

# PIEZOSYS: SISTEMA DE MONITORAMENTO DE BACIAS DE REJEITO EM TEMPO REAL<sup>1</sup>

*Leonardo Geraldo Megre Timóteo<sup>2</sup>  
Itamar Daniel Delbem<sup>3</sup>  
Carlos Roberto Pereira Garcia<sup>4</sup>  
Roberto Galery<sup>5</sup>*

## **Resumo**

O presente trabalho apresenta uma ferramenta para o gerenciamento de barragens de rejeito. O PiezoSys é na realidade um sistema de controle em tempo real de níveis piezométricos. Esse sistema pode informar as variações espaciais da poropressão em torno das dessas estruturas. O sistema composto por sensores piezométricos, módulos de aquisição de dados e rádios para transmissão remota a longa distância, constitui, juntamente com o software de monitoramento de dados um sistema confiável para o gerenciamento da dinâmica operacional, de segurança e riscos de bacias de rejeito.

**Palavras-chave:** Bacias de rejeito; Piezômetro; Poropressão; PiezoSys.

## **PIEZOSYS: REAL TIME MENAGEMENT SYSTEM FOR TAILINGS DAMS**

### **Abstract**

This paper presents a tool for the management of tailings dams. The PiezoSys is actually a real time control system for piezometric data levels. This system can provide information about the spatial porepressure variations around these structures. The system integrates piezometric sensors, data acquisition modules and remote radios for long distance data transmitions. Together with a software for data handling it can be considered a reliable system for the management of the operating dynamics, safety and risk of tailings dams.

**Key words:** Tailing dams; Piezometer; Pore pressure; PiezoSys.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.*

<sup>2</sup> *Mestrando, DEMIN/CPGEM/UFMG (lmegre@hotmail.com)*

<sup>3</sup> *Mestrando, DEMIN/CPGEM/UFMG (danieldelbem@yahoo.com.br)*

<sup>4</sup> *Analista de Sistemas, Bacharel, TEC++ (carlosrpereira@gmail.com)*

<sup>5</sup> *Professor Associado II, Doutor, DEMIN/UFMG (rgalery@demin.ufmg.br)*

## **1 INTRODUÇÃO**

Os minérios são fontes de matérias primas empregadas na produção de metais nobres. A demanda crescente por bens minerais tem levado à exaustão de inúmeras jazidas como resultado de décadas de produção ininterrupta. O caráter insubstituível dos bens minerais tem pressionado tanto a busca por novas jazidas como apressado os trabalhos de pesquisa para a definição de áreas já conhecidas e consideradas potencialmente promissoras. A cada dia, a pressão da demanda esmagadora por bens minerais impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias. As inovações tecnológicas são integradas, de imediato, aos processos produtivos para o aproveitamento de matérias primas que anteriormente não eram processadas em função da sua qualidade ou teor. O resultado de todo esse processo é que nos empreendimentos de mineração emergentes é necessário extrair, movimentar e processar quantidades cada vez maiores de matéria prima mineral e de qualidade inferior. Esse processo resulta, também, na geração de grandes volumes de rejeitos que devem ser acondicionados ou armazenados de forma adequada.

Neste contexto, o termo rejeito não deve ser confundido com estéril, uma vez que o estéril não é submetido ao processo de beneficiamento mineral. Os rejeitos da mineração podem ser descritos como a fração do minério destituída de mineral útil ou de valor econômico originada do processo de beneficiamento mineral, ou melhor, originado no processo de concentração do minério lavrado. É aquele produto predominantemente formado por material sem valor econômico que deve ser descartado, adequadamente, na forma de sólidos ou polpa (rejeito + água).

As barragens de rejeito são estruturas projetadas e utilizadas pelas minerações para o descarte de rejeitos. Elas possivelmente são as maiores estruturas construídas pelo homem. Elas alteram permanentemente a topografia do local a onde são construídas. Diferentemente das represas de água elas não podem ser desmobilizadas ao final da sua vida útil. Ao contrário, são estruturas que irão permanecer ativas e monitoradas por anos ou mesmo séculos. Quando gerenciadas de forma inadequada, podem provocar impactos ao meio ambiente uma vez que as barragens estão sujeitas às mesmas forças naturais que provocam enchentes, inundações, erosões e alterações topográficas nos seus arredores. Em função da área ocupada e do dano potencial de longo prazo que podem provocar ao meio ambiente, a seleção do local adequado, do método de construção, operação e controle de barragens de rejeito são fatores muito importantes no gerenciamento dessas estruturas.

