

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

## RELATÓRIO DE ESTÁGIO

Alex Neyves Mariani Alves

Relatório apresentado à coordenação de estágios em Engenharia Elétrica da UFPB como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Campina Grande - PB, 15 de fevereiro de 1998

**ESTAGIÁRIO : ALEX NEYVES MARIANI ALVES**

**MATRÍCULA : 9711164-2**

**EMPRESA : LAB. DE RECURSOS HÍDRICOS - DEC - UFPB/CAMPUS II**

**SUPERVISOR : SARMA KAMENSWARA VENKATA SEEMANAPALLI**

**TIPO DE ESTÁGIO : SUPERVISIONADO**

**PERÍODO DE ESTÁGIO : 15 DE DEZEMBRO/97 À 10 DE FEVEREIRO/98**

**PROF. ORIENTADOR : SARMA KAMENSWARA VENKATA SEEMANAPALLI**

**COORDENADOR DE ESTÁGIOS : RICARDO J. AGUIAR LOUREIRO**



Biblioteca Setorial do CDSA. Março de 2021.

Sumé - PB

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela sua misericórdia que me socorre diariamente.

Agradeço aos meus irmãos **Márcio e Cely**, amigos sinceros, cúmplices de alegrias e tristezas que vivi.

Agradeço à minha esposa **Valnia Lima Véras Mariani Alves** - mulher singular - pelo seu carinho, companheirismo e compreensão nos momentos críticos por que passei.

Agradeço à **Nevolanda Mariani de Souza Alves e Aloísio Barbosa Alves**, meus pais, pelo esforço incansável dedicado para minha formação profissional e humana.

Agradeço aos meus avós pelas suas lições, indispensáveis para minha condição de cidadão.

Agradeço ao Prof. **Sarma Kamenswara Venkata Seemanapalli** - orientador, professor e amigo - pela atenção dispensada na elaboração desse trabalho, e pela sua colaboração, imprescindível, para minha formação acadêmica.

Agradeço à Área de Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, pela disponibilização dos recursos técnicos e humanos, necessários para o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço a **Adail**, secretária da coordenação de Engenharia Elétrica, pela seu espírito voluntarioso e prestativo, mais amigo que profissional, mais profissional que por obrigação.

Agradeço aos meus amigos pelas experiências divididas.

Agradeço a todos aqueles que de uma forma ou de outra colaboraram para a concretização desse momento, dos quais serei eternamente grato.

## ÍNDICE

<b>1.0 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>5</b>
<b>2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1 A TEORIA DO MODELO .....	6
2.2 FLUXO RADIAL.....	6
<b>3.0 O MODELO ELETROANALÓGICO .....</b>	<b>8</b>
3.1 - COMPARAÇÃO DAS LEIS DA HIDRÁULICA E DA ELETRICIDADE .....	8
<b>4.0 DESCRIÇÃO DOS MODELOS UTILIZADOS .....</b>	<b>10</b>
4.1 O PAINEL ELETROANALÓGICO .....	10
4.2 APARELHAGEM ELETRÔNICA UTILIZADA.....	14
<b>5.0 ESTUDO DE CASO - INFLUÊNCIA DE BARREIRAS IMPERMEÁVEIS NA PRODUTIVIDADE DE POÇOS .....</b>	<b>14</b>
5.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES .....	14
5.2 - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS.....	15
5.3 - A SIMULAÇÃO DO AQUÍFERO .....	16
5.4 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	17
<b>6.0 CONCLUSÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>21</b>

*Ao meu filho Alex Neyves Vêras Mariani Alves, com carinho e afeto;  
e ao amigo Waldir Ferreira Vêras, pelo apoio e amizade  
dispensados no momento mais difícil que até então passei.*

## 1.0 INTRODUÇÃO

Os modelos eletroanalógicos do tipo RC (Resistivo-Capacitivo) são instrumentos de grande valia nos estudos da Hidrologia Subterrânea. Servem para implantar as condições de campo ou estender e ampliar as condições adotadas, a fim de se conhecer o comportamento dos aquíferos, percolação em barragens de terra e outras estruturas hidráulicas. São modelos adequados para simular condições de armazenamento em aquíferos, bacias subterrâneas, poços, rebaixamento ou recuperações naturais ou artificiais por contribuição de rios ou riachos para aquífero e vice-versa. Condições permanentes e variáveis, confinadas e não confinadas, isotrópicas e não isotrópicas, homogêneas e estratificadas podem ser implantadas com circuitos elétricos contendo resistores e/ou, também, resistores - capacitores, sendo cada tipo de circuito adequado a determinadas situações. Nos modelos eletroanalógico o fluxo de eletricidade através dos resistores e o armazenamento de carga elétrica nos capacitores representam respectivamente o fluxo e o armazenamento de água nos meios porosos. As fontes de carga ou descarga são simuladas usando-se as correspondentes tensões e correntes elétricas.

Este estágio consistiu, basicamente, em estudar modelos eletroanalógicos do tipo RC, aplicados para a simulação de poços de bombeamento. A analogia é feita entre os parâmetros de fluxo e armazenamento de eletricidade nos resistores e capacitores do modelo e o fluxo e o armazenamento de água nos meios porosos.

O problema das formações impermeáveis em aquíferos foi estudado para barreiras impermeáveis regulares, variando-se a posição com relação ao centro onde se dá o bombeamento, com barreiras perpendiculares à direção radial, e um caso com barreira alinhada a direção radial, observando-se os efeitos na produção do poço. Para as barreiras não radiais, a influência da posição sobre a vazão do poço foi relativamente grande, para pequenas distâncias da barreira hidráulica ao poço. Por sua vez, quando colocado na direção radial ao poço, na posição considerada, houve apenas uma pequena influência sobre a sua produtividade.

