



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOÃO PAULO ALVES DA SILVA

**INTERPRETAÇÃO DO GRÁFICO DE PICKETT COM A REDE
NEURAL COMPETITIVA ANGULAR GENERALIZADA**

Belém - Pará

2014

JOAO PAULO ALVES DA SILVA

**INTERPRETAÇÃO DO GRÁFICO DE PICKETT COM A REDE
NEURAL COMPETITIVA ANGULAR GENERALIZADA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geofísica
do Instituto de Geociências da
Universidade Federal do Pará - UFPA,
em cumprimento às exigências para
obtenção de Bacharel em Geofísica.
Orientador: André José Neves Andrade

Belém - Pará

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

S586i Silva, Joao Paulo Alves da, 1991-

Interpretação do gráfico de Pickett com a rede neural competitiva angular generalizada. / Joao Paulo Alves da Silva – 2014

42 f. : il.: 30 cm.

Orientador: André José Neves Andrade

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, Belém, 2014.

1. Perfilagem Geofísica de poço. 2. Algoritmos Inteligentes. 3. Saturação de Água. I. Título.

CDD 22. ed.: 622.15

JOÃO PAULO ALVES DA SILVA

**INTERPRETAÇÃO DO GRÁFICO DE PICKETT COM A REDE
NEURAL COMPETITIVA ANGULAR GENERALIZADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção de Bacharel em Geofísica.

Data de Aprovação: ____ / 03 / 2014

Conceito:

Banca Examinadora:

Prof. André José Neves Andrade – Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. José Geraldo das Virgens Alves – Membro
Mestre em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. – Fabio Henrique Garcia Domingos
Doutor em Geologia
Universidade Federal do Pará

Dedicado aos profissionais de Geofísica de Poço

AGRADECIMENTOS

À PETROBRÁS (Rede de Geofísica), pelas oportunidades e suporte oferecido ao Laboratório de Processamento de Dados Geofísicos de Poço (ProLog), ao Curso de Graduação em Geofísica e a minha pesquisa.

Ao orientador André Andrade, pela paciência, apoio e confiança na realização deste trabalho.

À Cristiano Mendel Martins, pelos ensinamentos como professor, como chefe e como amigo.

Aos meus amigos Jéssica Pena e Cadu Amanajás, por estarem comigo desde o início da geofísica em nossas vidas.

À Jéssica Lia, Carol Sena, Ângela Montalvão e Elen Amorim, pela amizade, pelo apoio, e por fazerem parte de muitas das minhas histórias.

Às minhas queridas Socorro Silva e Eleine Santos, pela amizade que foi muito além do trabalho.

À Juliete, por me receber sempre de portas abertas na CPGf

E por último e mais importante, à meus pais, João e Maria, por me darem educação, força e coragem, e terem sido os ombros onde me apoiei para que pudesse enxergar mais longe.

RESUMO

O método ou gráfico de Pickett é uma das abordagens mais eficientes para a solução da equação de Archie, onde através de uma abordagem gráfica, colabora com a produção de estimativas realistas para a resistividade da água de formação e para o expoente de cimentação, utilizando as medidas registradas em um perfil de resistividade profunda, corrigidas dos efeitos da invasão e valores de porosidade obtidos a partir de um cálculo conveniente por meio dos perfis de porosidade (densidade, sônico e porosidade neutrônica). No entanto, como o método de Pickett é um método gráfico, o que por sua própria natureza impõe a necessidade da realização de uma interpretação visual para a sua solução. Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresenta uma metodologia, com base na rede neural competitiva angular generalizada, que possibilita a solução da equação de Archie, a partir de uma interpretação computacional do gráfico de Pickett, buscando atenuar os efeitos da solução manual. A avaliação desta metodologia é realizada com a utilização de dados sintéticos, que satisfazem integralmente a equação de Archie e também, sobre dados reais.

Palavras-Chave: Geofísica de Poço. Algoritmos Inteligentes. Saturação de Água

ABSTRACT

The Pickett plot is an efficient method to solve the Archie equation, with the production of realistic values for the water resistivity and the cementation exponent using the measurements recorded in a deep resistivity log that was corrected by the invasion effects and a convenient calculation of porosity, using the porosity logs (bulk density, neutron porosity and sonic). However, the method developed by Pickett is a graphical one, which imposes the need of a visual interpretation of the Pickett plot to get a satisfactory solution. This work presents a methodology, based on the generalized angular competitive neural network that allows the solution of the Archie equation as a computational interpretation of the Pickett plot. The evaluation of this methodology is performed on synthetic data that satisfy the Archie equation and on real data.

Keywords: Wireline logging; Intelligent algorithm. Water Saturation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Lamina delgada mostrando a coexistência de água de formação e hidrocarboneto.	14
Figura 2 – Gráfico de Pickett. Exemplo com dados sintéticos.....	19
Figura 3 – Arquitetura da rede competitiva angular generalizada.	22
Figura 4 – Função de ativação.	23
Figura 5 – Construção dos vetores de entrada.	27
Figura 6 – Vetores de entrada.....	27
Figura 7 – Perfis usados no dado sintético.....	30
Figura 8 – Gráfico de Pickett para a camada A.....	31
Figura 9– Gráfico de Pickett para a camada B.....	31
Figura 10 – Gráfico de Pickett para a camada A com Grupo de Referência.	32
Figura 11 – Gráfico de Pickett para a camada B com Grupo de Referência.	32
Figura 12 – Gráfico de vetores diferença para a camada A.	33
Figura 13 – Gráfico de vetores diferença para a camada B.	33
Figura 14 – Gráfico de vetores unitários para a camada A.	34
Figura 15 – Gráfico de vetores unitários para a camada B.	34
Figura 16 – Gráfico de Pickett gerado pela rede para a camada A.....	35
Figura 17 – Gráfico de Pickett gerado pela rede para a camada B.....	36
Figura 18 – Conjunto de perfis de dados reais.....	37
Figura 19 – Gráfico de Pickett com Grupo de Referência da camada reservatório.	38
Figura 20 – Gráfico de vetores diferença para a camada reservatório.....	38
Figura 21 – Gráfico de vetores unitários para a camada reservatório.....	39
Figura 22 – Gráfico de Pickett gerado pela rede para a camada reservatório.	40

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Expoente de cimentação. Archie, 1942.....	16
Tabela 2 - Parâmetros do modelo sintético.....	29
Tabela 3 - Parâmetros estimados para o modelo sintético.	35
Tabela 4 - Parâmetros estimados para o dado real.	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 LEI DE ARCHIE	13
2.1 Saturação de água	13
2.2 Cálculo da porosidade	14
2.3 Cálculo da saturação de água	15
3 MÉTODO DE PICKETT	17
3.1 Interpretação do gráfico de Pickett	18
4 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	20
4.1 Rede neural competitiva angular generalizada	20
5 METODOLOGIA	25
5.1 Aplicação da rede competitiva angular generalizada	25
6 RESULTADOS	29
6.1 Dados sintéticos	29
6.2 Dados reais	36
7 CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Para a Geofísica de Poço, a primeira estimativa para a saturação de água é produzida através da solução da equação de Archie (ARCHIE, 1942). No entanto, a solução da equação de Archie não é uma atividade trivial, dependendo da disponibilidade de medidas diretas da porosidade e dos expoentes ou coeficientes de Archie (cimentação e saturação) em amostras de testemunho da camada reservatório, bem como do conhecimento da resistividade da água de formação, na temperatura original da rocha em subsuperfície (DARLING, 2005). A utilização prática da equação de Archie envolve ainda, a determinação de quantidades derivadas dos perfis geofísicos, como a resistividade da rocha medida na região não afetada pelos efeitos da invasão do filtrado da lama.

O método Pickett (PICKETT, 1966) é uma das formas de solução da equação de Archie, com a produção de estimativas realistas para a resistividade da água de formação e do expoente de cimentação a partir das medidas registradas em um perfil de resistividade profunda e corrigidas dos efeitos da invasão e do cálculo conveniente da porosidade por meio dos perfis de densidade, sônico ou porosidade neutrônica. No entanto, o método de Pickett é um método gráfico, que impõe a necessidade de uma interpretação visual do gráfico de Pickett para a sua solução.

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresenta uma metodologia, que utiliza a rede neural competitiva angular generalizada (SANTOS, 2014), para produzir a solução da equação de Archie, através de uma interpretação computacional do gráfico de Pickett, que pode ser interpretado na forma de um problema de reconhecimento de padrões.

A rede neural competitiva angular generalizada é uma rede neural desenvolvida para a solução de problemas de reconhecimento de padrões e de análise de grupos (*clustering*), que mensura a similaridade entre dois vetores próximos no espaço Euclidiano em termos do menor ângulo entre eles.

A avaliação da metodologia, aqui apresentada, é realizada sobre dados sintéticos, que satisfazem integralmente a equação de Archie e sobre dados reais. E a avaliação final é realizada sobre dados sintéticos e reais.

2 LEI DE ARCHIE

Através de experimentos cuidadosos Archie desenvolveu em 1942 uma lei que possibilita o cálculo da saturação de água em uma rocha reservatório (desde que ela esteja isenta de minerais condutivos) a partir da medida da resistividade da rocha e da sua porosidade.

2.1 Saturação de água

A definição da propriedade petrofísica denominada de saturação de fluido provem da coexistência da água de formação e do hidrocarboneto (óleo e gás) na constituição da porção fluida da rocha reservatório, como mostrado na Figura 1.

