comerciais. Os resultados dos cálculos de coeficientes de correlação estão demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficientes de correlação

Vetores	Valor de *r*	Descrição
Condutividade e potássio	0,45	Correlação moderada
pH e potássio	0,29	Correlação baixa
Condutividade e pH	0,37	Correlação moderada

A partir da Tabela 5, pode-se afirmar que das duas entradas a que mais colabora com o sistema é a condutividade que tem correlação moderada, mas, apesar da correlação baixa, o pH é importante para a rede neural artificial, o que foi comprovado por testes empíricos. Também é demonstrado que existe correlação moderada entre as duas entradas o que indica que algumas vezes elas contribuem de forma similar à rede neural artificial.

O sensor virtual apresentou uma margem de erro médio pequena, pois, como na prática esse sistema estaria realizando várias medidas em pequeno espaço de tempo, pode-se considerar que o erro médio seja o erro do sistema. Os gráficos das Fígura 24 e Figura 25 mostram alguns treinamentos realizados antes de chegar ao melhor resultado apresentado na Figura 26, que mostra que, de fato, o sensor virtual acompanhou a variação do potássio na vinhaça *in natura*.

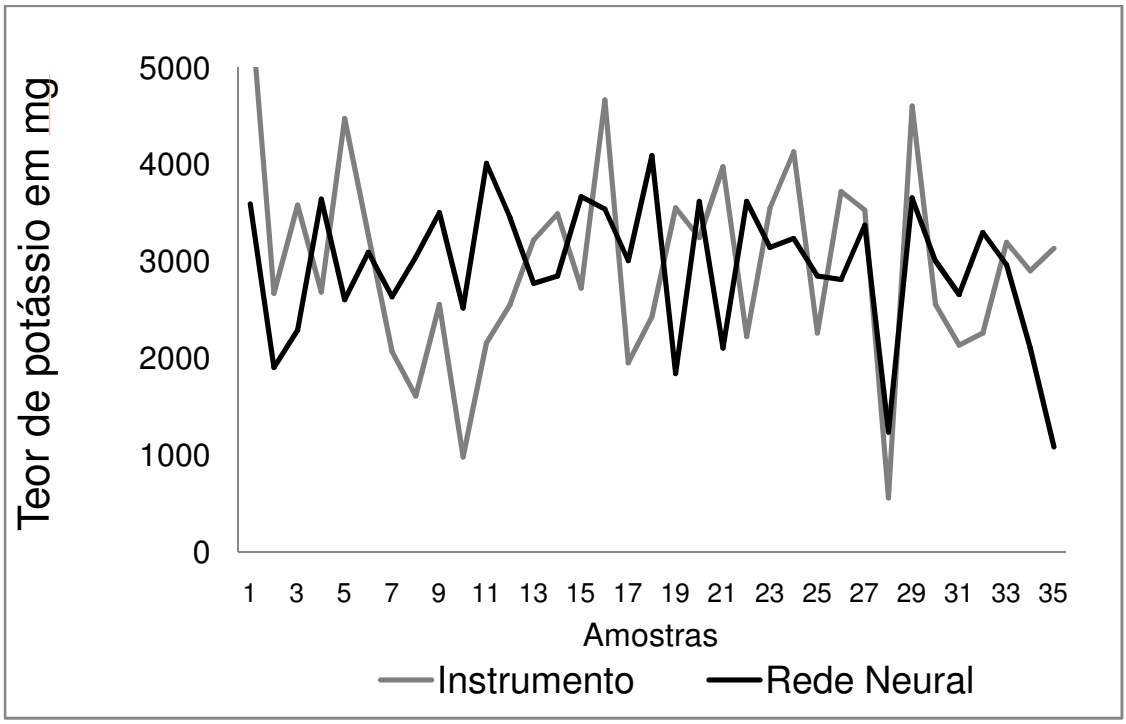

Figura 24 – Gráfico dos resultados com 5 neurônios na camada oculta

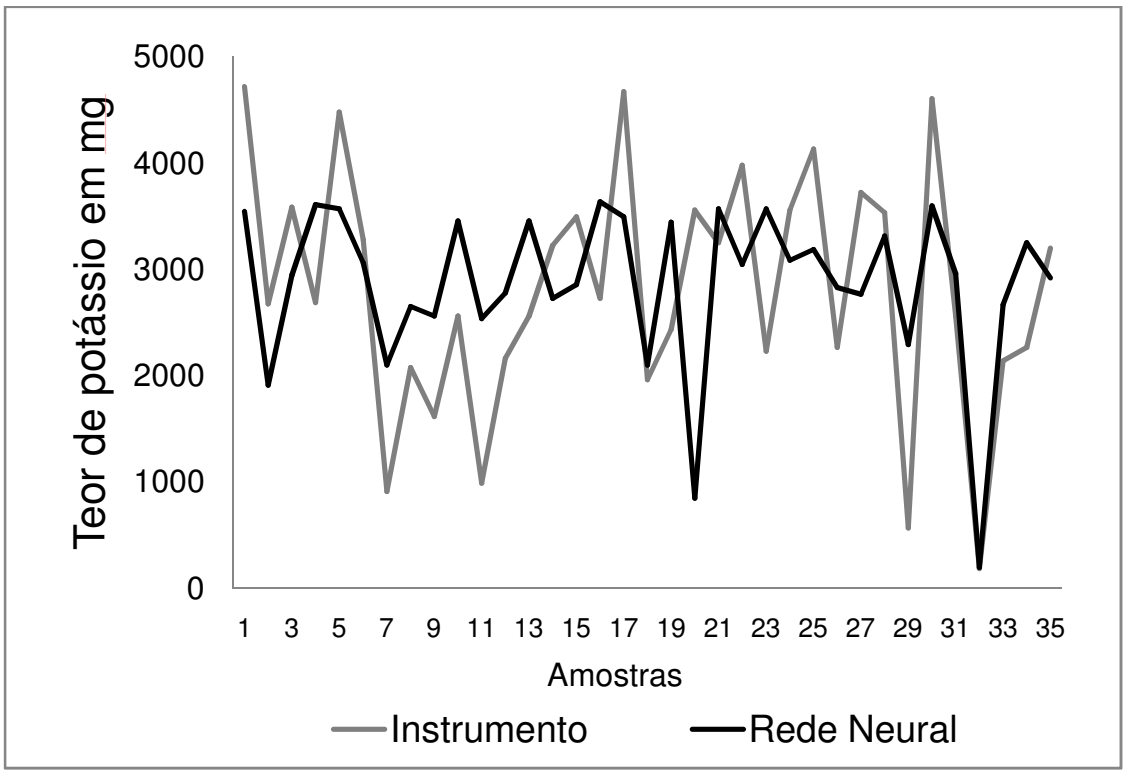

Figura 25 – Gráfico dos resultados com 8 neurônios na camada oculta

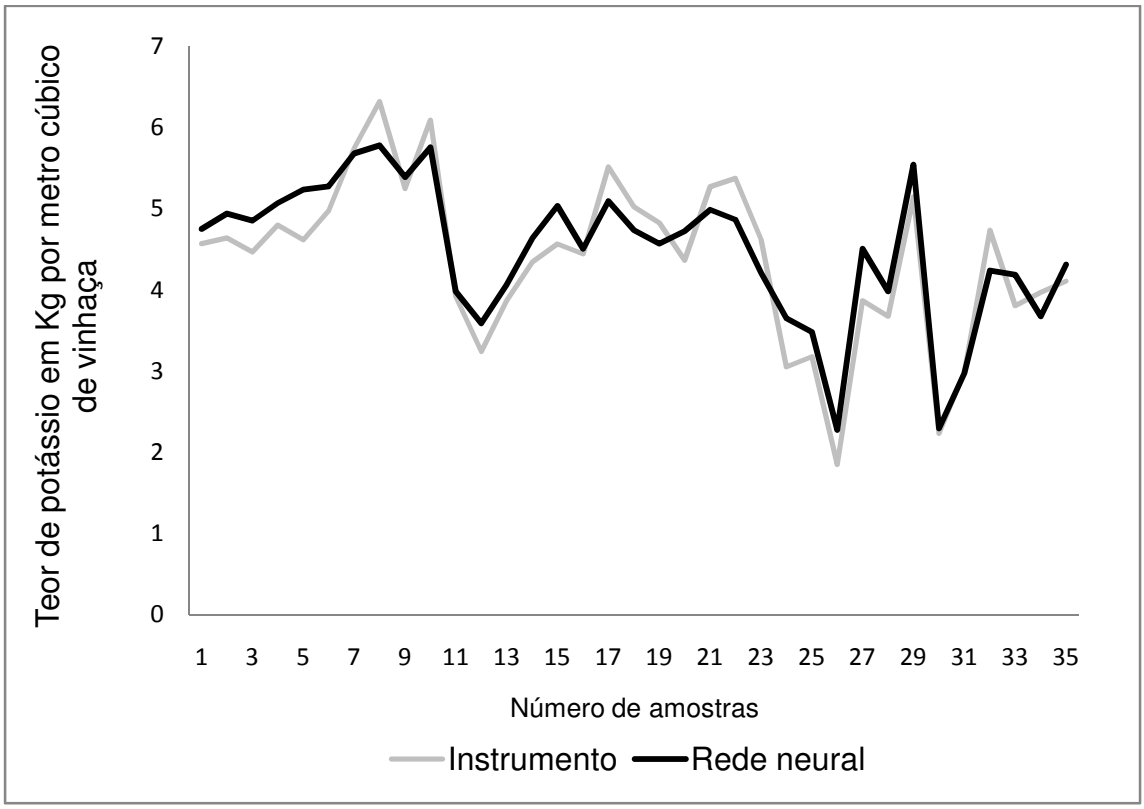

Figura 26 – Gráfico do comportamento da rede PMC

O erro médio do sensor virtual nessa análise foi de 2,15% sobre o erro dos equipamentos de bancada utilizados para coleta de dados. Assim, para que o método fosse mais exato, seria necessário que os dados fossem provenientes de equipamentos mais precisos, diminuindo o erro.

Na Tabela 6, nota-se, em alguns dados, que o erro individual foi grande, mas, como os analisadores de bancada e equipamentos de campo, o sensor virtual pode informar o valor de uma média o que diminuiria a influência desses erros deixando-o bastante preciso, pois, na prática, os aparelhos funcionam com média de análises.

Tabela 6 – Trinta e cinco resultados da Rede Neural *Perceptron* Multicamadas funcionando como sensor virtual na busca pelo teor de potássio na vinhaça *in natura*

Instrumento	Rede neural	Variação
4,5741	4,7554	3,96%
4,6463	4,9449	6,43%
4,4718	4,8554	8,58%
4,8042	5,0727	5,59%
4,6207	5,2389	13,38%