A partir da simulação, comparando e testando algumas teorias e investigando os resultados obtidos, observamos algumas condições de campo que melhoram substancialmente a produtividade dos poços.

## **2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 A TEORIA DO MODELO**

Analogia é um dispositivo, ou mecanismo, com entrada/saída ou causa/efeito com relação ao protótipo, mas com propriedades físicas diferentes.

A analogia mais comum no estudo do movimento de água subterrânea é a analogia elétrica, quando a corrente elétrica fluindo através de um resistor, ou outro condutor, simula a água fluindo através de um determinado material (meio), com o potencial elétrico correspondendo ao potencial hidráulico.

Essa analogia é baseada na similaridade existente entre a lei de Darcy, utilizada em hidráulica, e a lei de Ohm, voltada para a eletricidade. Outras analogias existentes, também utilizando a eletroanalogia é entre Calor/Fluxo - analogia, baseado na similaridade entre as lei de Fourier e a Lei de Darcy.

A analogia elétrica pode ser classificado em: analogia com média contínua quando é utilizado como simulação um reservatório eletrolítico, para simulação dos valores do protótipo(Analogia com reservatório eletrolítico); e a analogia com média não contínua, utilizada nesse trabalho, que se utiliza de uma rede de resistores, convenientemente calculado, para obter os valores das grandezas hidráulicas correspondentes. (Analogia com rede de resistores) (Bowver, 1969).

### **2.2 FLUXO RADIAL**

A exploração de água subterrânea através de poços tem sido uma importante fonte de abastecimento para o uso das populações através dos tempos. Contudo, sendo essa uma fonte natural, o suprimento dela oriundo não é ilimitado, necessitando de cuidados quanto às quantidades exploradas e quanto à proteção contra poluentes a serem desenvolvidas. As profundidades em que são encontradas essas fontes são muito variáveis, dependendo de formas geológicas e dos chamados aquíferos. Os aquíferos são formações permeáveis com capacidade suficiente para fornecer água em quantidade que atenda às necessidades humanas. Os mais comuns são formados de materiais não consolidados como areias e cascalhos que ocorrem em vales aluviais, leitos antigos de rios cobertos por depósitos finos e dunas (Moura, 1983).

Os aquíferos podem ser classificados como confinados e não confinados (livres). os aquíferos livres são semelhantes a lagos subterrâneos em meios porosos e o nível d'água fica no seu topo com pressão igual à pressão atmosférica.

Com as descobertas do hidrologista francês Darcy (1856), sobre a relação entre a velocidade e o gradiente hidráulico e a aplicação dessa para sistemas bi e tri dimensionais, iniciou-se o interesse de outros pesquisadores por problemas de escoamento em meios porosos.

Para aquíferos livres, usando a teoria de Dupuit-Forchheimer, Adolf e Gunther Thiem (1906), conjuntamente, desenvolveram equações para obtenção da vazão com fluxo laminar horizontal permanente.

Um grande avanço nos estudos de fluxo não permanente foi dado por Theis (1935) que desenvolveu uma fórmula introduzindo os conceitos de fator de tempo e coeficiente de armazenamento. Theis notou que em um poço penetrante num aquífero confinado e extenso, bombeando com vazão constante, a influência da vazão se estende no espaço com o passar do tempo, provando que teoricamente não se pode conseguir regime permanente.

Hantush (1962) estudou os efeitos de rebaixamento sobre a vazão explorável em aquíferos confinados com os casos de penetração parcial e total, oferecendo expressões em forma de séries infinitas. Posteriormente, em 1964, em seu trabalho "Hydraulic of Wells" tratou extensivamente sobre assuntos como poços artesianos, interferência entre poços, efeitos de barreiras impermeáveis e aquíferos semi-permeáveis.

Muitos pesquisadores contribuíram para o desenvolvimento das teorias ligadas à percolação em barragens de terra, perdas nos canais e influência de barreiras nos poços. Entretanto, citou-se os que mais se destacaram nessas áreas do conhecimento, e que têm relação direta com os assuntos discutidos neste trabalho.

### 3.0 O MODELO ELETROANALÓGICO

#### 3.1 - COMPARAÇÃO DAS LEIS DA HIDRÁULICA E DA ELETRICIDADE

A analogia elétrica foi desenvolvida inicialmente por Pavlovsky na Rússia por volta de 1920 e a partir daí tornou-se um instrumento intensamente utilizado para a solução de problemas de fluxo em meios porosos.

O desenvolvimento e aperfeiçoamento dos equipamentos eletrônicos para medição de tensões, resistências, correntes elétricas, etc; e a produção em série de resistores e capacitores de baixo custo e alta precisão contribuíram ainda mais para que a eletroanalogia fosse utilizada para os estudos não só de escoamento em meios porosos, mas também em difusão de sais e gases, movimento de calor, etc.

A semelhança das equações diferenciais da hidráulica dos meios porosos e da eletrodinâmica nos condutores determina uma correspondência biunívoca entre as grandezas físicas intervenientes em ambos os processos. Esta semelhança fica evidenciada observando-se o quadro a seguir:

#### SISTEMA HIDRÁULICO :

$$\text{Lei de Darcy : } \mathbf{q} = - \mathbf{K} \text{ grad } H \quad 1$$

Equação da Continuidade :

$$K \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) - S_v \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = 0 \quad 2$$

#### SISTEMA ELÉTRICO :

$$\text{Lei de Ohm : } \mathbf{i} = - \sigma \text{ grad } V \quad 3$$

Equação de Fourier :

$$\sigma \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) - C \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = 0 \quad 4$$

onde :

**q** : vazão específica

**i** : corrente elétrica

**h** : potencial hidráulico

**V** : potencial elétrico

**K** : condutividade hidráulica (permeabilidade)

$\sigma$  : condutividade do meio elétrico

**Sv** : armazenagem líquida específica

**C** : capacitância elétrica

**t** : tempo

**x, y, z** : coordenadas espaciais

Em vista dessas considerações, para condições de contorno adequadas à regiões geometricamente semelhantes, a solução das equações do sistema hidráulico e do sistema elétrico permite obter resultados análogos, relacionados por fatores de escala selecionados.