Por definição a saturação de um fluido f (S_f) expressa a fração do volume do fluido f (V_f) em relação ao volume total de fluido (V_F) na constituição de uma rocha reservatório, ou na forma

$$S_f = \frac{V_f}{V_F} \quad (1)$$

Como nas rochas reservatório, o volume total de fluido é igual a porosidade (ϕ) a saturação de água (S_w) é dada por,

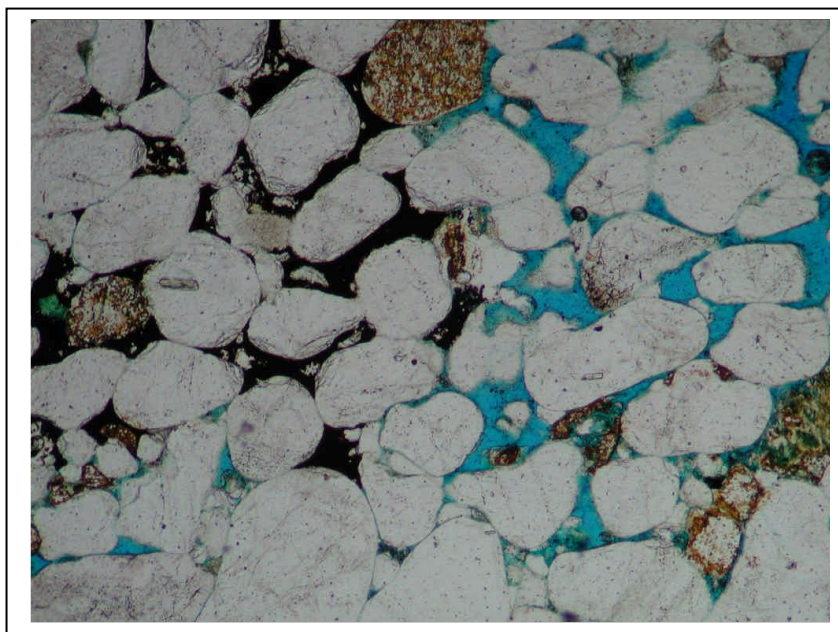
$$S_w = \frac{V_w}{\phi} \quad (2)$$

A saturação de hidrocarboneto (S_{hc}) é a propriedade responsável pela caracterização do reservatório. Assim, é válida a relação,

$$S_w + S_{hc} = 1 \quad (3)$$

Em termos da qualificação do reservatório, o fator mais importante é a saturação de óleo, tal que quanto maior for a saturação de óleo ou quanto menor for a saturação de água, melhor é o reservatório.

Figura 1 - Lamina delgada mostrando a coexistência de água de formação e hidrocarboneto.



Fonte: PETROBRAS (2014)

Na figura 1, a porção branca é matriz da rocha, a cinza escura é o hidrocarboneto e a azul é a água de formação.

2.2 Cálculo da porosidade

Uma relação entre a propriedade física, tempo de trânsito (registrada no perfil sônico) e a propriedade petrofísica, porosidade foi estabelecida por Wyllie (WYLLIE, 1952), a partir de medidas diretas do tempo de trânsito em amostras de rocha reservatório limpas ($V_{sh} = 0$) e saturadas com água ($S_w = 1$), na forma da equação do tempo médio, que estabelece que o tempo de trânsito medido pela ferramenta sônica pode ser representado como uma combinação linear dos volumes dos materiais constituintes da rocha e os tempo de trânsito medido isoladamente em cada um deles. Assim, considerando uma rocha reservatório formada por matriz monomineral e água doce e medindo-se isoladamente os valores de tempo de transito na matriz (Δt_m) e para na água doce (Δt_w), o tempo de transito (Δt) medido em uma rocha reservatório pode ser expresso na forma

$$\Delta t = \phi \Delta t_w + (1 - \phi) \Delta t_m \quad (4)$$

Finalmente, a porosidade (ϕ) pode ser expressa como,

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_w}{\Delta t_m - \Delta t_w} \quad (5)$$

A relação expressa na equação 5 permanece válida para os perfis de densidade e de porosidade neutrônica.

2.3 Cálculo da saturação de água

A principal vantagem ou relevância da lei de Archie é a de possibilitar a transformação de uma interpretação qualitativa de dados geofísicos de poço para uma avaliação quantitativa dos volumes de hidrocarboneto em subsuperfície.

Assumindo que a condução de corrente elétrica nas rochas reservatório é exclusivamente do tipo eletrolítica, Archie observou que rochas com mesma litologia, mesma porosidade, saturadas com água de mesma resistividade produziam valores diferentes para o fator de formação, ou em outras palavras, produziam aproximações lineares com diferentes inclinações. Assim, foi conceituada a propriedade denominada expoente de cimentação (m).

Assim, Archie estabeleceu a seguinte relação,

$$R_o = \frac{R_w}{\phi^m} \quad (6)$$

Na equação 6, o termo R_o é a resistividade da rocha com porosidade (ϕ) e completamente saturada com água ($S_w = 1$).

Se uma rocha contém gás, óleo e/ou água misturados em seus poros, a resistividade dessa rocha aumentará consideravelmente devido à capacidade isolante da fração hidrocarboneto. Quanto maior for a quantidade de hidrocarboneto (ou menor a quantidade de água), maior a dificuldade da corrente elétrica em atravessar certo volume de rocha. Assim, a resistividade da rocha R_t será proporcional à resistividade da rocha saturada com água e inversamente proporcional à saturação de água. Assim, Archie estabeleceu uma relação entre a razão da resistividade da rocha e a resistividade da rocha saturada com água (R_t/R_o) com a saturação de água (S_w). Ele observou que a esta relação linear, em

escala logarítmica, mantém-se constante e independente da porosidade e da resistividade da água. Archie determinou o valor da constante de saturação como sendo igual a 2 e como síntese dos seus experimentos, ele expressou a lei que leva seu nome, na forma,

$$R_t = \frac{R_w}{\phi^m S_w^2} \quad (7)$$

A equação de Archie envolve os expoentes de cimentação e de saturação, que são parâmetros resultantes do ajuste linear dos dados produzidos por medidas diretas sobre amostras da rocha reservatório. Na impossibilidade de reproduzir o trabalho de Archie com amostras de testemunhos da formação e obter os expoentes de cimentação e saturação através do ajuste linear, estes parâmetros precisam ser estimados indiretamente dos perfis de resistividade e porosidade. Particularmente, o expoente de saturação pode ser considerado relativamente constante e independente da porosidade. Segundo os trabalhos de Archie o valor do expoente de saturação pode ser tomado igual a 2,0 (DARLING, 2005).

A Tabela 1 apresenta os valores do expoente de cimentação determinados pelos experimentos de Archie

Tabela 1 - Expoente de cimentação. Archie, 1942

Matriz	Expoente de Cimentação
Arenito	2,00
Calcário	2,00

3 MÉTODO DE PICKETT

O método de Picket (PICKETT, 1966) é comumente utilizado como auxiliar para a solução da equação de Archie quando os valores do expoente de cimentação (m) e a resistividade da água de formação (R_w) são desconhecidos, com a sua solução sendo realizada na forma gráfica e considerando o expoente de saturação como constante.

Quando Dick Picket apresentou seu método, enfatizou que não deveria ser utilizado como um gráfico substituído para os cálculos de Archie, mas sim como complemento. Assim, o método de Pickett pode ser interpretado como um dispositivo que possibilita o reconhecimento visual das características do reservatório ou para a validação dos valores de resistividade da água e do coeficiente de cimentação adotados na solução da equação de Archie.

O uso perceptivo do Gráfico de Pickett pode possibilitar uma compreensão mais clara do papel da porosidade na determinação das características do reservatório. Este conhecimento vem associado aos estudos geológicos da relação textural e da história deposicional e diagenética da rocha, bem como de estudos de engenharia de produção sobre as relações entre a porosidade, a saturação de fluido e o tipo de rocha reservatório.

O método de Pickett ou a construção do Gráfico de Pickett baseia-se na forma logarítmica da equação de Archie (equação 7), que considerando $S_w = 1$ pode ser reescrita na como,

$$\log(R_t) = \log(R_w) - m \log(\phi). \quad (8)$$

A relação expressa na equação 8, que possui comportamento linear ($y = h - mx$), descreve uma reta na escala logarítmica nos eixos coordenados. A sua inclinação determina o expoente de cimentação e a sua interseção com a vertical pelo eixo das ordenadas correspondente à porosidade igual à 1 é numericamente igual à resistividade da água (R_w), na temperatura da formação. Esta reta é conhecida como **reta da água**.

O método de Pickett não faz nenhuma referência ao método de cálculo da porosidade (ϕ), no entanto é evidente a relevância da confiabilidade nas

estimativas da porosidade para a produção de valores realistas da saturação de água obtidos pela solução da equação de Archie.