4,9787	5,2773	6,00%
5,7526	5,6864	-1,15%
6,3256	5,7841	-8,56%
5,2517	5,3923	2,68%
6,0955	5,7608	-5,49%
3,9221	3,9860	1,63%
3,2445	3,5897	10,64%
3,8709	4,0627	4,95%
4,3440	4,6380	6,77%
4,5695	5,0366	10,22%
4,4463	4,5102	1,44%
5,5202	5,0983	-7,64%
5,0261	4,7403	-5,69%
4,8298	4,5741	-5,29%
4,3695	4,7275	8,19%
5,2773	4,9928	-5,39%
5,3796	4,8682	-9,51%
4,6252	4,2161	-8,85%
3,0527	3,6536	19,68%
3,1805	3,4837	9,53%
1,8509	2,2774	23,04%
3,8709	4,5102	16,51%
3,6792	3,9860	8,34%
5,1494	5,5458	7,70%
2,2344	2,2984	2,86%
2,9888	2,9760	-0,43%
4,7403	4,2417	-10,52%
3,8070	4,1906	10,07%
3,9732	3,6792	-7,40%
4,1138	4,3184	4,97%

Novamente utilizou-se o método estatístico de coeficiente de correlação como mais uma ferramenta além da inspeção visual do gráfico e da tabela de dados; o coeficiente de correlação entre a coluna de valor esperado e valor encontrado é de: 0.89. Esse valor próximo a 1 indica que, de fato, a utilização do erro médio considerado na pesquisa esta correto, pois, como apresentado nesta dissertação na Tabela 4 o valor de r = 0,89 significa que existe correlação muito forte entre as duas colunas indicando que o sensor virtual de fato realiza o que foi proposto nos objetivos deste trabalho.