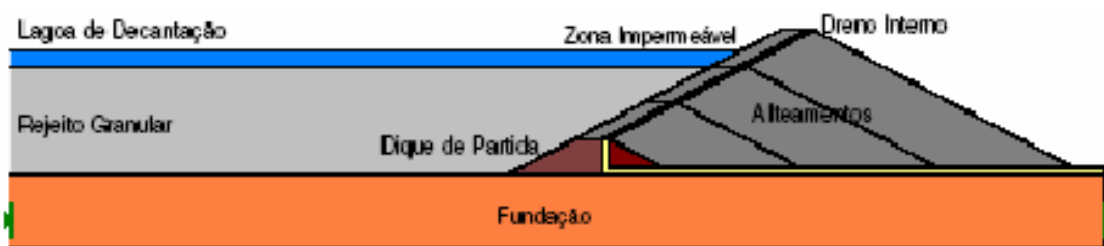
## **2 TIPOS DE BARRAGENS DE REJEITO**

As barragens de rejeito podem ser construídas com material compactado proveniente de áreas de empréstimo, ou com o próprio rejeito.<sup>(1)</sup> Esse rejeito é constituído por partículas de granulometria grosseira resultante do processo de classificação por ciclone. As barragens de rejeito podem ser classificadas de acordo com um dos três métodos construtivos apresentados na Figura 1: o

método de montante, Figura 1a, método de jusante, Figura 1b e o método de linha de centro, Figura 1c.



(a)



(b)



(c)

**Figura 1:** Métodos construtivos a) de Montante; b) de Jusante; c) Linha de centro

O método de construção de montante é o mais antigo, simples e econômico.<sup>(1)</sup> A etapa inicial de execução deste tipo de barragem consiste na construção de um dique de partida, normalmente de material argiloso ou enrocamento compactado. O rejeito é lançado por canhões em direção a montante da linha de simetria do dique (Figura 1a), formando assim a praia de deposição, que se tornará a fundação e eventualmente fornecerá material de construção para o próximo alteamento. Este processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida. O método de montante para alteamento de barragens de rejeito é o mais econômico a curto prazo, pois permite obter a menor relação entre volumes de areia/lama. Embora seja o mais utilizado pela maioria das minerações, o método de montante apresenta um baixo controle construtivo tornando-se crítico principalmente em relação à segurança. O agravante neste caso está ligado ao fato dos alteamentos serem realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Assim, sob condições saturadas e estado de compactação fofo, estes rejeitos granulares tendem a apresentar baixa

resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação por carregamentos dinâmicos e estáticos. Cabe lembrar que com esse método construtivo existe uma dificuldade na implantação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível d'água dentro da barragem, constituindo um problema adicional com reflexos na estabilidade dessas estruturas.

No método de jusante, a etapa inicial consiste na construção de um dique de partida, normalmente de solo ou enrocamento compactado. Depois de realizada esta etapa, os alteamentos subseqüentes são realizados para jusante do dique de partida. Este processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida. As vantagens envolvidas no processo de alteamento para jusante consistem no controle do lançamento e da compactação, de acordo com técnicas convencionais de construção; nenhuma parte da barragem ou do alteamento é construída sobre o rejeito depositado; além disso, os sistemas de drenagem interna podem ser instalados durante a construção da barragem, e prolongados durante seu alteamento, permitindo o controle da linha de saturação na estrutura da barragem e então aumentando sua estabilidade; a barragem pode ser projetada e subseqüentemente construída apresentando a resistência necessária ou requerida, inclusive resistir a qualquer tipo de forças sísmicas, desde que projetadas para tal, já que há a possibilidade de seguimento integral das especificações de projeto. Barragens alteadas pelo método de jusante necessitam maiores volumes de material (maior relação areia/lama), apresentando maiores custos associados ao processo de ciclonagem ou ao empréstimo de material. Além disto, com este método, a área ocupada pelo sistema de contenção de rejeitos é muito maior, devido ao progresso da estrutura para jusante em função do acréscimo da altura. Como dito anteriormente, esse método garante maior estabilidade do corpo da barragem, pois a compactação pode ser adequada à medida que a barragem sofre os sucessivos alteamentos.