Assim, pode-se estabelecer fatores de escala adequados ao modelo elétrico que simulam o sistema hidráulico. Estes fatores são os seguintes:

a) Fator de escala de potenciais ( $E_p$ )

b) Fator de escala de resistências ( $E_r$ )

c) Fator de escala de fluxo ( $E_q$ )

d) Fator de escala de tempo ( $E_t$ )

com :

$$E_p = \frac{\Delta x}{\Delta V} \quad (m/volt) \quad 5$$

$$E_r = \frac{\Delta x}{\Delta y \cdot K \cdot L} \cdot \frac{1}{R_x} \quad (seg/m^2\Omega) \quad 6$$

$$E_q = \frac{\Delta Q_x}{\Delta i_x} \quad (m^3/coulomb) \quad 7$$

$\Delta t$

- $\Delta x$  - dimensão da malha do modelo na direção x
- $\Delta y$  - dimensão da malha do modelo na direção y
- $R_x$  - resistência elétrica na direção x
- $\Delta Q_x$  - componente da vazão na direção x
- $i_x$  - corrente elétrica na direção x
- L - dimensão na direção transversal (= 1 para modelos bidimensionais)
- $\Delta t$  - intervalo de tempo no sistema hidráulico
- $\Delta t'$  - intervalo de tempo no modelo
- n - capacitância hidráulica relativa (coef. de armazenamento)
- C - valor dos capacitores do modelo (se o modelo é do tipo RC).

O fator de escala de fluxo pode ser obtido pela relação  $E_q = E_p/E_r$ , derivada das anteriores. O fator de tempo está relacionado com  $E_q$  e  $E_p$  pela seguinte expressão:

$$C = n \cdot \Delta x \cdot \Delta y \left( \frac{E_p}{E_q \cdot E_t} \right)$$

9

Com estas expressões anteriores é possível calcular os valores das resistências e capacitores dos modelos do tipo R ou RC, a fim de que haja perfeita semelhança entre o sistema hidráulico e o sistema elétrico.

## 4.0 DESCRIÇÃO DOS MODELOS UTILIZADOS

### 4.1 O PAINEL ELETROANALÓGICO

Os modelos utilizados neste trabalho foram montados no painel bidimensional de resistores e capacitores da Área de Recursos Hídricos do Centro de Ciências e Tecnologia da UFPB.

Trata-se de um painel de 3mx2m de dimensões, formado por 24 placas metálicas medindo 50cm x 50cm cada, conectadas entre si (vide figura 1). O painel contém 2.400 nós que, com exceção dos das bordas, podem ser conectados horizontalmente e verticalmente com os nós vizinhos. As conexões entre os nós são feitas através de 4 (quatro) contatos do tipo “banana plug” simétricos em relação ao ponto nodal, por resistores acoplados em tomadas de

conexão simples, com valores previamente estabelecidos. Cada ponto nodal fica a uma distância de 5 cm do vizinho e através de um contato (que é o próprio nó) do tipo “banana jack” se conecta o elemento capacitivo, no caso de modelos RC, como na figura 02.

Dessa forma, com modelos eletroanalógicos com contornos semelhantes aos de um sistema hidráulico, a dissipação e o armazenamento de carga elétrica nos resistores e capacitores, respectivamente, dos modelos representam fenômenos de semelhante comportamento ao fluxo e armazenamento de água nos meios porosos.

As condições de fronteira do sistema hidráulico são simuladas também no sistema elétrico guardando sempre a semelhança entre modelo e protótipo. Assim, tem-se os seguintes critérios aplicados aos modelos para a simulação perfeita:

a) Contornos (ou equipotenciais em subcircuitos confinados) de imergência ou de emergência sob lâmina d'água no protótipo correspondem, respectivamente, a tomadas ou saídas de correntes elétricas no modelo;

b) Contornos impermeáveis no protótipo (ou superfícies de fluxo em subcircuitos confinados) correspondem aos limites da malha de resistores (e capacitores) com o restante do modelo (além dos limites) caracterizado por resistores ôhmicos de valores muito grandes (quase infinitos) em relação aos resistores constituintes da malha do modelo;

c) Contornos correspondentes a superfícies freáticas no protótipo constituem limites (inicialmente estabelecidos teoricamente e corrigidos iterativamente durante os ensaios) assinalados por uma variação do potencial (sem alimentação de corrente externa forçada) proporcional ao potencial hidráulico previsto (função da cota do ponto);

d) Contornos correspondentes a emergências livres no protótipo constituem limites assinalados por uma variação do potencial elétrico (nesse caso, com auxílio de alimentação externa forçada), proporcional ao potencial hidráulico previsto (função da cota do ponto) (figura 3).