A Tabela 7 apresenta valores de Kg de potássio encontrados pela rede e o dado pelo aparelho de bancada e também os valores do limite de metros cúbicos de vinhaça por hectare com o respectivo erro.

Tabela 7 – Valores calculados pela fórmula da CETESB para aplicação da vinhaça na lavoura

	Instrumento	Rede Neural	Erro	Unidade
Solo 1	5,25	5,39	2,60%	Kg de K_2O/m^3 de vinhaça
	61,46	59,86		m^3 de vinhaça/ha
Solo 2	2,99	2,98	-0,43%	Kg de K_2O/m^3 de vinhaça
	108	108,46		m^3 de vinhaça/ha

Aplicando tais resultados na prática tem-se para o solo 1 uma diferença de 8,42 Kg de K_2O/ha a menos e para o solo 2 tem-se diferença de 1,39 Kg de K_2O/há a mais.

Tabela 8 – Diferença de potássio para cada tipo de solo

	Instrumento	Rede neural	Diferença	Unidade
Solo 1	322,78	314,36	8,42 a menos	Kg de K_2O/ha
Solo 2	322,78	324,17	1,39 a mais	Kg de K_2O/ha

A Tabela 9 apresenta um quadro comparativo entre as duas tecnologias: sensor virtual (elaborado em redes neurais *perceptron* multicamadas) e aparelhos de bancada.

Tabela 9 – Comparativo entre o sensor virtual e os aparelhos de bancada

Item	Sensor Virtual	Aparelhos de bancada
Erro percentual médio	Menor que 3%, no entanto deve-se salientar que a estes 3% soma-se o erro do aparelho de bancada.	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 possa realizar as medições

A partir da Tabela 9, conclui-se que o método desenvolvido pode ser mais eficiente que os aparelhos de bancada, no entanto, para isso, deveria ser treinado com dados provenientes de aparelhos exatos, como os do medidor de potássio por fluorescência de íons, também para as entradas pH e condutividade. Como contribuição, essa tecnologia, se aplicada, pode trazer vantagens ao tratamento e aproveitamento da vinhaça como adubo, dispensando, por exemplo, a estocagem de vinhaça em grandes açudes, o que causa, segundo Ometto (2000): mau cheiro devido à decomposição, ambiente propício à proliferação de insetos vetores de doenças – que podem atingir trabalhadores e comunidades vizinhas e risco de contaminação do solo e aquíferos – no caso de vazamento dos açudes.

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados mostrados graficamente no item anterior, pode-se concluir que o método desenvolvido atingiu o objetivo proposto mostrando-se eficiente naquilo que foi proposto e os dados estatísticos do coeficiente de correlação mostram que, de fato, o sistema acompanha a curva real.

As vantagens da utilização do sensor virtual são:

- ✓ A precisão, pois o sistema sempre gera resultados próximos uns aos outros;
- ✓ A exatidão, uma vez que o programa retorna valores com uma margem de erro aceitável em comparação com o que já se tem desenvolvido;
- ✓ A praticidade nas análises da vinhaça in natura, item no qual se diferencia o método proposto dos aparelhos de bancada.

Esta pesquisa pode ter continuação, realizando a parte de hardware para que enfim seja aplicada na prática. Outras pesquisas como esta podem ser realizadas nas indústrias de açúcar e álcool, pois existem vários parâmetros que podem ser inferidos a partir de dados que se conseguem com maior facilidade.