3.1 Interpretação do gráfico de Pickett

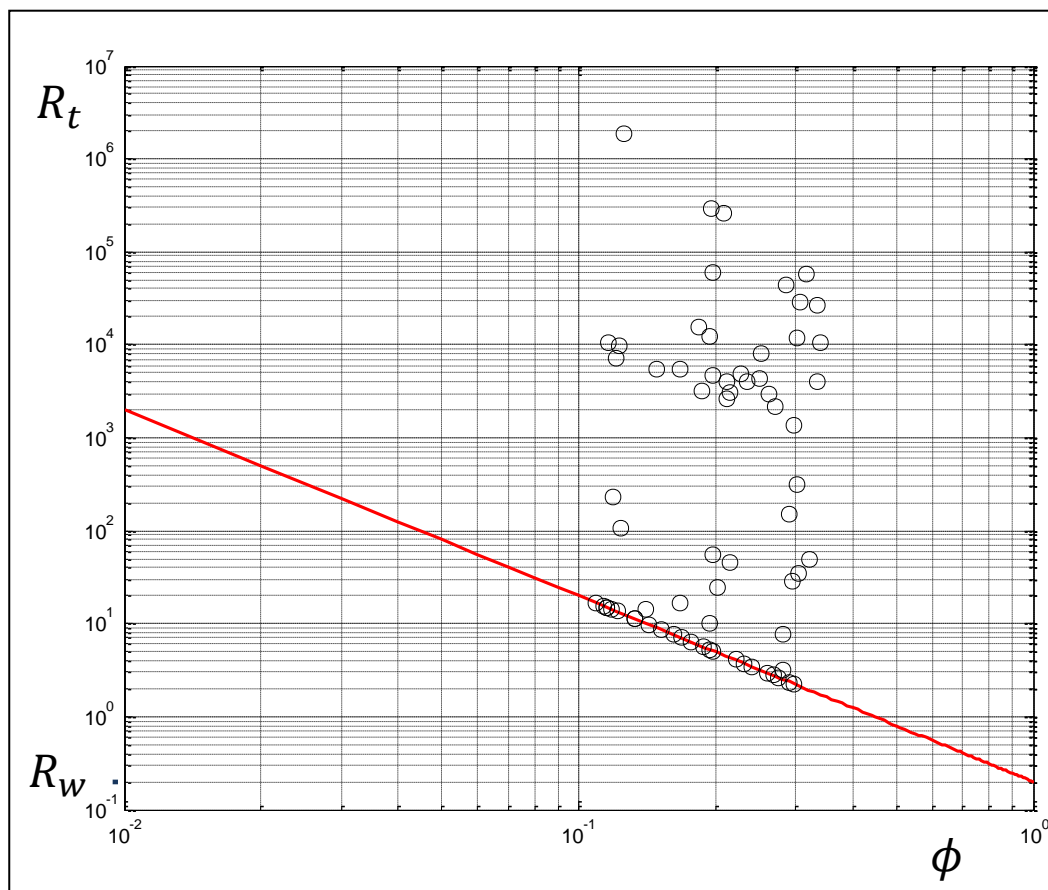
O método de Pickett utiliza a medida da resistividade da rocha (R_t), medida na região não afetada pela invasão do filtrado da lama de perfuração e corrigida pelos efeitos do poço, que são registradas em um perfil de resistividade ($y = \log(R_t)$) e dos valores calculados para a porosidade ($m \log(\phi)$) para estabelecer a reta da água, ou a linha que passa pelos pontos completamente saturados por água. A inclinação da reta da água resulta no expoente de cimentação. O ponto no Gráfico de Pickett definido pela interseção da reta da água com a vertical pelo ponto de abscissa (porosidade) igual a um, define a resistividade da água, na temperatura de formação, no eixo das ordenadas.

A reta de água, onde a saturação de água é 100% deve ser estabelecida visualmente ou por inspeção do alinhamento formado pelos pontos de baixa resistividade. Desta maneira, a interseção da reta da água com o eixo y está relacionada com o valor estimado da resistividade da água, assim como a inclinação da reta da água está associada ao expoente de cimentação constante.

A localização de outras linhas de saturação estará no lado da alta resistividade da linha de água. Todas têm a mesma inclinação, e assim são paralelas.

A Figura 2 mostra o gráfico de Pickett construído para uma camada reservatório a partir de perfis sintéticos ideais, ou seja, que consideram a inexistência do ruído e da argilosidade ($V_{sh} = 0$). Neste caso, pode-se observar o alinhamento dos pontos com 100% de saturação de água ($S_w = 1$). Alinhados segundo a reta teórica da água. Neste exemplo tomou-se a resistividade da água igual a 0,2 ohm.m e o coeficiente de cimentação igual a 2.

Figura 2 – Gráfico de Pickett. Exemplo com dados sintéticos.



Fonte: Do Autor.

4 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Com o avanço da Inteligência Artificial surgiu a idéia de representar por meio de determinados programas o funcionamento do processo de aprendizagem do cérebro humano. A tentativa de simular a rede neural do cérebro deu origem à chamada Rede Neural Artificial.

Os trabalhos sobre redes neurais se iniciaram na década de 40, na Universidade de Illinois, com o neurofisiologista McCulloch e o matemático Walter Pitts, cujas idéias foram publicadas no artigo *“Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity”* (MCCULLOCH ; PITTS, 1943). McCulloch e Pitts estabeleceram uma relação entre o processo de comunicação das células nervosas biológicas e o processo de comunicação por transmissão elétrica e propuseram a criação de neurônios formais. Em 1947 eles conseguiram demonstrar que era possível conectar os neurônios formais e formar uma rede capaz de executar funções complexas.

4.1 Rede neural competitiva angular generalizada

A rede neural competitiva (KOHONEN, 1989) é um tipo de rede neural artificial desenvolvida para o reconhecimento de padrões presentes nos seus dados de entrada. Com a utilização de um treinamento não supervisionado, a partir de um conjunto de critérios pré-estabelecidos, que definem o neurônio vencedor e a forma de atualização dos pesos sinápticos, a rede competitiva realiza a extração de características comuns presentes nos dados de entrada; permitindo a classificação dos dados de entrada em função destas características. Neste tipo de rede neural, cada neurônio competitivo representa uma possível classe e a saída da rede é representada pelo sinal não nulo de um único neurônio competitivo (neurônio vencedor), que explicita a classe à qual pertence o dado de entrada.

A rede competitiva angular (BARROS ; ANDRADE, 2013) é uma variação da rede competitiva, que busca extrair relações angulares presentes nos dados de entrada. Esta rede opera apenas no plano, tal que cada ponto é representado como um número complexo. O treinamento da rede competitiva é determinado "a priori" tal que as coordenadas de particulares pontos no plano complexo formam o

conjunto de pesos sinápticos. Na fase de operação, a rede competitiva angular realiza a classificação dos pontos de entrada em relação aos pontos utilizados no treinamento segundo o critério do menor ângulo entre os seus vetores representativos.

A rede competitiva angular generalizada (SANTOS, 2014) é uma extensão da rede competitiva angular para o espaço n-dimensional. O número de neurônios na sua camada de entrada define a dimensão do espaço dos dados de entrada. O número de neurônios competitivos indica o número de classes previamente identificadas e nas quais se deseja classificar os dados de entrada.

A Figura 3 mostra a arquitetura base da rede competitiva angular generalizada, para a classificação de pontos distribuídos no espaço tridimensional.

Os dados de entrada ou pontos no espaço n-dimensional são associados a vetores posição (x_i) e para cada vetor é calculado o seu correspondente vetor unitário (X_i), ou

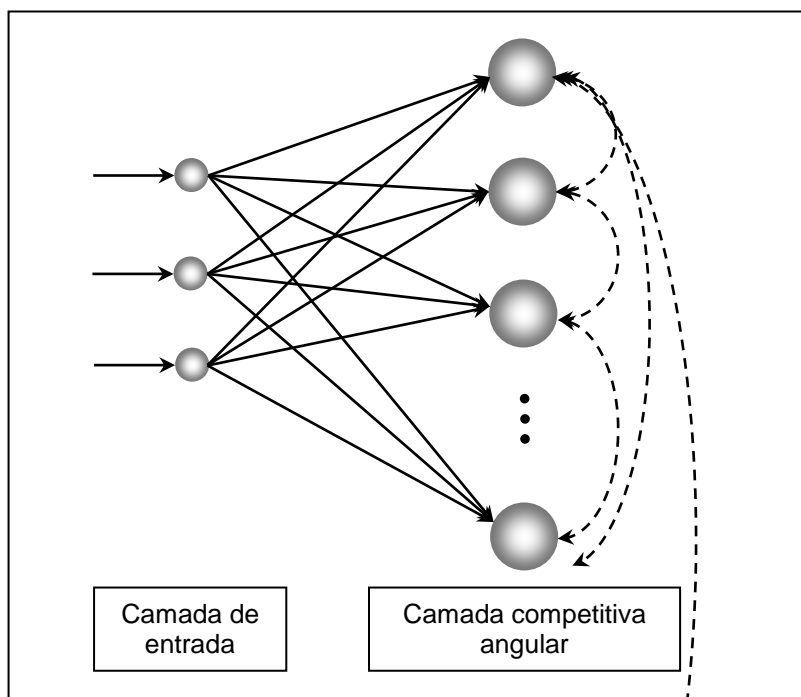
$$x_i = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \rightarrow X_i = \frac{x_i}{|x_i|}, \quad i = 1, 2 \dots N \quad (9)$$

Na equação 9, N é o número de pontos do conjunto de entrada $|x_i|$ representa o modulo de um vetor posição. Assim, cada neurônio de entrada recebe um elemento do vetor unitário.

Cada neurônio competitivo representa uma classe das M classes previamente estabelecidas, ou pontos de referência no espaço n-dimensional. O vetor de pesos sinápticos (W_j) que liga cada neurônio competitivo à camada de entrada é constituído pelos componentes associados ao vetor unitário do vetor posição (w_j) do ponto de referência, ou

$$w_j = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n) \rightarrow W_j = \frac{w_j}{|w_j|}, \quad j = 1, 2, \dots M \quad (10)$$

Figura 3 – Arquitetura da rede competitiva angular generalizada.



Fonte: Do Autor.