O método de linha de centro é uma solução intermediária entre os dois métodos citados anteriormente. Apresenta as vantagens dos dois métodos anteriores e minimiza suas desvantagens. Apesar disso, seu comportamento geotécnico se assemelha mais a barragens alteadas para jusante, constituindo uma variação deste método. O alteamento da crista é realizado de forma vertical, sendo o eixo vertical dos alteamentos coincidente com o eixo do dique de partida. Neste método torna-se possível a utilização de zonas de drenagem internas em todas as fases de alteamento, o que possibilita o controle da linha de saturação. Este controle promove uma dissipação de poropressões tornando o método apropriado para utilização inclusive em áreas de alta sismicidade. Como grande vantagem deste método em relação ao de jusante, pode-se destacar a necessidade de um menor volume de material compactado para construção do corpo da barragem, mas esse tipo de estrutura pode apresentar ângulos muito inclinados na face de montante. Se a parte superior do talude perde eventualmente o confinamento, podem aparecer fissuras, causando problemas de erosão, e aumento de poropressão.

Barragens alteadas pelo método de jusante e pelo método de linha de centro geralmente são construídas com o uso de ciclones, do qual o material de granulometria mais grosseira, o underflow, é utilizado para o alteamento do dique

de contenção e os finos, constituídos pelo overflow dos ciclones, são depositados atrás do dique. As deposições se dão através do processo de aterro hidráulico.

A utilização da técnica do aterro hidráulico aplicado ao método de montante proporciona uma redução de custos de construção pela facilidade na execução de barragens, sendo assim, o método mais atrativo utilizado pelas minerações. Entretanto, problemas construtivos e de segurança podem ocorrer, principalmente devido à falta de controle das características do rejeito e das variáveis de descarga durante o lançamento. Dessa forma, aumenta-se a necessidade de estudos mais detalhados das propriedades do rejeito de modo a reduzir as incertezas geradas quanto às características do aterro formado com a sua utilização.<sup>(2)</sup>

### **3 GERENCIAMENTO E CONTROLE DE BACIAS DE REJEITO**

O regime de poropressão observado em bacias de rejeito ou em qualquer barragem de enrocamento tem significativa importância na estabilidade dessas estruturas complexas. Piezômetros instalados em diferentes secções da barragem são normalmente utilizados para monitorar a poropressão nas proximidades da parede externa da barragem. Dados piezométricos são registrados mensalmente para serem utilizados em análises de estabilidade. Uma vez realizada a análise de estabilidade da situação básica da barragem, análises posteriores somente são realizadas caso haja mudanças significativas nos valores piezométricos registrados. Esse método de monitoramento e controle aplicado as barragens de rejeito tem-se mostrado inadequados e alguns estudos tem mostrado e enfatizado esses fatos.<sup>(3,4)</sup>

#### **3.1 Piezômetros de Tubo Aberto**

Os sensores de poropressão podem ser agrupados em duas categorias: aqueles que apresentam um diafragma entre o transdutor e um sistema poroso (pneumático, de corda vibrante, de capacitância ou *strain gauges*) e aqueles sem diafragma (piezômetros individuais abertos de tubo duplo ou simples). Dessa forma, os piezômetros são estruturas instaladas para monitorar a presença do nível de água intersticial através de células de poropressão ou sensores de poropressão. No Brasil, piezômetros de tubo aberto são utilizados para análise do regime de fluxo de água em bacias de rejeito. A convenção para a construção de piezômetros de tubo aberto é a selagem do elemento filtrante de forma que os instrumentos respondam somente a pressão da água de sub-superfície em torno do elemento filtrante e não as flutuações relacionadas a outras alterações nas vizinhanças. O nível d'água na tubulação estabiliza na elevação piezométrica e é determinado, então, pelos sensores (ex.: pio elétrico). Esses piezômetros de tubo aberto foram denominados de piezômetros de Casagrande depois da publicação dos dados de monitoramento da água de poros durante a construção do Aeroporto Logan em Boston, por Casagrande em 1949 e 1958.<sup>(4)</sup>