8 PUBLICAÇÕES

Este trabalho foi divulgado nos seguintes anais:

- **Congresso:**
  - FIEMA - 2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente
  - Apresentado dia 30 de abril de 2010

- **Revistas nacionais:**
  - AlcoolBRAS - Valete Editora
  - Publicado na edição 128

- **Revistas internacionais:**
  - Australian Sugarcane Magazine
  - Publicado na primeira semana de Julho

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, L.A. (2004). **Introdução à identificação de sistemas**: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em:<http://www.cpdee.ufmg.br/~aguirre/livro/livro.htm>. Acesso em: 17 fev. 2010.

ALLEN, L.H.; WOOD, R.J. (1994). Calcium and phosphorus. In: SHILS, M. E.; OLSON, J.A.; SHIKE, M. (Ed.). **Modern nutrition in health and disease**. 8thed. Philadelphia: Lea & Febiger. Cap.7, p.155-163.

ALVES, D.M. (2007). **Quantificação da glicemia através de análises de imagens da íris humana utilizando redes neurais**. 101p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ARONNE I.D. (2009). **Desenvolvimento de um sistema de identificação e classificação de transientes para um reator nuclear a água pressurizada integral.** 396p. Tese (Doutorado). INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. São Paulo, 2009

ARANTES, E.M., **Dados da Usina Ipiranga** [Mensagem pessoal] Mensagem recebida por < edilson@usinaipiranga.com.br > em 22 mar 2010.

ATALA, D.I.P. et al. (2008). **Etanol de 2ª geração: desafios para a instrumentação e automação. In: WORKSHOP INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA E AGROINDUSTRIAL NA CADEIA CANA-ETANOL**, 2008, São Carlos. Disponível em:<http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/Apres_instrumentação_2_Daniel.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2010.

BERNI, C.C. (2004). **Implementação em hardware / firmware de um sensor virtual utilizando algoritmo de identificação nebulosa**. 107p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BLOCH, S.C. (1999). Ferramentas de análise: aplicações da FFT. In: _____. **Excel para engenheiros e cientistas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Cap.12, p.174-198. Disponível em:<http://ensino.univates.br/~chaet/Materiais/Cap%EDtulo_12_Bloch.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2009). **Agroindústria canavieira**: ementário nacional - compêndio histórico de normativos e documentos legais. Brasília.

BUZOLIN, P.R.S. (1997). **Efeitos da palha residual da colheita mecanizada, associada a fontes de potássio e doses de nitrogênio, no solo e nas socas de cana-de açúcar**. 98p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de São Paulo "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 1997.

CARVALHO, A. L. et al. (1998). **UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS NEURAIS PARA MODELAGEM DE UM REATOR UASB.** 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro. 10p.

CETESB (2010). **Resolução SMA - 88, de 19-12-2008.** Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/licenciamentoo/legislacao/estadual/resolucoes/2008_Res_SMA_88.pdf. Acesso em: 8 jun 2010.

CONAMA (2010). **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/estr.cfm. Acesso em: 7 jun. 2010.

CORTEZ, L. (1992). Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, Rio de Janeiro, v.2, n.2, p.111-146.

COSTA, E.R.; TOMMASELLI, A.M.G.; GALO, M. (2005). Técnicas de pré-análise do processo de correlação visando a geração de modelo digital de terreno. **RBC - Revista Brasileira de Cartografia = Brazilian Journal of Cartography**, Rio de Janeiro, v.57, n.3, p.252-262, dez.

DIGIMED. (2010). **Site institutional.** Disponível em: http://www.digimed.ind.br/ws/servicos/. Acesso em: 16 jun 2010.

DONG, Q. (2003). **MLP and RBF comparision in a classification problem of a satellite image**. Disponível em:<http://www.stanford.edu/qfdong/Work/NN.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (2009). **Zoneamento agroecológico nacional da cana-de-açúcar irá orientar a expansão do cultivo**. Disponível em:<http://www.embrapa.br/imprensa/noticias/2009/setembro/3a-semana/zoneamento-agroecologico-nacional-da-cana-de-acucar-ira-orientar-expansao-do-cultivo>. Acesso em: 22 fev.2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. (2010). **Agência de Informação Embrapa.** Disponível em:<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Aplicacao+de+vinhaca_000fk4cc96d02wyiv80sq98yqq5ivfy9.jpg>. Acesso em: 15 fev. 2010

FAQUIN, V. (1994). **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: ESA; FAEPE.