Em cada neurônio competitivo angular é realizada a avaliação da função de ativação (f) para o seu potencial de entrada (u_j), resultando no sinal de saída (y_j) do neurônio competitivo j . O potencial de entrada é tomado como o produto interno do vetor de entrada e cada um dos vetores associados aos pesos sinápticos de cada neurônio competitivo, ou

$$\begin{aligned} u_j &= X_i \cdot W_j = |X_i| |W_j| \cos\theta = \cos\theta \\ \Rightarrow y_j &= f(u_j) \end{aligned} \quad (11)$$

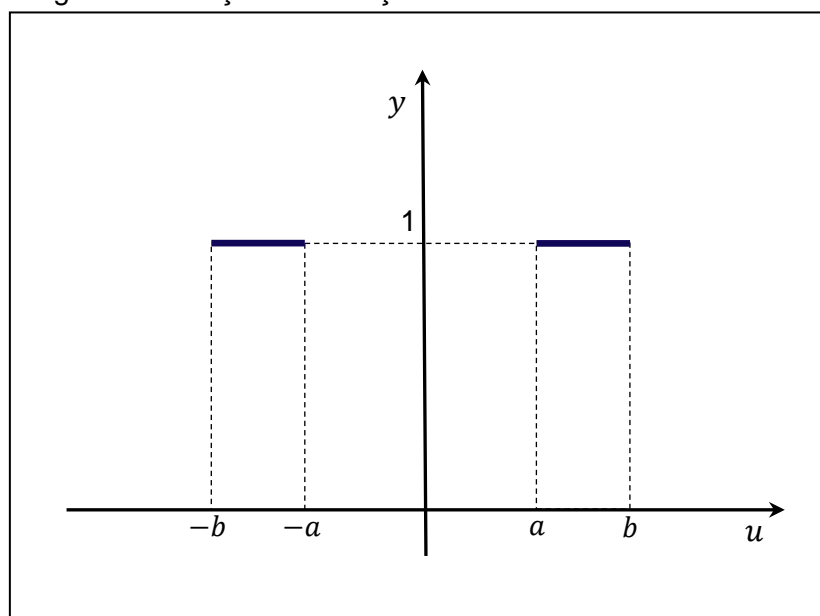
Na equação 11, θ é o ângulo entre os vetores de entrada e o vetor representativo de cada neurônio competitivo.

A função de ativação é tomada como uma função caixa, ou como apresentada na equação 12. Os valores das constantes a e b , que definem os limites da seleção são característicos de cada problema.

$$f(u_j) = \begin{cases} 1, & a \leq u_j \leq b \\ 1, & -a \geq u_j \geq -b \\ 0, & \text{outros casos} \end{cases} \quad (12)$$

A Figura 4 mostra o gráfico da função de ativação para cada neurônio competitivo.

Figura 4 – Função de ativação.



Fonte: Do Autor.

A função de ativação, correspondente à particular característica angular de interesse para a solução do problema. Para o caso de uma relação angular, que busca a proximidade angular entre pontos no plano, tem-se que o ângulo formado pelos seus vetores posição é próximo de zero, ou o seu cosseno próximo de um.

A regra de competição utilizada para a determinação do neurônio vencedor estabelece o neurônio vencedor, como aquele com o maior valor para o cosseno do ângulo. Assim, vence a competição por um ponto de entrada, o neurônio competitivo com o maior valor de saída.

A rede neural competitiva angular generalizada é inicialmente projetada com um número grande de neurônios na camada competitiva angular e seus pesos sinápticos são tomados como as coordenadas de pontos aleatórios no círculo unitário. A primeira fase de treinamento é iniciada com a competição entre os neurônios angulares a partir da apresentação dos dados de entrada. Ao final, os neurônios angulares que são vencedores para nenhum dos dados de entrada são

eliminados da camada competitiva. Na segunda fase do treinamento ocorre a competição entre os neurônios angulares restantes. Dois neurônios angularmente próximos, na maioria dos casos, representam um mesmo grupo dos dados de entrada e assim, o neurônio associado ao menor número de dados de entrada é eliminado e os pesos sinápticos do neurônio restante é movido para representar o ângulo médio do grupo de dados inicialmente vencidos pelos dois neurônios. Todo o processo se repete até que não existam neurônios angulares próximos. Na maioria dos casos, o número final de neurônios na camada competitiva angular representa o número de padrões angulares presentes nos dados de entrada.

5 METODOLOGIA

A aplicação da rede competitiva angular generalizada para a realização da interpretação computacional do gráfico de Pickett, explora a funcionalidade desta rede neural na solução de um problema de reconhecimento de padrão. Assume-se neste Trabalho de Conclusão de Curso, que os pontos do gráfico de Pickett, com 100% de saturação de água ou alinhados segundo a reta da água constituem o único padrão angular a ser identificado.

A metodologia apresentada neste TCC pode ser dividida nas seguintes etapas:

1. Identificação das camadas reservatório.
2. Cálculo da porosidade
3. Construção do Gráfico de Pickett
4. Aplicação da rede neural competitiva angular generalizada

A identificação da camada reservatório é realizada através da interpretação qualitativa do perfil de raios gama natural, onde se determina o intervalo de profundidades, no qual serão extraídos os valores de resistividade no perfil de resistividade profunda e onde serão calculados os valores de porosidade, a partir do perfil de porosidade (densidade, porosidade neutrônica e sônico) de melhor qualidade. Os pares ordenados referentes à cada ponto em profundidade serão lançados no gráfico de Pickett.

Como visto, os 3 primeiros passos são os procedimentos clássicos da Avaliação de Formação. Assim, será tratado apenas o último passo.

5.1 Aplicação da rede competitiva angular generalizada

A rede competitiva angular generalizada em sua proposição teórica opera com vetores unitários no espaço n-dimensional. Deste modo, o passo fundamental para a utilização desta rede na interpretação computacional do gráfico de Pickett é construir o vetor de entrada da rede angular. Ou seja, converter os vetores posição associados aos pontos presentes no gráfico de Pickett em vetores unitários cuja

direção esteja associada ao padrão angular que se deseja identificar ou à direção do vetor unitário da reta da água.

No caso específico da identificação da reta da água no gráfico de Pickett, observa-se que a inclinação desta reta não está relacionada às direções dos vetores posição associados aos pontos presentes no gráfico de Pickett.

Para a utilização da rede neural competitiva angular generalizada na interpretação computacional do gráfico de Pickett, adotam-se como vetores de entrada na rede, os vetores resultantes da diferença entre dois grupos de vetores posição dos pontos representados no gráfico de Pickett. O primeiro grupo é denominado como **Grupo de Referência** e formado pelos vetores posição associados aos pontos com os menores valores de resistividade. Admite-se que os pontos ou vetores do Grupo de Referência apresentam a maior probabilidade de estarem saturados pela água. Na metodologia aqui apresentada adota-se este grupo constituído por aproximadamente 1/3 dos pontos representados no gráfico de Pickett.

O segundo grupo é constituído pelo restante dos pontos da camada reservatório representados no gráfico de Pickett e não incorporados ao Grupo de Referência. Este segundo grupo conterà pontos com **diferentes saturações**, inclusive, pontos pertencentes à reta da água.

Assim os vetores de entrada (X_i) na rede competitiva angular generalizada são vetores unitários obtidos pela seguinte expressão:

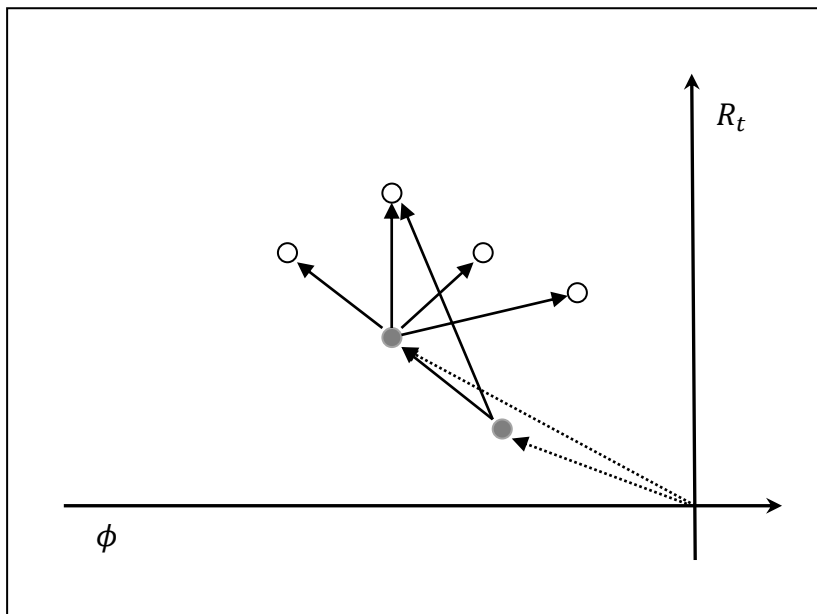
$$\begin{aligned} x_i &= p_k - q_j \quad k = 1, 2, \dots, M \quad e \quad j = 1, 2, \dots, N \\ \Rightarrow X_i &= \frac{x_i}{|x_i|} \end{aligned} \tag{13}$$

Na equação 13, o termo q_j representa o vetor posição de um ponto genérico pertencente ao Grupo de Referência, contendo N pontos e o termo p_k representa um vetor posição não pertencente ao Grupo de Referência, com M pontos.

A Figura 5 ilustra a construção dos vetores de entrada na rede competitiva angular generalizada. Os círculos em cinza representam os pontos do Grupo de Referência onde espera-se que os vetores diferença possuam direção semelhante à inclinação da reta da água. Os demais círculos representam os pontos ou vetores posição extraídos da camada reservatório e representados no gráfico de Pickett.

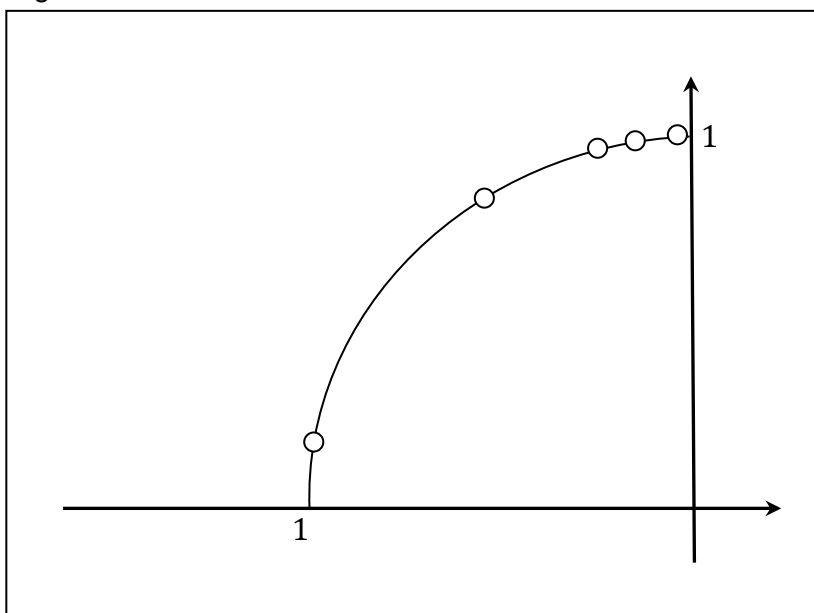
A Figura 6 mostra a representação no círculo unitários dos vetores de entrada da rede competitiva angular generalizada (círculos brancos).