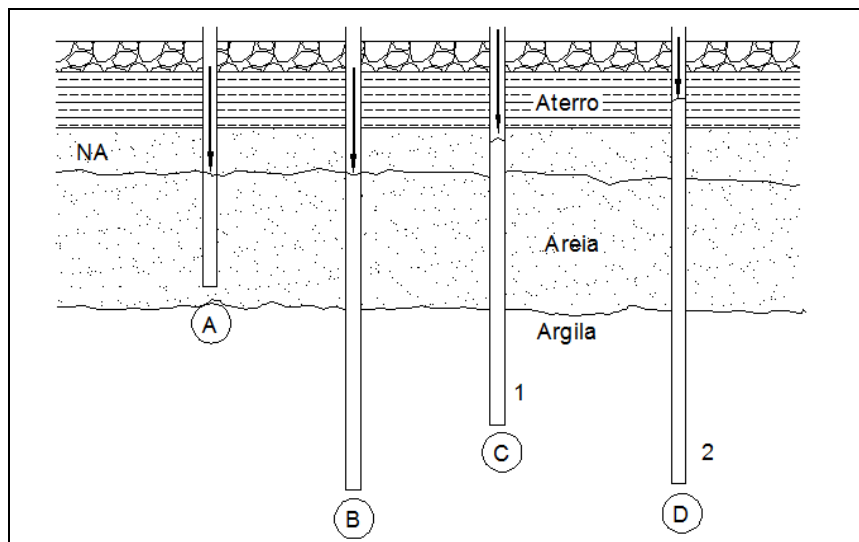
Os piezômetros de Casagrande quando corretamente instalados apresentam as seguintes vantagens e limitações descritas abaixo.

**Vantagens:** durabilidade e confiabilidade no registro de dados; a integridade da selagem pode ser monitorada; pode ser utilizado para amostragem da água; pode ser utilizado para medir indiretamente a permeabilidade das rochas circunvizinhas.

**Limitações:** a resposta pode ser lenta a variações do nível d'água em função da permeabilidade das rochas circunvizinhas; o filtro poroso pode apresentar problemas de cegamento ou entupimento devido a variações de fluxo de água que entra e sai pelos poros.

### 3.2 Nível Piezométrico

O nível freático ou hidrostático é definido como a superfície superior de um corpo d'água subterrâneo na qual a pressão corresponde à atmosférica.<sup>(5)</sup> A suposição de que o nível d'água no piezômetro de Casagrande representa o nível freático ou hidrostático é enganosa. O nível do piezômetro de Casagrande só irá representar o nível hidrostático se a parte porosa do piezômetro estiver em contato direto com toda a camada perfurada pelo tubo, como apresentado esquematicamente na Figura 2. Nessa figura, os tubos perfurados, tipo *standpipes*, se encontra em contato direto com o trecho perfurado dos tubos. O tubo (B) é poroso ao longo de toda a sua extensão, enquanto os outros tubos apresentam porosidade apenas no trecho inferior. Por causa da alta permeabilidade da areia, o excesso de poropressão nesse material se dissipa quase que imediatamente e deixa de existir. O tubo (A) indica o nível freático. Os tubos (C) e (D) indicam as poropressões na camada de argila, nos locais (1) e (2). O nível d'água no tubo (C) é mais baixo que no tubo (D) por causa da maior dissipação da poropressão no nível (1), em relação ao nível (2), devido à maior proximidade da camada superior de areia, que auxilia na dissipação das poropressões. No caso ilustrado nessa figura, o tubo (B) provavelmente está indicando o nível freático, porque a permeabilidade da areia é substancialmente maior que a da argila, de tal maneira que a poropressão excedente na argila provoque um fluxo ascendente de água da argila para a areia, através da tubulação do instrumento. Dessa forma, o fluxo dissipasse rapidamente.