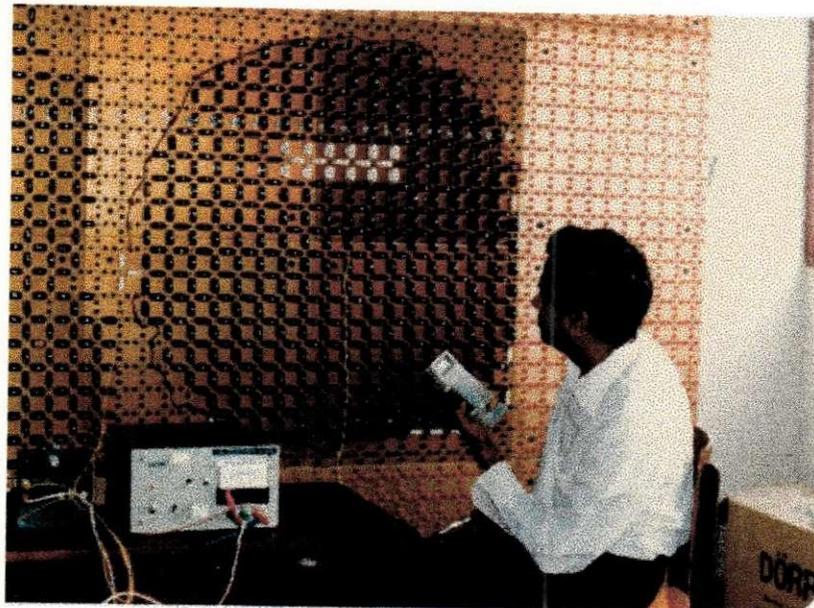


Figura 01 – Aspecto do Painel Electroanalógico

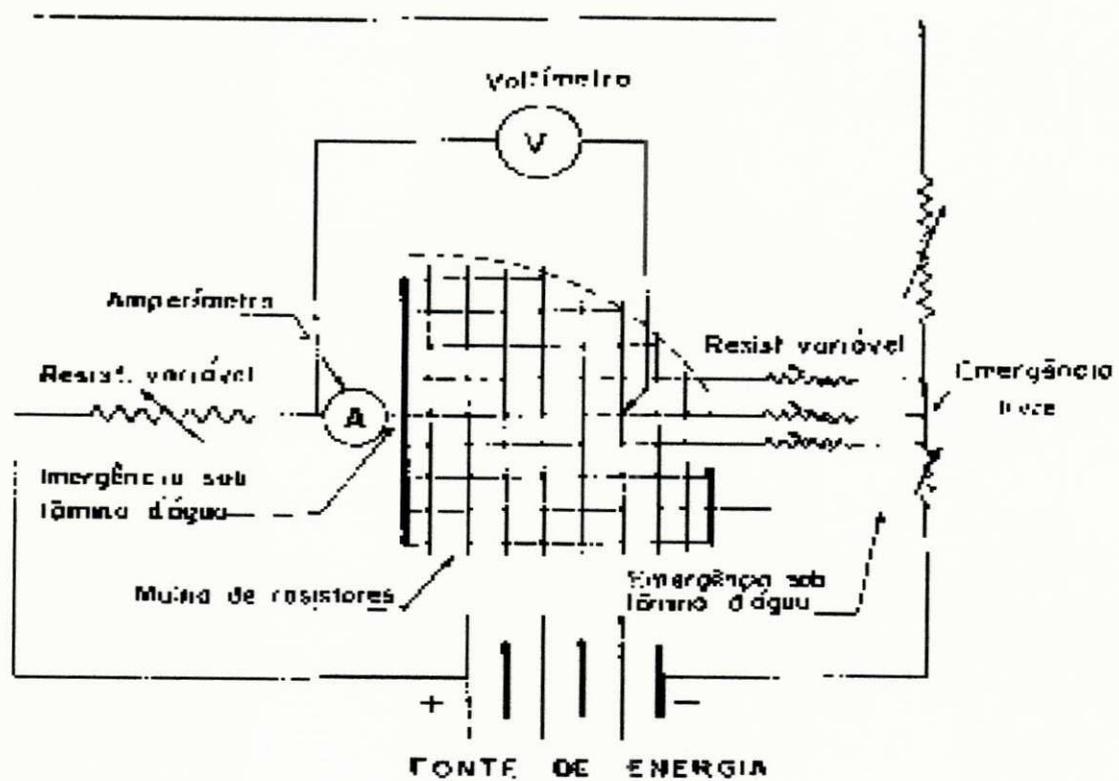
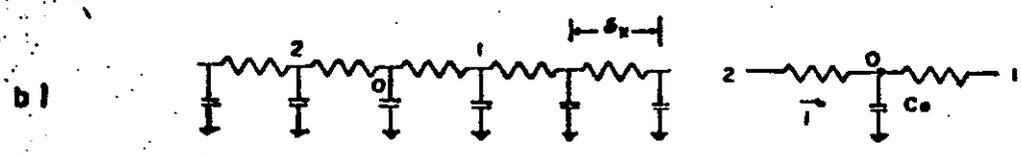
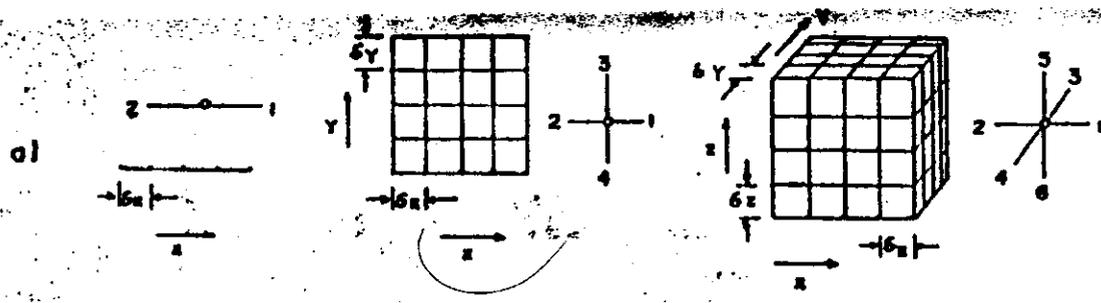
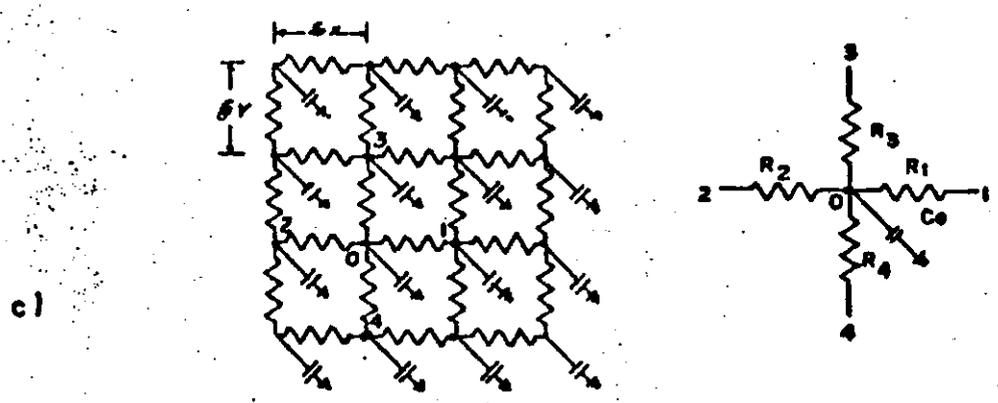