Figura 5 – Construção dos vetores de entrada.



Fonte: Do Autor.

Figura 6 – Vetores de entrada.



Fonte: Do Autor.

A rede competitiva angular generalizada opera com o conjunto dos vetores de entrada (Equação 13) em duas fases: Fase de treinamento e fase de operação.

Inicialmente, é adotada uma arquitetura para a rede competitiva angular generalizada com a camada de entrada composta por dois neurônios de entrada, cada um recebendo as coordenadas dos vetores de entrada ou os vetores no plano definidos através da equação 13.

A camada competitiva é formada com o número inicial arbitrário de neurônios competitivos angulares. Neste trabalho, adota-se o número inicial de neurônios da camada competitiva angular igual à metade do número de pontos presentes no gráfico de Pickett. Claramente, o número de vetores de entrada criados a partir da equação 13 é muito maior que o número de pontos no gráfico de Pickett, no entanto considera-se o número adotado como o número máximo de classes ou padrões angulares presentes no conjunto de entrada.

Na fase de treinamento, é produzido um conjunto de pesos sinápticos que define a arquitetura final da rede ou o número final de neurônios na camada competitiva, que corresponde ao número de padrões angulares presentes no conjunto de vetores de entrada.

A fase de operação da rede competitiva angular se traduz pela realização da interpretação computacional do gráfico de Pickett ou a busca de um particular padrão presente no conjunto de padrões (pesos sinápticos) determinados na fase de treinamento. O padrão de interesse desta metodologia é representado pelo neurônio associado ao maior número de dados de entrada. Admite-se que os pontos do gráfico de Pickett associados aos pontos saturados por água estejam presentes no Grupo de Referência e, conseqüentemente, produzam o maior número de vetores de entrada.

6 RESULTADOS

A apresentação da interpretação computacional do gráfico de Pickett será feita com dois exemplos ilustrativos, o primeiro utilizando dados sintéticos e o segundo apresentará o comportamento desta metodologia em dados reais.

6.1 Dados sintéticos

Os dados sintéticos utilizados para a construção do gráfico de Pickett são obtidos pelo modelo petrofísico dos perfis de poço.

O perfil de resistividade é obtido através da equação de Archie, repetida abaixo

$$R_t = \frac{R_w}{\phi^m S_w^2} \quad (14)$$

Na equação 14, é admitida uma variação aleatória para a porosidade no intervalo [0,05 0,20] pu (porosity units). Os parâmetros da equação de Archie e associados à reta da água no gráfico de são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do modelo sintético.

Camada	Resistividade da água	Expoente de Cimentação
A	0,2	2,00
B	0,02	1,80

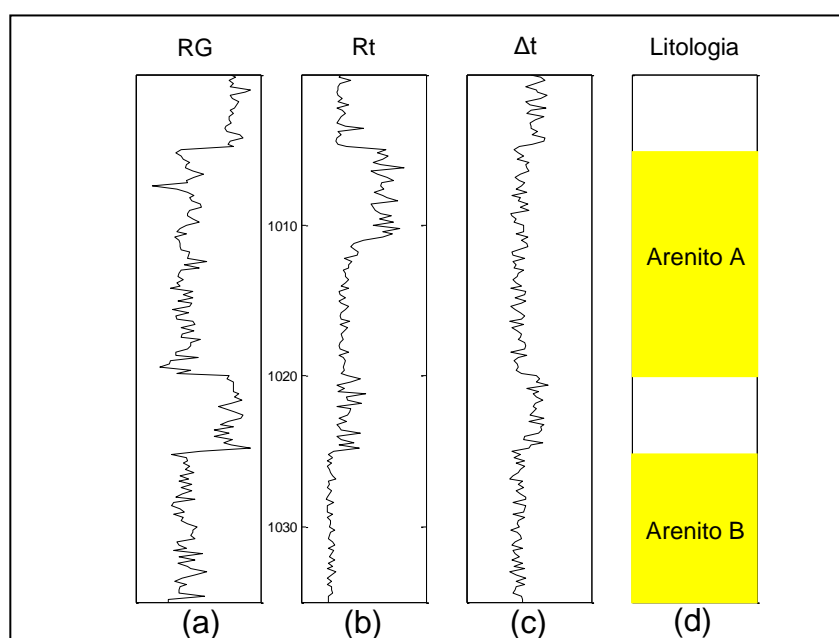
O perfil sônico é adotado com dado sintético para o cálculo da porosidade e construído a partir da mesma variação de porosidade usada na construção do perfil de resistividade, de acordo com a equação 4, repetida abaixo

$$\Delta t = \phi \Delta t_w + (1 - \phi) \Delta t_m$$

A figura 7 mostra o conjunto de perfis tomados como exemplo sintético. Em (a) mostra-se o perfil de raio gama natural (RG), em (b) o perfil de resistividade profunda (Rt) e em (c) o perfil sônico.

Ainda na figura 7, em (d) mostra-se o modelo geológico adotado no modelamento dos perfis sintéticos. Tem-se assim, os perfis produzidos em uma seção do poço que atravessa duas camadas reservatório. A camada reservatório A é um arenito e possui espessura total de 15 metros e espessura de reservatório de 6 metros. A camada B é um arenito com espessura total de 10 metros e não reservatório.

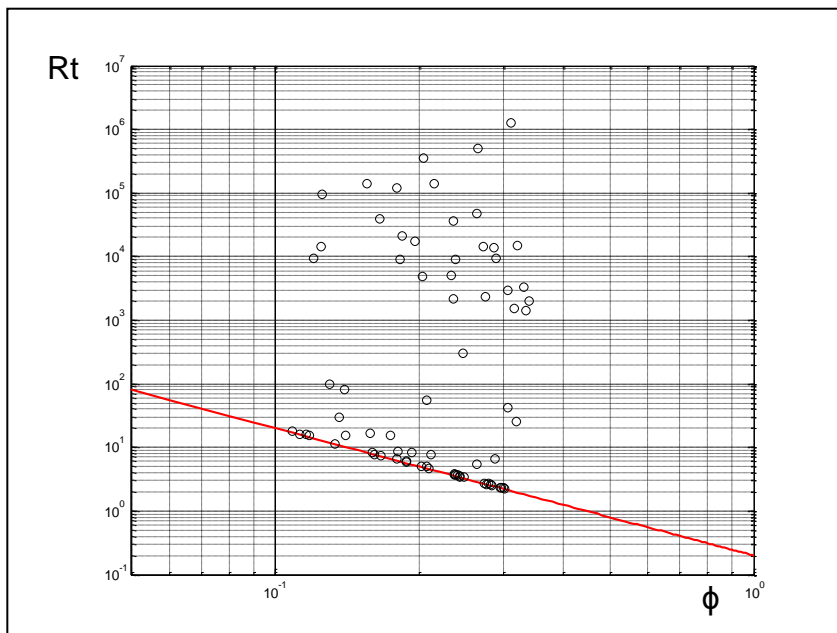
Figura 7 – Perfis usados no dado sintético.



Fonte: Do Autor.

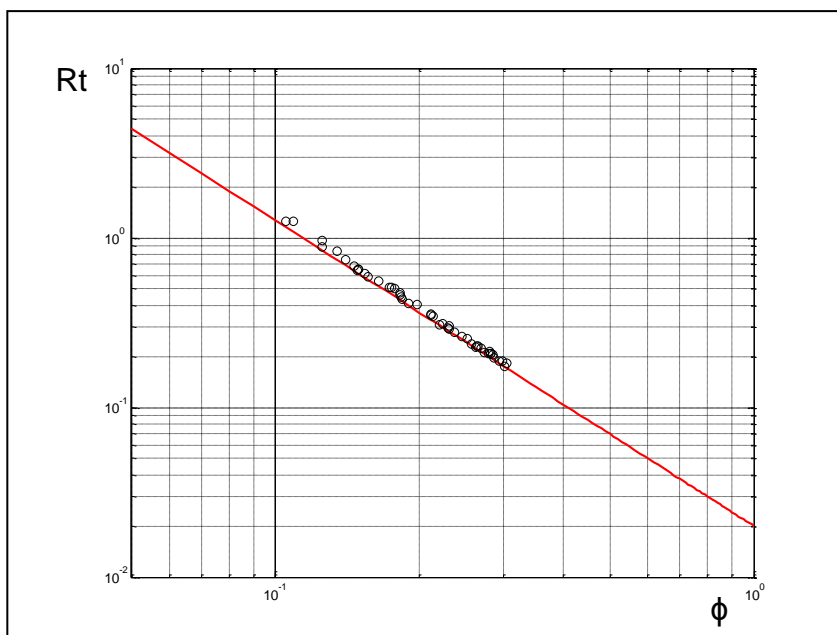
A Figura 8 mostra o gráfico de Pickett construído para a camada A, onde se observa a característica de reservatório (camada com hidrocarboneto) representada pelos círculos brancos afastados da reta da água, representada pela linha em vermelho. A Figura 9 apresenta o gráfico de Pickett para a camada B, que é uma camada não reservatório.

Figura 8 – Gráfico de Pickett para a camada A.



Fonte: Do Autor.