FELIPPE JR., J. (1990). Pronto socorro: fisiopatologia – diagnóstico – tratamento. In: _____. **Distúrbios hidroeletrolíticos**: Na+ , K+ , Ca++ , PO4 e Mg++. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koggan. p.82-97.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO (2002). **Anuário de agricultura brasileira**. São Paulo.

GEROMEL, L.H. (2003). **Aplicação de sistemas inteligentes em projetos de transformadores de potência**. 144p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

GLOEDEN, E. et al. (1991). The Behaviour of vinasse constituents in the unsaturated zones in the Botucatu aquifer recharge area. **Water Science and Technology**, Oxford, v.24, n.11, p.147-157.

GOODMAN, L.S.; GILMAN, A. (1975). **The Pharmacological basis of therapeutics**. 5thed. New York: McMillan. Cap.38, p.798-800.

HANISCH, W. S., et al. (1997). **MODELAGEM DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS UTILIZANDO REDES NEURAIS: CONCEITUAÇÃO E AVALIAÇÃO PRELIMINAR.** 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Foz do Iguaçu. 10p.

HASSUDA, S. (1989). **Impactos da infiltração da vinhaça de cana no aquífero de Bauru**. 92p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

HAYKIN, S. (2000). **Redes neurais**: princípios e práticas. 2.ed. Porto alegre: Bookman.

HIRATA, R.C.A. (1991). Groundwater pollution risk and vulnerability map of the state of São Paulo, Brazil. **Water Science and Technology**, Oxford, v.24, n.11, p.159-169.

INMET. (2010) **Balanço Hídrico Climático**. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/html/agro.html. Acesso em: 16 jun. 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (2010). Disponível em: http://150.163.3.3/canasat/. Acesso em 20 jan. 2010.

INSTITUTO FRANCISCO PACHECO DIAS (2010). Disponível em:<http://www.sogab.com.br/anatomia/neuronio.jpg>. Acesso em 27 fev. 2010.

JIMÉNEZ CIFUENTES, A. (2005). **Avaliação das condições de operação de sistemas elétricos de potência com relação à estabilidade de tensão utilizando redes neurais artificiais**. 113p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

JORNALCANA. (2009). **Usina Cerradinho concentra vinhaça com sucesso.** Disponível em: http://www.jornalcana.com.br/pdf/187/%5Ctecindls.pdf Acesso em: 16 jun 2010.

LABORATORY OF COMPUTATIONAL INTELLIGENCE (2010). São Carlos: ICMSC/USP. Disponível em:<http://labic.icmc.usp.br>. Acesso em: 21 mar.2010.

LELIS NETO, J.A. (2008). **Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em diferentes tipos de solo**. 89p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

LEME, E.J.A. (1987). **Montagem direta otimizado: o sistema para reduzir consumo de energia.** In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE INOVAÇÕES TÉCNICAS NA APLICAÇÃO DE VINHAÇA POR ASPERSÃO, Araras, 1987. **Boletim..**. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR.

LEME, E.J.A.; ROSENFELD, V.; BAPTISTELLA, J.R. (1979). Aplicação de vinhaça em cana-de-açúcar por aspersão. **Boletim Técnico Planalsucar**, Piracicaba, Série B, v.1, n.4, p.3-42.

LEME, E.J.A. et al. (1987). **O Uso do auto-propelido na aplicação de vinhaça por aspersão**: viabilidade tecno-econômica. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR.

LIMA, D.A. (1955). **A Vinhaça e a bacia do rio Piracicaba**. Tese (Doutorado) – Escola Superiro de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1955.

LONGO, R.M.; BONI, N.R.; ESPÍNDOLA, C.R. (1996). **Efeito da vinhaça" natura" e biodigerida em propriedades físicas de um solo cultivado com cana-de-açúcar.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRICOLA, 25, Bauru, 1996. **Anais...** Bauru: UNESP. CD-ROM.