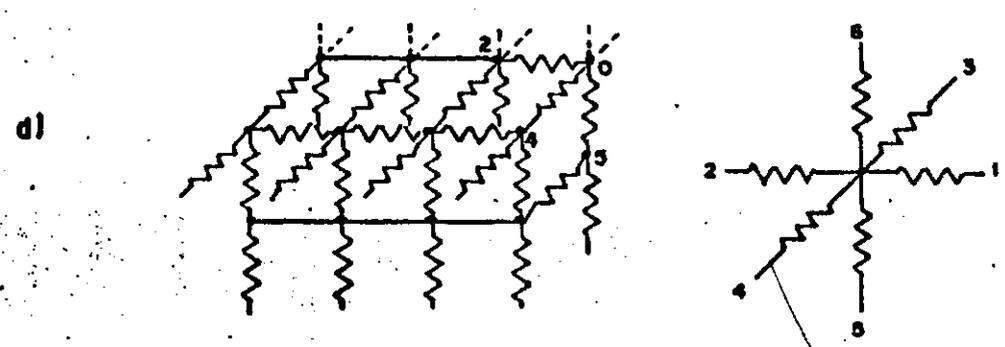
Figura 03 – Circuito Elétrico Completo Para o Estudo de Barragens



**CIRCUITO UNIDIMENSIONAL RESISTIVO-CAPACITIVO**



**CIRCUITO BIDIMENSIONAL RESISTIVO-CAPACITIVO**



**CIRCUITO TRIDIMENSIONAL RESISTIVO**

**Figura 02 – Subsistemas Elementares Uni. Bi. e Tridimensionais do Protótipo (a) e Células R-C e R Correspondentes : (b), (c), (d).**

## **4.2 APARELHAGEM ELETRÔNICA UTILIZADA**

O problema de cada modelo consiste em determinar o valor de corrente total que passa através da malha e os valores dos potenciais (tensões) nos pontos em que se tem interesse. A corrente total é medida através de amperímetros e as tensões por meio de voltímetros.

Muitas vezes se quer o valor do potencial em pontos onde não é possível medi-lo devido à discretização do meio elétrico. Para obter este valor, mede-se então os potenciais vizinhos e interpola-se o valor no ponto desejado.

O laboratório utilizado dispunha dos seguintes aparelhos, voltados para as simulações com modelo eletroanalógico:

1 - 2 (duas) fontes de corrente contínua, sendo uma de marca APEL de especificação CC-AP30 com capacidade de até 20 volts e 2 ampères. A segunda foi de marca OLTRONIX de especificação D 400 - 007 D com capacidade de até 400 volts e 2 ampères.

2 - 2 (dois) multímetros digitais para medição de correntes, resistências e tensões. Os dois aparelhos foram: um multímetro marca FLUKE de especificação 8022A e outro de marca KEITHLEY especificação 130.

Todos os resistores usados nos modelos foram selecionados dentro de uma faixa de variação de erro de mais ou menos 5%, sendo este fator muito importante para a precisão dos resultados.

## **5.0 ESTUDO DE CASO - Influência de Barreiras Impermeáveis na Produtividade de Poços**

### **5.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES**

As equações de Thiem e Dupuit-Thiem para aquíferos confinados e livres, respectivamente, em regime permanente e as equações do regime não equilibrado de Thies, são deduzidas com a suposição de que os aquíferos têm extensão infinita, o que realmente não acontece na natureza. Com efeito, acidentes geológicos e morfológicos de natureza variada, limitam os aquíferos reais, causando distorções nos cones de depressão no círculo de influência dos poços de bombeamento.

O caso discutido neste item se refere a condição de regime permanente de aquíferos confinados com formações impermeáveis as quais tendem a reduzir a produção líquida, comparada com a do aquífero homogêneo. A eficácia do sistema é mostrada comparando-se casos com barreiras impermeáveis de formas regulares no aquífero contribuinte e outros casos, incluindo o caso de uma barreira radial com uma extremidade tangente ao círculo de influência.