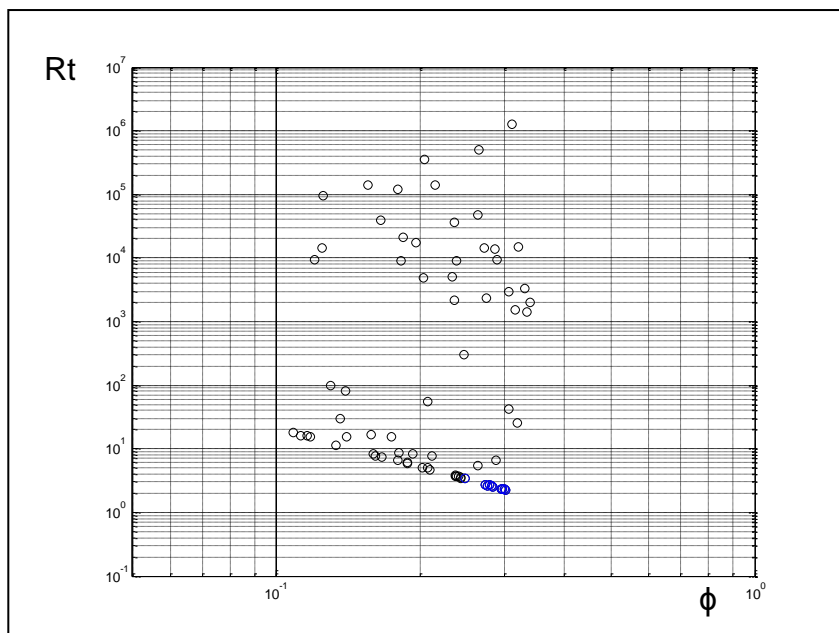
Figura 9 – Gráfico de Pickett para a camada B.



Fonte: Do Autor.

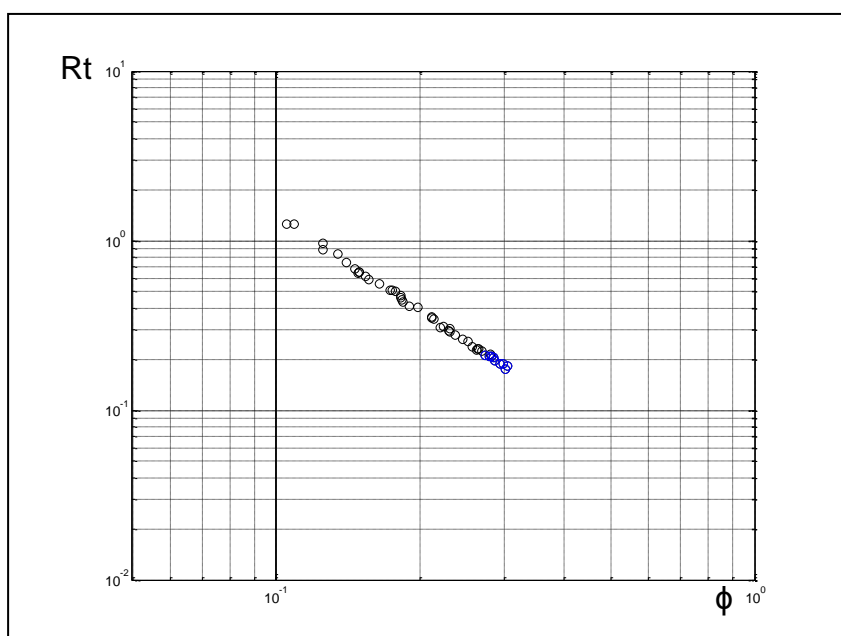
A Figura 10 e a Figura 11 mostram os gráficos de Pickett mostrados nas figuras 8 e 9, para as camadas A e B, respectivamente, onde os círculos em azul marcam os pontos tomados, para cada caso, como Grupo de referência.

Figura 10 – Gráfico de Pickett para a camada A com Grupo de Referência.



Fonte: Do Autor.

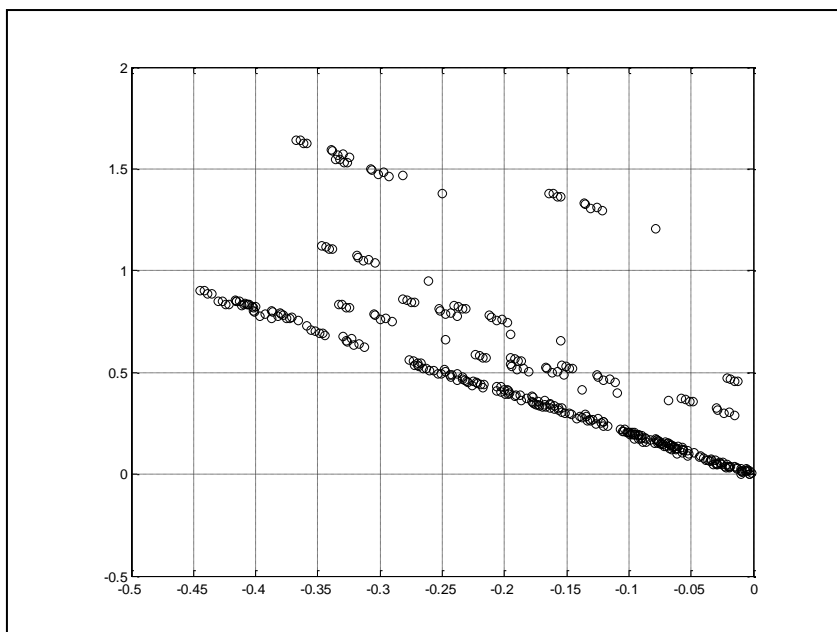
Figura 11 – Gráfico de Pickett para a camada B com Grupo de Referência.



Fonte: Do Autor.

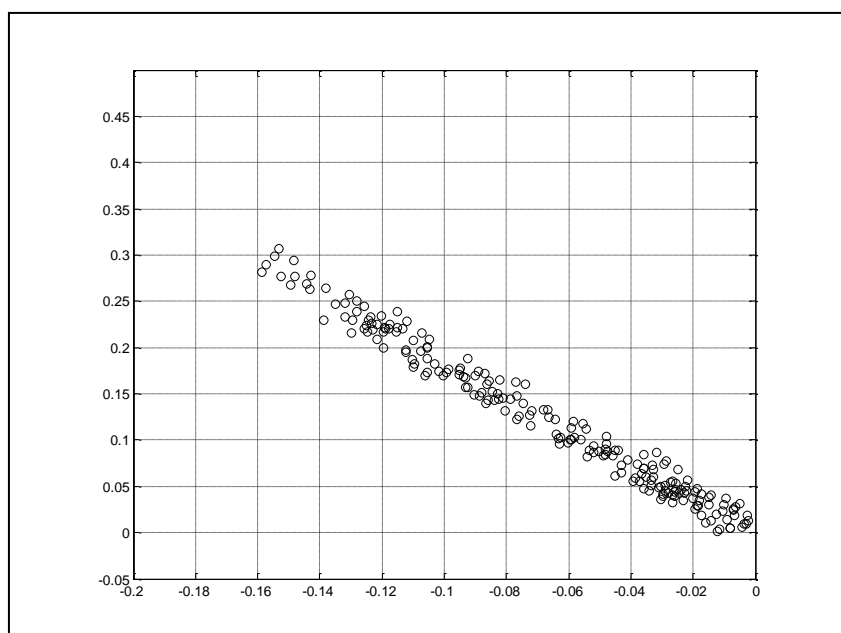
Na Figura 12 círculos brancos representam os vetores diferença obtidos do gráfico de Pickett da camada A. A Figura 13 mostra os vetores diferença obtidos do gráfico de Pickett da camada B.

Figura 12 – Gráfico de vetores diferença para a camada A.



Fonte: Do Autor.

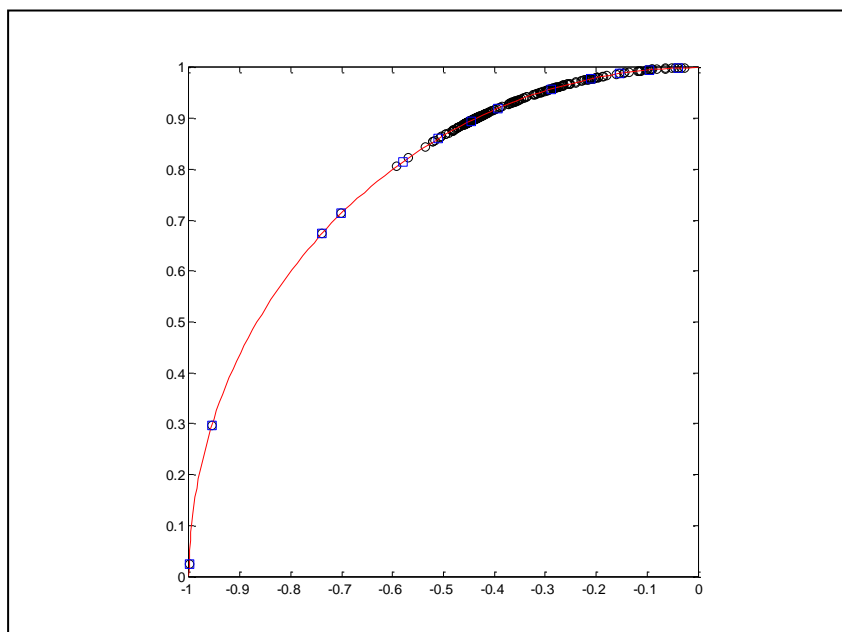
Figura 13 – Gráfico de vetores diferença para a camada B.



Fonte: Do Autor.