LOPES, C.H. (1983). Lavagem de cana e tratamento de seus efluentes. **Saccharum**, Piracicaba, v.6, n.76, p.26-31.

LUKSENBERG, J.M.; SÁ, A.; DURSO, M.N. (1980). **Processo para a produção de álcoolcombustível, sem vinhoto**. Guarulhos: Dyna Engenharia. Relatório descritivo da patente de invenção.

MALAVOLTA, E. (1980). **Potássio, magnésio e enxofre nos solos e culturas brasileiras**. 2.ed. Piracicaba: Instituto Internacional de Pesquisa da Potassa. (BoletimTécnico).

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. (1997). **Avaliação do estado nutricional das plantas**: principios e aplicacoes. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS.

MATIOLI, C.S.; MENEZES, J.A. (1984). Otimização dos sistemas de aplicação de resíduos líquidos na lavoura. In: REUNIÃO TÉCNICA AGRONÔMICA, Piracicaba, 1988. **Anais...** Piracicaba: Copersucar. p.67-70.

MATIOLI, C.S.; LAZO, M.E.P.; GUAZZELLI, M.A.N. (1988). Otimização de sistemas de aplicação de resíduos líquidos. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 4., Piracicaba, 1988. **Anais…** Piracicaba: Copersucar. p.159-168.

MENEZES, T.J.B. (1989). The Treatment and utilization of alcohol stillage. In: WISE, D.L. (Ed.). **International biosystems**. Boca Raton: CRC Press. v.3, p.1-14.

NERY, M.S. (2000). **Desempenhos operacional e econômico de uma colhedora em cana crua**. 108p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

OMETTO, A.R. (2000). **Discussão sobre os fatores ambientais impactados pelo setor sucroalcooleiro e a certificação socioambiental**. 255p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos,Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

_____. (2005). **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico combustível pelo método EDIP, exergia e emergia hidratado**. 200p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ORLANDO FILHO, J. (1983). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR.

PERISSINOTTO, M. (2007). **Sistema inteligente aplicado ao acionamento do sistema de climatização em instalações para bovinos leiteiros**. 167p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

RAYMUNDO, E.M. (2009). **Metodologia de estimação de idade óssea baseada em características métricas utilizando mineradores de dados e classificador neural**. 112p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

RODRÍGUEZ, J. E. N. (2003) **DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR POR SOFTWARE PARA AVALIAÇÃO DE BIOMASSA EM REATORES ANAERÓBIOS.** 80p. Dissertação (Mestrado) UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Florianópolis, 2010.

SALVIANO, F. O. C. (2002). **Modelagem e simulação de um tratamento de efluentes organicos atraves de redes neurais** 86 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SCALOPPI, E.J.; BRITO, R.A. (1986). Qualidade da água e do solo para irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.139, p.80-94.

SILVA D.; FILHO J.B. (2009). **Estatistica 4.1** Disponivel em: Http\\www.ufmt.br/ufmt virtual/aula5.ppt Acesso em: 30 nov 2009.

SILVA, I.N. (2009). **Redes neurais e artificiais**. São Carlos: [s.n.]. Notas de aula do curso de redes neurais artificiais, ministrado no primeiro semestre de 2009, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SPARKS, D.L.; HUANG, P.M. (1985). Physical chemistry of soil potassium. In: MUNSON, R. **Potassium in agriculture**: phosphate potash. Atlanta: American Society of Agronomy; Phosphate Institute. p.201-276.

STUPIELLO, J.P. (1987). A Cana-de-açúcar de açúcar como matéría-prima. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar**: cultivo e utilização. São Paulo: Fundação Cargill. v.2, Cap.7, p.761-804.

TASSIM, A. C. (2009) Dados de análise de vinhaça [Mensagem pessoal] Mensagem recebida por < tassim@usinaipiranga.com.br > em 15 abril 2009.