**Figura 2:** representação esquemática de nível freático e poropressão.

Verifica-se, desse modo, que a instalação de uma tubulação porosa perfurada através de duas camadas, mesmo que protegidas por uma camada de areia em toda a extensão da tubulação criará uma conexão vertical indesejável entre essas duas camadas e o nível d'água no interior do tubo indicará usualmente um valor errôneo. O tubo (B) é normalmente designado de *poço de observação* ou *medidor de nível d'água*, enquanto que os tubos (C) e (D) indicam poropressões, e sua dissipação dentro da camada de areia ou argila, sendo designados de *piezômetros*.

Normalmente as poropressões registradas abaixo do nível d'água são positivas e, como mostrado na Figura 2, as mesmas podem aumentar em um solo, pela aplicação de esforços de compressão à camada em análise. No exemplo em questão, a colocação de um aterro sobre uma camada de argila ou a construção de uma barragem, pode provocar aumentos significativos de poropressão na fundação. As poropressões podem também aumentar quando pressões cisalhantes são aplicadas a um solo fofo. Nesse caso as deformações cisalhantes tendem a provocar a redução de volume. Quando os poros do solo estão cheios de água, tende a ocorrer uma elevação da poropressão. Como um exemplo prático, pode-se considerar uma ruptura pela fundação de um aterro sobre solo fofo de origem aluvionar. O material sob o pé do aterro é submetido ao esforço de cisalhamento enquanto o aterro é construído, além de sofrer um incremento das poropressões, decorrentes do adensamento do solo pelo peso das camadas subjacentes. Os esforços cisalhantes causam a deformação do solo, o aumento das poropressões e a redução da resistência, aumentando dessa forma a tendência de ruptura.

As poropressões podem ser também negativas, quando são inferiores à pressão atmosférica. Podem, em alguns casos, ser provocadas pela remoção dos esforços que comprimiam uma camada de solo. Por exemplo, quando uma escavação é realizada em argila, o solo abaixo da base da escavação é descarregado, causando um início de redução das poropressões que podem se tornar negativas. As poropressões podem também decrescer quando esforços

cisalhantes são aplicados ao solo, cujo esqueleto esta em estado bastante adensado. Por exemplo, considerando a escavação de um talude em argila sobreconsolidada. As poropressões diminuem como consequência do descarregamento, mas reduções significativas adicionais podem ser causadas pelo desenvolvimento de esforços letarais de cisalhamento. Essas forças cisalhantes causam deformações, uma redução temporária de poropressão e o aumento temporário da resistência.

Dessa forma, pode-se avaliar a importância de se instalar piezômetros em posições estratégicas nas barragens de rejeito para monitoramento da poropressão. O correto monitoramento da poropressão é importante, pois reflete diretamente toda a dinâmica dos processos envolvidos com a segurança das barragens de rejeito.

#### **4 PIEZOSYS: SISTEMA DE MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO**

O PiezoSys é um sistema destinado ao monitoramento em tempo real dos níveis piezométricos em barragens de rejeito. Esse sistema é constituído por sensores de poropressão, módulos de aquisição, rádios transmissores, software específico para tratamento dos dados e painéis solares para a geração de energia elétrica necessária para o funcionamento dos equipamentos no campo. Na seqüência será descrito cada um dos componentes do PiezoSys.

##### **4.1. Sensores de Poropressão**

Este sensor de poropressão visualizado na Figura 3 é utilizado em piezometria de profundidade (até 75 mca) com precisão de 0,04% na leitura.



**Figura 3:** Sensor de poropressão.

Eles são do tipo diafragma. São precisos, de fácil instalação e reposição. Podem ser instalados permitindo o monitoramento estratégico em toda a estrutura de acordo com o projeto construtivo e de gerenciamento de segurança da barragem.



## 4.2 Módulo de Aquisição de Dados

Esses módulos são responsáveis pela aquisição dos dados obtidos pelos sensores de poropressão. O módulo de aquisição de dados, que pode ser visualizado a esquerda da imagem da Figura 4 transforma sinais analógicos em digitais e pode ter ligados a ele até sete sensores.



Figura 4: Módulo de aquisição de dados piezométricos.

## 4.3 Rádios Transmissores

São responsáveis pela transmissão dos dados entre o módulo de aquisição de dados e o “*software PiezoSys 2.0*”. Os rádios que estão conectados aos módulos no campo, são chamados de “cliente” e o rádio conectado ao computador é chamado de “*access point*”. Na Figura 04, podemos visualizar um rádio “cliente” que sem encontra a direita do módulo de aquisição de dados.