## 5.2 - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Thiem (1906) foi um dos primeiros pesquisadores a utilizar dois ou mais piezômetros para determinar a condutividade hidráulica de um aquífero. Ele mostrou que para as seguintes condições:

- aquífero com área praticamente infinita;
- aquífero homogêneo, isotrópico e de espessura constante em toda a área de influência, confinado;
- bombeamento com taxa constante
- poço com penetração completa no aquífero recebendo fluxo horizontal em todo o seu contato com o mesmo;
- antes do bombeamento, a superfície piezométrica permanece horizontal no aquífero;

$$Q = \frac{2\pi D(h_2 - h_1)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

10

a descarga pode ser expressa pela equação abaixo:

onde :

Q - descarga do poço ( $L^3T^{-1}$ )

KD - transmissividade do aquífero ( $L^2T^{-1}$ )

$r_1$  e  $r_2$  - respectivas distâncias dos piezômetros ao poço (L)

$h_1$  e  $h_2$  - respectivas elevações nível d'água nos piezômetros (L)

Constrói-se com dados de um teste de bombeamento curvas de rebaixamento-tempo para cada piezômetro, nota-se que depois de decorrido um determinado tempo, as curvas dos

diferentes piezômetros permanecem paralelas. Significa que o gradiente está constante e que o fluxo no aquífero pode ser considerado como permanente. Assim, é possível aplicar a equação 10, com razoável precisão.

A presença de fronteiras impermeáveis nos aquíferos invalidam a aplicação da equação 10. Utiliza-se, então o chamado método das imagens virtuais para calcular a influência de tais limites dos aquíferos, no escoamento para os poços. No caso particular de uma barreira impermeável limitando a extensão horizontal de um aquífero, este efeito pode ser simulado pela colocação de um poço imagem no lado oposto à barreira à mesma distância que existe entre o poço e a barreira. O poço imagem (figura 4) neste caso deverá "retirar" do aquífero uma descarga igual a vazão do poço real.

Uma fronteira impermeável influi na descarga de um poço por retardamento ou parada da expansão do cone de depressão. Assim, as variações na inclinação da curva de rebaixamento indicam a presença de limites. A análise de tais variações a partir de poços de observação múltiplas, também permite a localização de contornos impermeáveis.

### **5.3 - A SIMULAÇÃO DO AQUÍFERO**

A malha da figura 4a representa um aquífero confinado homogêneo e isotrópico com raio de influência  $r_i$ , bombeando com um taxa de  $Q$ , enquanto as figuras 5b, 5c e 5d mostram o aquífero com barreiras impermeáveis a  $1/6R$ ,  $1/2R$  e  $5/6R$  do centro, com largura de  $R/6$  e comprimento de  $2/3R$ .

A figura 5e é um caso singular com barreira radial com mesma geometria mas com extremidade tangenciando a periferia. Embora condições não permanentes possam ser estudadas com a mesma malha, os casos aqui discutidos são com condições permanentes com malha de 5cm x 5cm, com resistores de 51 ohms que representam uma área de 5m x 5m no campo. A correspondência entre a vazão  $Q$ , a carga hidráulica  $H$  e permeabilidade  $K$  e a corrente elétrica  $I$ , potencial  $V$  e inverso da resistência  $1/R$  foi feita e os seguintes valores adotados:

Fator de escala de potencial = 5,71V/6m

Resistores usados = 51 ohm

Malha = 5cm x 5cm no modelo = 5m x 5m no campo

Tensão na periferia = 5,71 V = Carga na periferia = 6m

Tensão no centro = 3,43V = 3,6m (60% do valor da periferia)

Valor dos capacitores = 10microF

Número de nós sem barreiras = 144

Número de nós com barreiras = 140

Comprimento da barreira = 20 cm (modelo) = 20 m(campo)

Largura da barreira = 5 cm (modelo) = 5 m (campo)

Máxima corrente obtida no aquífero homogêneo = 84,2 mA, correspondente a vazão

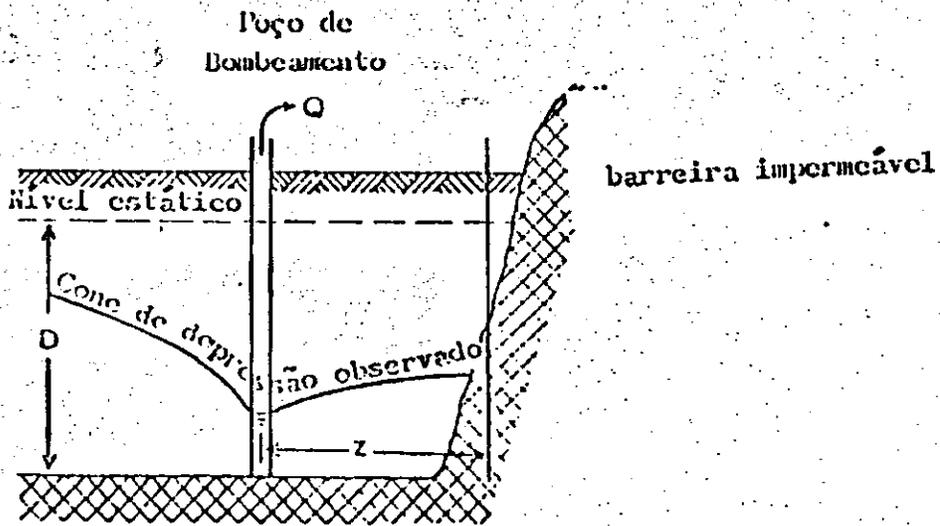
$Q_h$ .