TAVORA, J.E.M. (1982). Reservas minerais de potássio e suas explorações. In: YAMADA, T. et al. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto de Potassa & Fosfato. p.37-50.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇUCAR (2010). **Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético.** Disponível em: http://www.unica.com.br/userFiles/Protocolo_Assinado_Agroambiental.pdf. Acesso em: 12 fev. 2010.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (2010). **Dados e cotações – Estatísticas** Disponível em: http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/ Acesso em: 12 fev. 2010.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (2009). **Cresce a mecanização na colheita de cana-de-açúcar em São Paulo**. Disponível em:,http://www.unica.com.br/noticias/show.asp?nwsCode={9C316 670-3A8A-4908-B41A-CEDC6E8B1088}>. Acesso em: 15 mar. 2009.

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

ZANATA, D.R.P. (2005). **Desenvolvimento de sensor virtual empregando redes neurais para medição da composição em uma coluna destilação**. 229p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ZANINI, J.R. (1991). **Distribuicao de agua e do ion K+ no solo, aplicados por fertirrigacao em gotejamento. II - teores de K+ no bulbo molhado**. ITEM: irrigação e tecnologia moderna, Brasília, v.46, n.1, p.24-38.

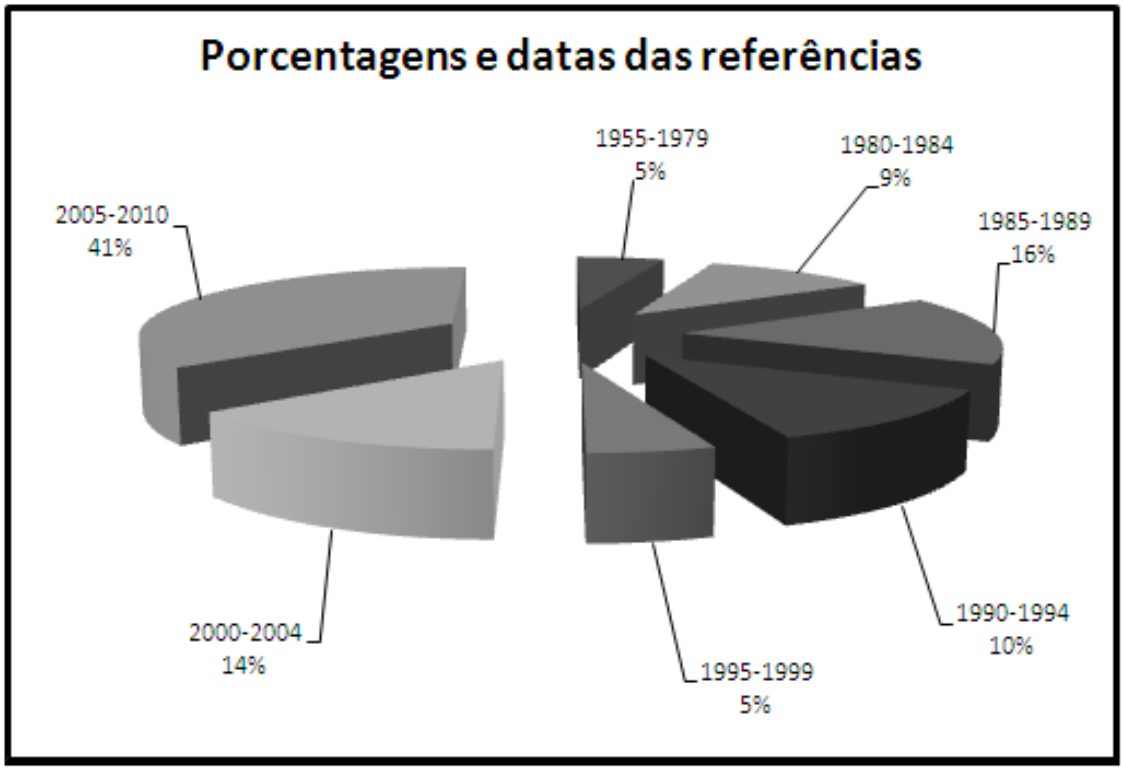

Figura 27 – Gráfico informativo sobre as referências