## 4.4 O Software para Tratamento dos Dados (“*PiezoSys 2.0*”)

O “*PiezoSys 2.0*” foi desenvolvido para tratar os dados provenientes dos módulos de aquisição no qual os sensores de poropressão estão ligados. Através desse software, é possível monitorar o nível piezométrico de barragens de rejeito em tempo real. Através de uma calibração realizada no “*PiezoSys 2.0*”, este transforma o sinal digital proveniente dos sensores em metros de coluna d’água ou em outra unidade conveniente. A apresentação desses dados pode ser mostrada graficamente, em tempo real. Esses dados temporais são armazenados e podem ser posteriormente agrupados na forma de relatório. Podem ser definidos para cada sensor, três níveis de alarmes, “atenção”, “alerta” e “emergência”. Quando qualquer um deles é atingido, uma tela de status do sistema é mostrada automaticamente ao usuário, registrando em um arquivo a hora em que o alarme foi disparado e a hora que o operador responsável ficou ciente. O “*PiezoSys 2.0*” também identifica e informa ao usuário através de mensagens específicas, qualquer problema relacionado ao funcionamento de cada sensor, como por exemplo, sensor danificado, sensore desconectado. A Figura 5 apresenta a tela principal e a tela de status do “*PiezoSys 2.0*”.

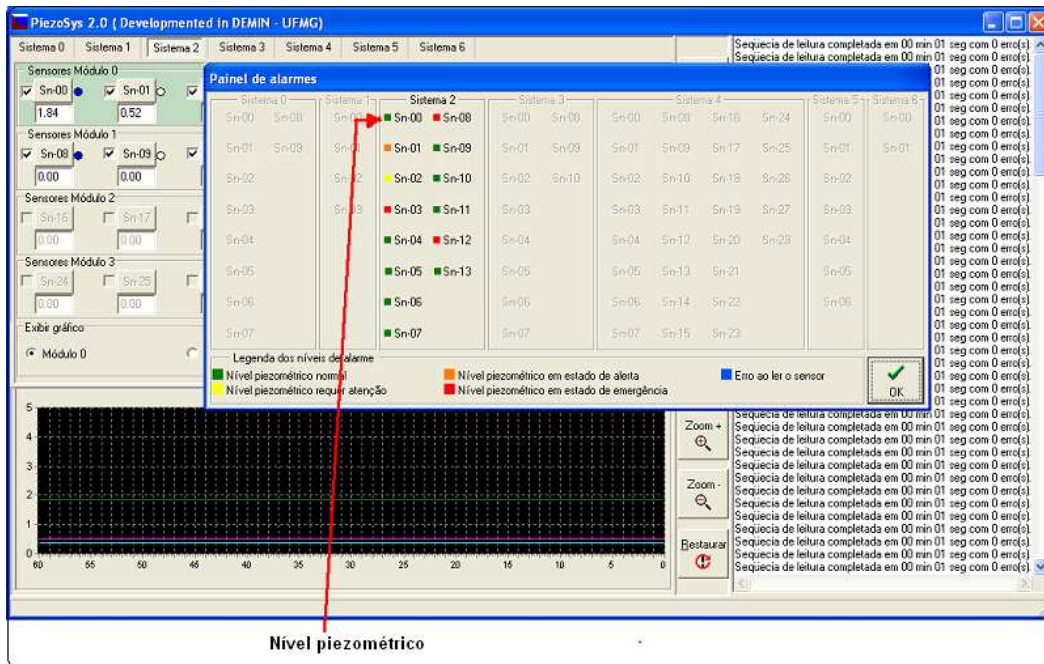


Figura 5: Tela principal e tela de status do “PiezoSys 2.0”.

#### 4.5 O sistema Integrado

Na Figura 6 está sendo demonstrada uma visão esquemática do sistema PiezoSys. Nesse esquema estão sendo apresentadas três barragens diferentes. Cada uma possui cinco sensores, um para cada piezômetro, um módulo de aquisição de dados, um rádio transmissor, uma bateria e um painel solar.