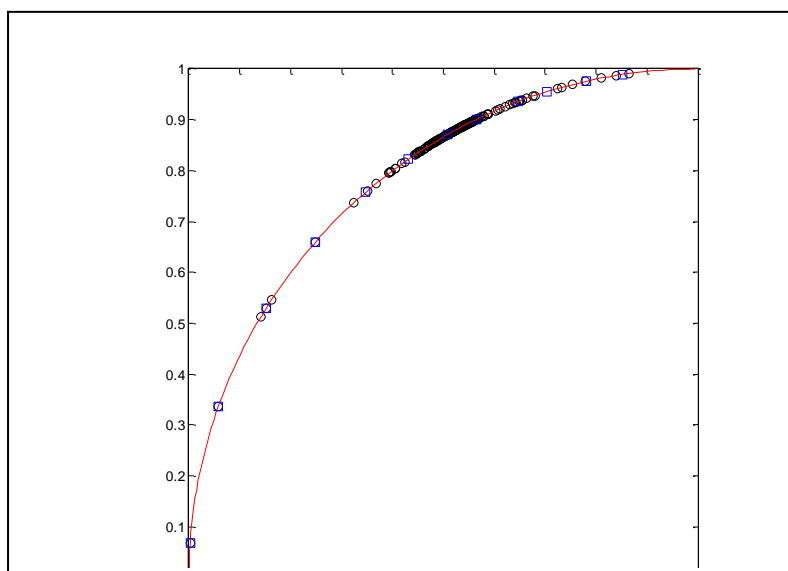
A Figura 14 mostra os vetores unitários que formam os dados de entrada da rede competitiva angular generalizada construída para interpretar o gráfico de Pickett da camada A. A linha em vermelho marca o círculo unitário e os quadrados azuis mostram os pesos sinápticos finais da rede. A Figura 15 mostra o mesmo para a camada B.

Figura 14 – Gráfico de vetores unitários para a camada A.



Fonte: Do Autor.

Figura 15 – Gráfico de vetores unitários para a camada B.



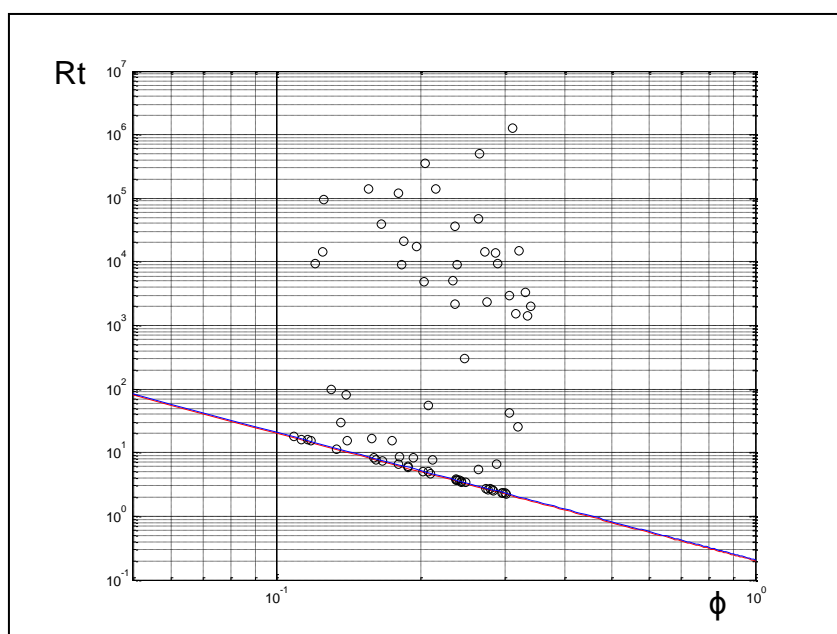
Fonte: Do Autor.

A Figura 16 mostra a interpretação do gráfico de Pickett construído para a camada A. A linha em azul marca a reta da água construída a partir da resistividade da água e do expoente de cimentação estimados pela metodologia apresentada e apresentados na Tabela 3. A Figura 17 mostra os resultados obtidos para a camada B

Tabela 3 - Parâmetros estimados para o modelo sintético.

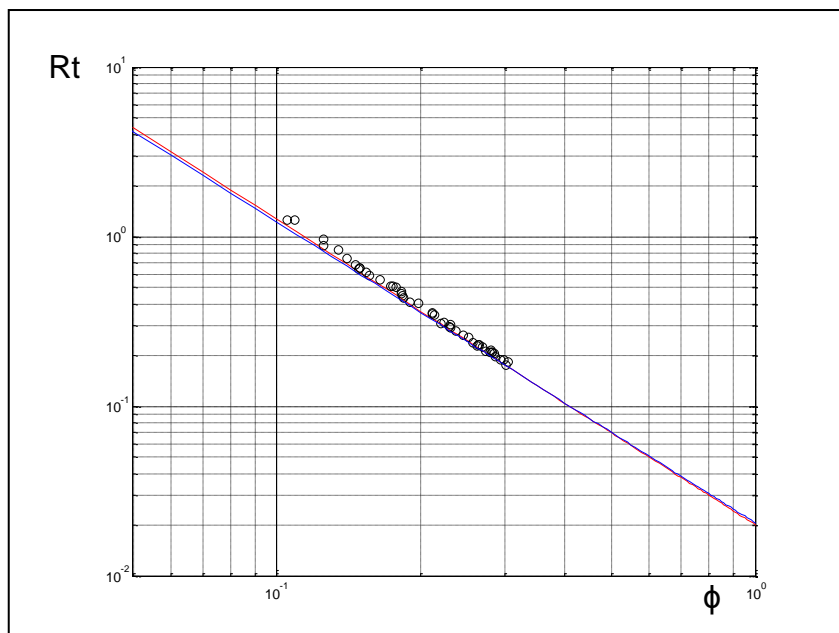
Camada	Valores do modelo		Valores estimados	
	Resistividade da água	Expoente de Cimentação	Resistividade da água	Expoente de Cimentação
A	0,20	2.00	0,2068	2,0049
B	0,02	1,80	0,0206	1,7725

Figura 16 – Gráfico de Pickett gerado pela rede para a camada A.



Fonte: Do Autor.

Figura 17 – Gráfico de Pickett gerado pela rede para a camada B.



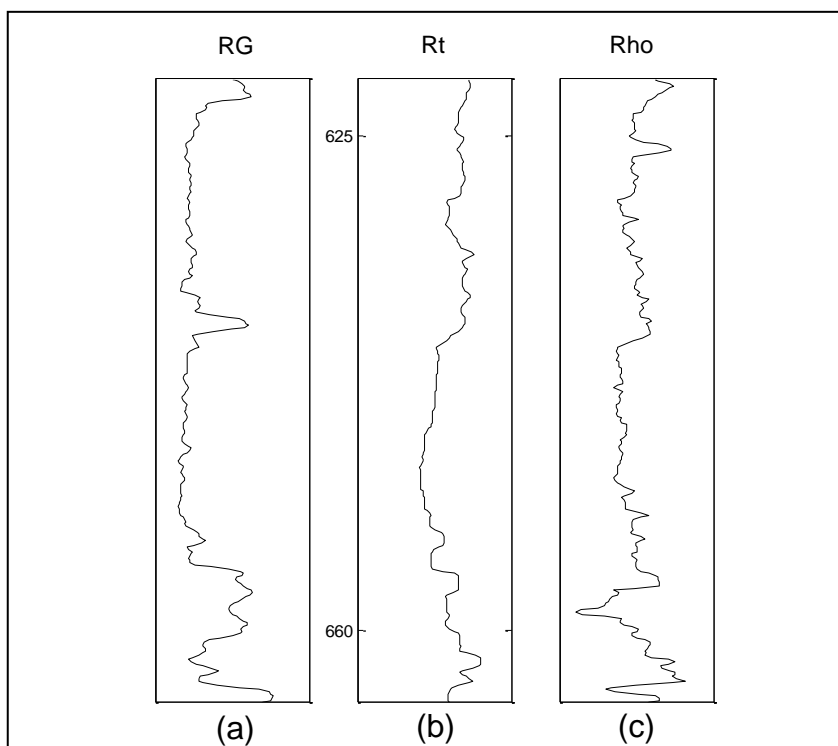
Fonte: Do Autor.

6.2 Dados reais

Para exemplificar o comportamento da rede competitiva angular generalizada para produzir a solução da equação de Archie através da interpretação computacional do gráfico de Pickett, apresenta-se um conjunto de dados de poço publicados por Tobb Darling (DARLING, 2005. Pg. 31; Figura 2.2.1).

A Figura 18 apresenta o conjunto de perfis contendo as curvas de raios gama natural (a), resistividade profunda (b) e de densidade (a) adquiridos em um poço que apresenta um reservatório entre as profundidades de 622 a 646 metros e uma zona de água de 646 a 670 metros. Neste caso, será utilizado o perfil de densidade para o cálculo da porosidade.

Figura 18 – Conjunto de perfis de dados reais.

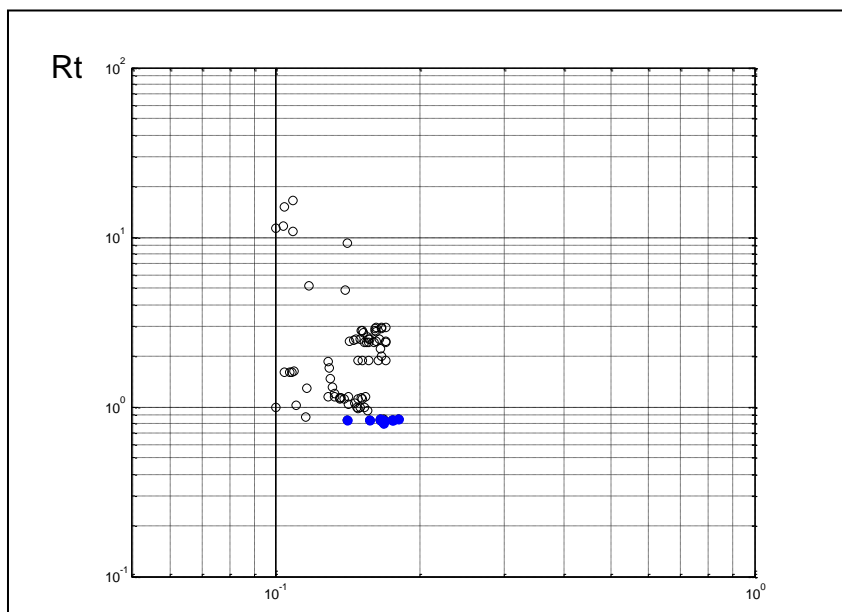


Fonte: Darling (2005)

A Figura 19 mostra o gráfico de Pickett construído para a camada reservatório. Os círculos em azul marcam os pontos que formam o Grupo de referência.