#### **5.4 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

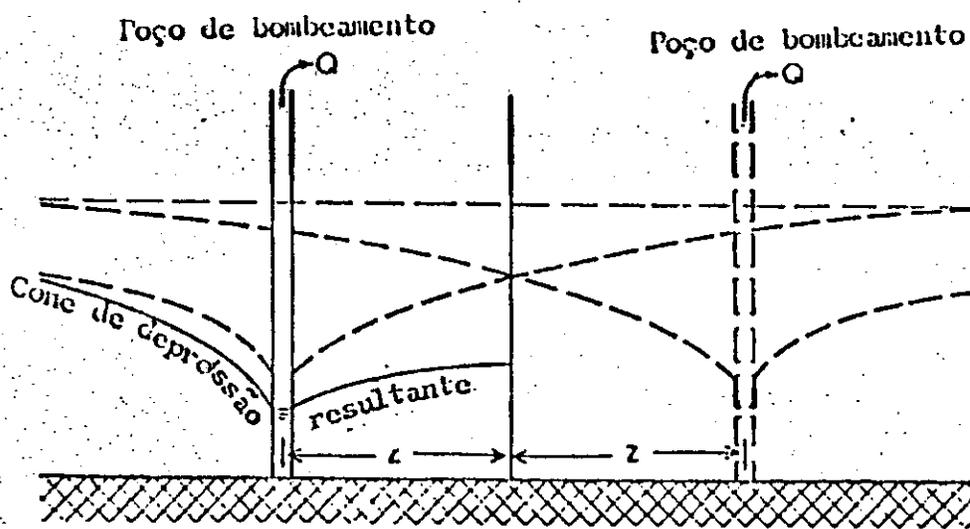
Os resultados obtidos do modelo RC nos ensaios com e sem barreiras estão apresentados na tabela 1.

Para fins de comparação, o rebaixamento no poço foi conservado constante a 5,71 - 3,43 = 2,28V o qual corresponde uma carga hidráulica de 6,0-3,6 = 2,4m. A vazão para este rebaixamento foi calculada para cada um dos casos considerados (figura 5a - e)

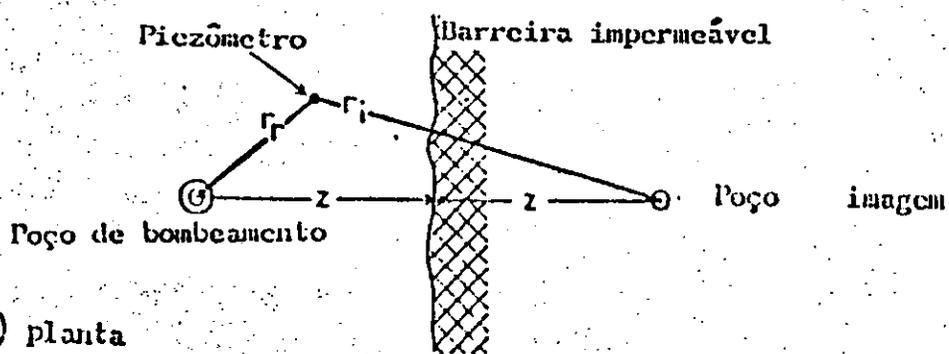
Observa-se na tabela 1 que a vazão máxima conseguida foi  $Q_h$  no caso do aquífero homogêneo. Nos demais casos (figura 5 b - e) a vazão foi diminuindo ao se colocar a barreira hidráulica, nas diversas posições ao longo do aquífero, sendo que a R/6 do centro a redução na vazão foi máxima atingindo um valor de 33,3% da vazão original deixando uma vazão de apenas 0,667  $Q_h$ . No entanto, aumentando-se a distância da barreira ao centro de R/6 a R/2 e a (5R/6) do centro, a produção variou para valores correspondentes a 90,7% e 91,7% do valor original. Dessa forma, a posição e a orientação das barreiras influenciaram consideravelmente na produtividade do poço. No caso da barreira radial com mesma geometria das demais com extremidade tangenciando a periferia, observou-se que esta não provoca praticamente nenhuma redução no rendimento do poço, diminuindo somente 4,4% do valor original  $Q_h$ . Portanto, as barreiras transversais à direção radial na área de influência do poço provocam maiores reduções na produção do que a barreira radial com mesma geometria.



a) Seção transversal real



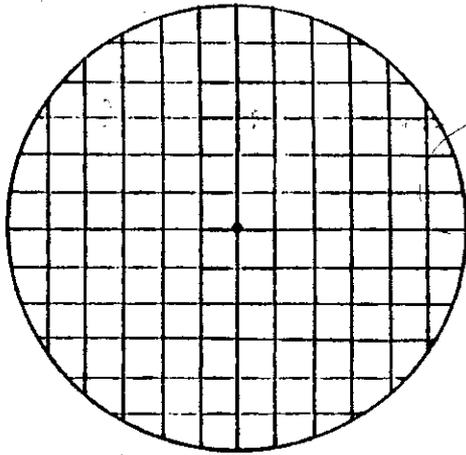
b) Seção transversal do Sistema substituto



c) planta

Figura 04 – Seção transversal esquemática e planta de um aquífero (a) e (c). sistema equivalente com um poço imagem (b)