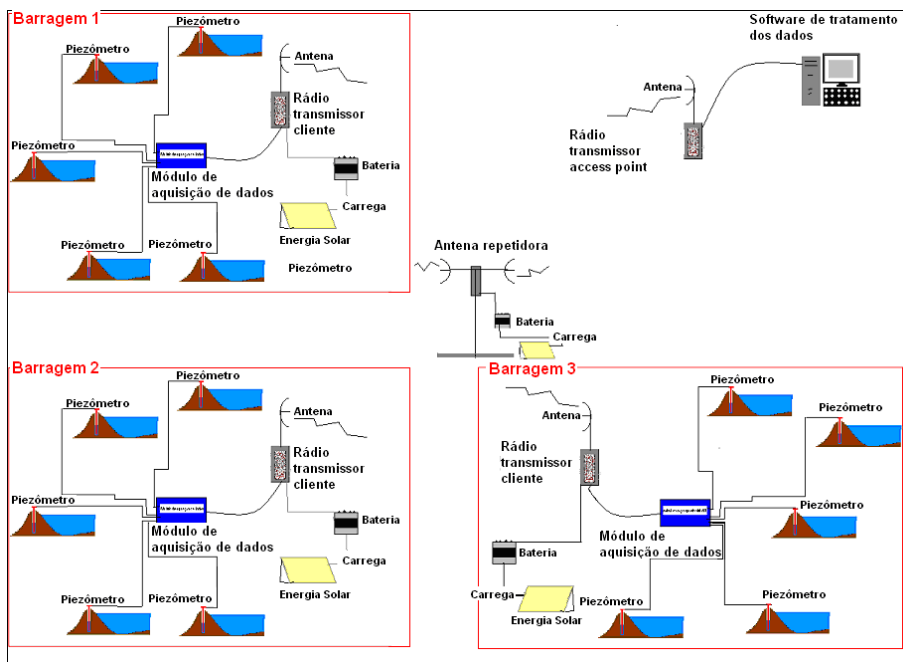


Figura 6: Esquema que representa o funcionamento do sistema PiezoSys.

O *software* instalado no computador, na sala de controle, solicita ao rádio "Access point" as leituras dos sensores. Esta solicitação é recebida pelos rádios "cliente" nas barragens de rejeito e enviadas aos módulos de aquisição de dados de cada barragem. Em seguida estes módulos retornam as leituras dos sensores para o computador.

O PiezoSys foi projetado para trabalhar integrado a outros equipamentos que possam vir a contribuir com informações adicionais importantes como, por exemplo, pluviômetros, dentre outros. Com pequenas modificações ele pode ser integrado banco de dados do tipo "PIMS".

## **5 CONCLUSÃO**

As barragens de rejeito são possivelmente as maiores estruturas projetadas e utilizadas para contenção de rejeitos construída pelo homem. Elas têm que permanecer ativas e monitoradas por anos ou mesmo séculos em função dos riscos ambientais que podem provocar. No presente trabalho foi apresentado um sistema para auxiliar o monitoramento da dinâmica operacional e segurança de barragens de rejeito. O sistema denominado PiezoSys, possibilita o monitoramento de níveis piezométricos de barragens de rejeitos podendo ser integrado a processos dinâmicos de simulação, das operações de mina, principalmente as ligadas diretamente ao de descarte de rejeitos. O sistema foi projetado para trabalhar em ambientes de difícil acesso, proporcionando comunicação de dados rápida e precisa. O PiezoSys em operação pode facilitar aos técnicos operadores uma tomada de decisão rápida e segura em caso de situações extremas.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 Araújo, C. B., Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro, COPPE/UFRJ, 2006, 136p.
- 2 Espódito, T. e Assis, A., Método Probabilístico Acoplado ao Método Observacional Aplicados a Barragens de Rejeito. In: 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental PP. 187-194.
- 3 Martin, T. E., Characterization of pore pressure conditions in upstream tailing dams, Proc. Tailing and Mine Waste, 1999, Balkemp, Roterdan, p.303-314.
- 4 Jeyapalan, J. K., Effects of fluid resistance in the mine waste dam-break problem, Int. Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, vol 7, p 87-100,1983
- 5 Silveira, J. F. A., Instrumentação e Segurança de barragens de terra e enrocamento, Oficina de Textos, São Paulo, 2006.