A Figura 20 mostra os vetores diferença obtidos do gráfico de Pickett da Figura 19 representados por círculos brancos.

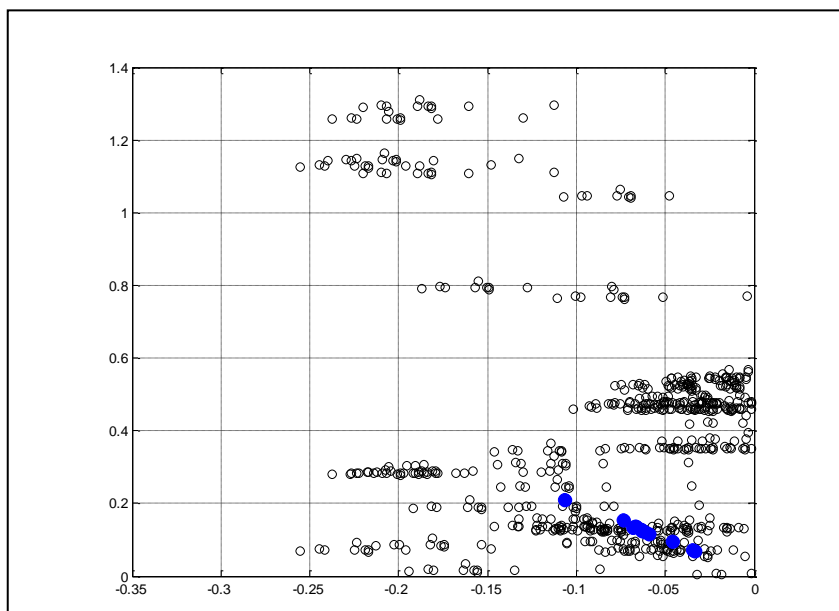
Figura 19 – Gráfico de Pickett com Grupo de Referência da camada reservatório.



Fonte: Do Autor.

 ϕ

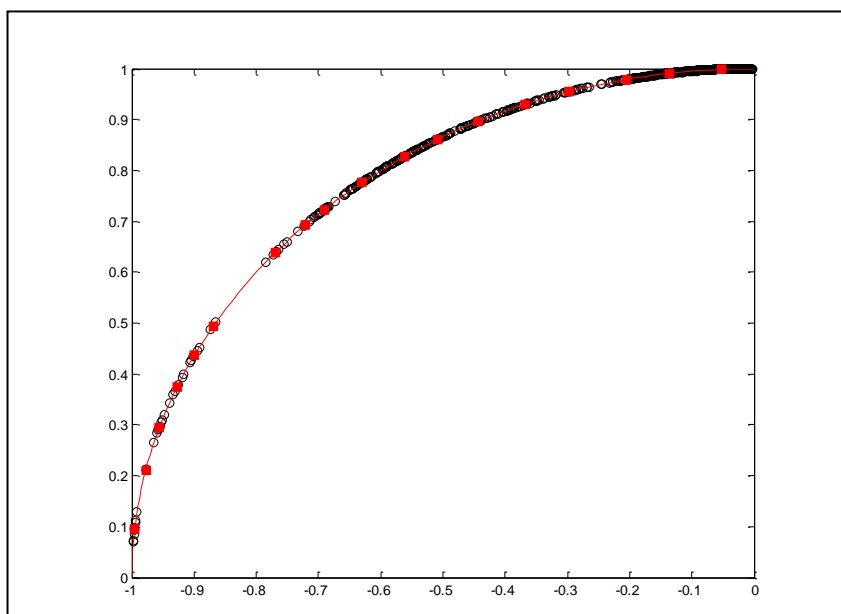
Figura 20 – Gráfico de vetores diferença para a camada reservatório.



Fonte: Do Autor.

A Figura 21 mostra os vetores unitários dos vetores diferença mostrados na Figura 20, que formam os dados de entrada da rede competitiva angular generalizada construída para interpretar o gráfico de Pickett mostrado na Figura 19. A linha em vermelho marca o círculo unitário e os quadrados vermelhos mostram os pesos sinápticos finais da rede.

Figura 21 – Gráfico de vetores unitários para a camada reservatório.



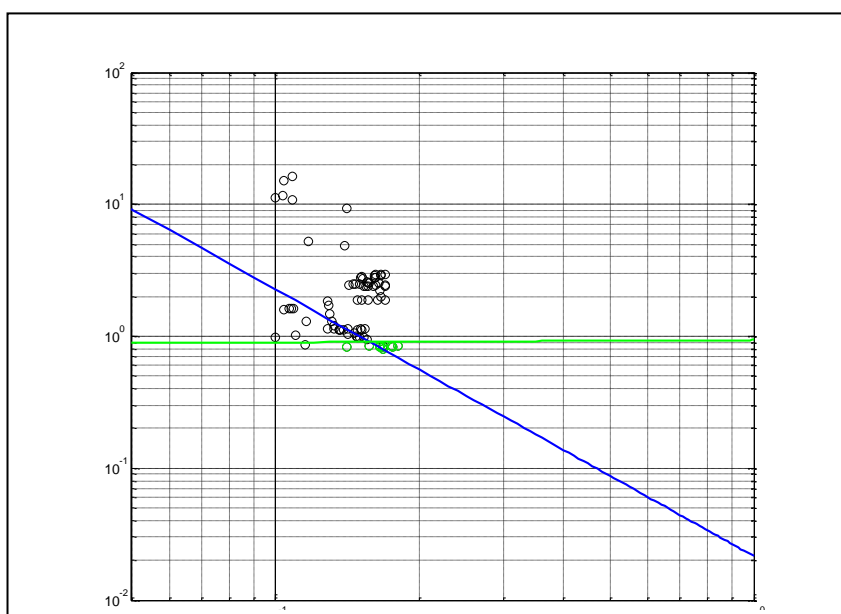
Fonte: Do Autor.

A Figura 22 mostra a interpretação do gráfico de Pickett mostrado na Figura 19. A linha em azul marca a reta da água construída a partir da resistividade da água e do expoente de cimentação estimados pela metodologia aqui descrita e apresentados na Tabela 4. A linha verde mostra a reta obtida através do método de ajuste linear dos pontos (círculos verdes), de baixa resistividade e utilizados para construir o grupo de referência.

Tabela 4 - Parâmetros estimados para o dado real.

Método	Resistividade da água	Expoente de Cimentação
Laboratório (Darling, 2005)	0,0250	1,9000
Rede competitiva angular generalizada	0,0215	2,0226

Figura 22 – Gráfico de Pickett gerado pela rede para a camada reservatório.



Fonte: Do Autor.

7 CONCLUSÕES

A necessidade da interpretação visual para a solução do gráfico de Pickett é a causa potencial da possibilidade de ocorrência de grandes erros na estimativa da saturação de água e, por consequência, na qualificação do reservatório.

Este trabalho apresenta uma metodologia, baseada na rede neural competitiva angular generalizada, que se mostrou capaz de produzir uma boa estimativa para a locação da reta da água, a partir da produção de valores realistas para a resistividade da água de formação e para o expoente de cimentação.

No caso de dados sintéticos, os valores produzidos são próximos dos valores utilizados na construção dos perfis sintéticos, mesmo considerando a presença de ruído, mas fundamentalmente pela ausência de argilosidade.

No caso dos dados reais, a ocorrência da argilosidade é a responsável pela variação dos valores estimados para a resistividade da água e para o expoente de cimentação em relação aos valores obtidos em laboratório.

Como conclusão final, fica para futuros trabalhos a adequação da metodologia apresentada para o caso mais geral de rochas reservatório sujas (contendo argila na sua constituição), tal que seja viável a produção de uma avaliação de formação, em tempo real de perfilagem, com a redução do tempo de sonda, com a rápida decisão sobre a destinação final do poço.

REFERÊNCIAS

ARCHIE, G.E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. **Trans. Am. Inst. Min. Metal. Pet. Eng. Inc.**, v.146, p. 54-62. 1942.

BARROS, C.; ANDRADE, A. Determination of water saturation by intelligent algorithm. **Journal of Petroleum Science and Engineering**., v. 102, p. 47–56, Feb. 2013,

DARLING, T. **Well logging and formation evaluation**. New York: Elsevier, 2005. 326p.

KOHONEN, T. **Self-organization and associative memory**. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 312 p.

MCCULLOH, W.S. ; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **Bulletin of Mathematical Biophysics**, n.5, p. 115-133. 1943.

PETROLEO BRASILEIRO (PETROBRAS). **Lamina delgada mostrando a coexistência de água de formação e hidrocarboneto**. Rio de Janeiro, 2014. (imagem).

PICKETT, G. R. A review of current techniques for determination of water saturation from Logs, **SPE Journal of Petroleum Technology**. p.1425-1435. 1966.

SANTOS, R. S. **Identificação de fácies em perfis de poço com algoritmo inteligente**. 2014. 54f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, CPGf, Belém, 2014.

WYLLIE, M.R.J.; GREGORY, A.R.; GARDNER, L.W. Elastic waves velocities in heterogeneous and porous media. **Geophysics**, v.21 n.1, p. 41–70. 1956.