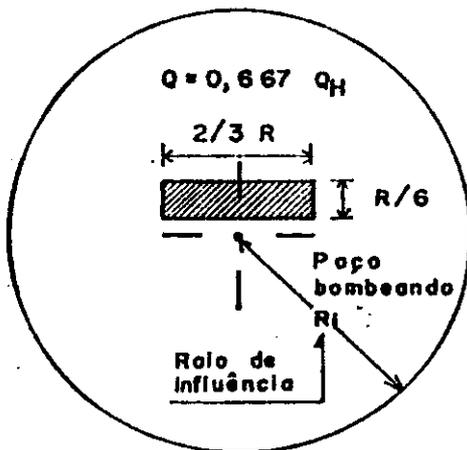
a) POÇO EM AQUIFERO HOMOGÊNEO



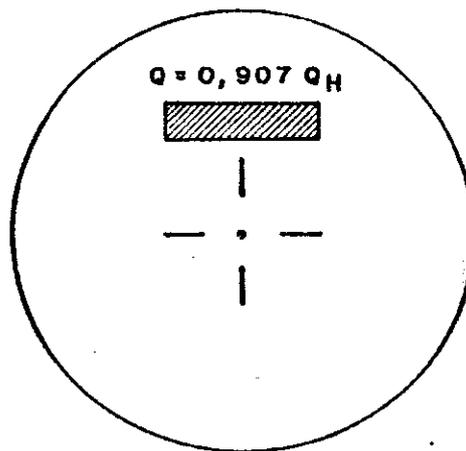
Vazão

$$Q_H = Q_{\text{HOMOGÊNEO}}$$

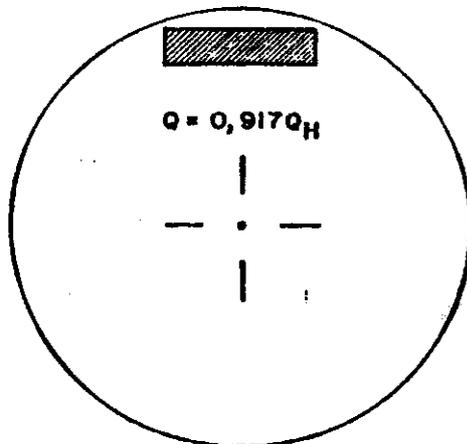
b) BARREIRA A  $R/6$



c) BARREIRA A  $R/2$



d) BARREIRA A  $5/6 R$



e) BARREIRA NA DIREÇÃO RADIAL

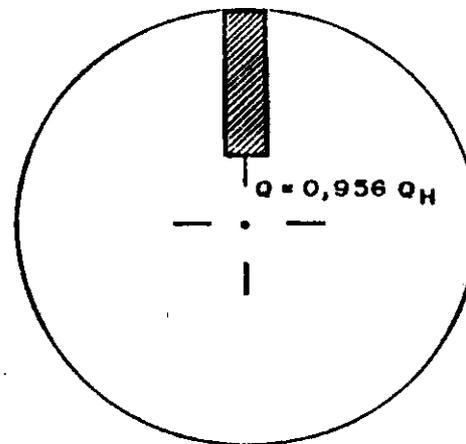


Figura 05 – Esquema Para Estudo da Variação da Vazão com Diversas Posições da Barreira Impermeável

Característica	Aquífero	Barreira A Distância X Do Centro			Barreira
	Homogêneo	X = R/6	X = R/2	X = 5R/6	Radial
Vazão em m <sup>3</sup> /h	Q <sub>h</sub>	0,667Q <sub>h</sub>	0,907Q <sub>h</sub>	0,917Q <sub>h</sub>	0,956Q <sub>h</sub>
Tensão Periférica, V	5,71	5,71	5,71	5,71	5,71
Tensão Central - 0,6V	3,43	3,43	3,43	3,43	3,43
Carga Hidr. – Perif. (m)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Carga H. – Centro (m)	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Corrente no Centro, mA	84,2	56,2	76,4	77,2	80,5

**Tabela 1 - Características de Fluxo Hidráulico e do Fluxo Elétrico do Modelo**

## 6.0 CONCLUSÃO

Os modelos eletroanalógicos se apresentaram como uma boa ferramenta para analisar os sistemas bidimensionais, na simulação de poços de bombeamento. Facultando a sua utilização para previsão de mudanças de níveis freáticos em aquíferos reais.

Com relação às barreiras hidráulicas impermeáveis nos aquíferos confinados, observou-se a resposta hidráulica ao bombeamento para várias posições e orientações. Para barreira colocada mais próxima do poço reduziu a vazão em mais de 33% da vazão para aquífero homogêneo, na posição mais afastada considerada a vazão conservou-se em 91,7% do valor original, mostrando a necessidade de se evitar barreiras no campo de produção, através do conhecimento geológico da região, para fim de se obter um melhor rendimento para os poços.

Concluimos, enfatizando o fato que para algumas aplicações esse modelo é bastante recomendado, concordando de maneira satisfatória com os valores teóricos para dados no campo. No entanto, faz mister colocar que para algumas situações esse modelo deve ser aplicado com cautela, devido a limitações inerente ao modelo. Dentre essas limitações, obtenção de valores de resistências e capacitores apropriados, simulação da forma geométrica da região estudada no campo, variações bruscas das permeabilidade no interior dos aquíferos, incorporação precisa de barreiras impermeáveis e de valores de recarga.

## **BIBLIOGRAFIA**

- BEAR**, J. et ali, Physical Principles ..., UNESCO 1968, p. 465.
- BOWVER**, H., Theory of Seepage from Open Channels, in Advances in Hydroscience; ed. Por V. T. Chow, Academic Press. New York, 1969 - pp 121 - 171.
- FRANCISS, F.O.**, Hidráulica de Meios Permeáveis. Ed. Interciência. São Paulo. 1980 – p.169.
- MOURA**, P.G.T., Efeitos de Fronteiras Sobre a Vazão em Aquíferos Livres. Tese de Mestrado. UFPB - CCT, Campina Grande PB-Brasil, 1983, pg. 69.
- SILVA**, T. C da, Estudo de Problemas de Percolação e Drenagem em estruturas Hidráulicas Utilizando Modelos Eletroanalógicos dos Tipos R e RC. Tese de Mestrado UFPB/CAMPUS-II. Campina Grande - Brasil - 1986. pp 20 - 45.
- VARGAS**, Jr. E. do A., Estudo e Aplicações de um Modelo Eletroanalógico Simples à Problemas Práticos de Fluxo em Meios Porosos. Tese de Mestrado. PUC - Rio de Janeiro - RJ. Brasil - 1975