

**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CEFET MG – Engenharia de Automação Industrial**

Trabalho de Conclusão de Curso

**PROJETO DE UMA PROTEÇÃO PARA A ADUTORA DO
SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE UMA
BARRAGEM DE REJEITOS CONTRA O GOLPE DE
ARÍETE**

Autor: Guilherme Henrique Rosa

Orientador: Prof. M.Sc. Alexandre Dias Linhares

Araxá/MG

Dezembro 2013

Guilherme Henrique Rosa

**PROJETO DE UMA PROTEÇÃO PARA A ADUTORA DO
SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE UMA
BARRAGEM DE REJEITOS CONTRA O GOLPE DE
ARIETE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Automação Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção de graduação.

Orientador: Prof. M.Sc. Alexandre Dias Linhares

Araxá/MG

Dezembro 2013

Este trabalho foi submetido como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Engenheiro de Automação Industrial, outorgado pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET – MG, e encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca do mesmo.

A citação de qualquer trecho deste trabalho é permitida, desde que seja feita de acordo com as normas da ética científica.

Guilherme Henrique Rosa

Trabalho aprovado em 18 de dezembro de 2013

Orientador: Prof.M.Sc. Alexandre Dias Linhares
CEFET-MG – Uned. Araxá

Membro: Prof. Dr. Alexandre Morais
CEFET-MG – Uned. Araxá

Membro: Eng^o João Carlos Franklin França
Vale Fertilizantes Araxá

Dedico à minha mãe Elzy pela compreensão e amor incondicional em todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela proteção e força de sempre seguir em frente.

Ao aos meus grandes pais e irmãos pelo carinho, compreensão e companheirismo nos momentos felizes e também nas horas mais difíceis.

Aos meus amigos Germano, Diego, Fernando, Pedro e Giuliano pela amizade, lealdade e cumplicidade. Por cada sorriso e pelos conselhos nas horas certas.

Aos professores do CEFET - MG por partilharem seus conhecimento e experiências de vida enriquecendo minha vida acadêmica, sem os quais este trabalho não seria possível.

Ao meu amigo e professor Alexandre Dias Linhares por acreditar no meu potencial e guiar meus passos no final desta etapa.

Aos amigos da terceira turma de Engenharia de Automação Industrial do CEFET-MG pela amizade e agradável convivência que tornou este caminho mais fácil, alegre e prazeroso.

Sei o que devo ser e ainda não sou, mas rendo graças a Deus por estar trabalhando, embora lentamente, por dentro de mim próprio, para chegar, um dia, a ser o que devo ser.

Chico Xavier

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iii
RESUMO	vi
1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Objetivo.....	10
2 Revisão Bibliográfica	11
2.1 Sistemas Hidráulicos	12
2.2 Fenômeno Golpe de Aríete.....	13
2.2.1 Fases do Golpe de Aríete	14
2.3 Condições da ocorrência do Golpe de Aríete em Sistemas Hidráulicos	15
2.4 Medidas de proteção contra o Golpe de Aríete.....	17
2.4.1 Medidas de ação direta.....	18
2.4.2 Medidas de ação indireta.....	19
3 Descrição do sistema de recirculação de água	29
4 Memorial de cálculo e resultados	31
4.1 Análise do Golpe de Aríete pelo método de Parmakian	31
4.1.1 Cálculo da Celeridade.....	32
4.1.2 Determinação do período	33
4.1.3 Determinação de $2p$ e de $K_{1.2l/C}$	33

4.1.4	Obtenção dos valores de Subpressão e Sobrepressão pelos ábacos de Parmakian	34
4.2	Cálculo do Reservatório de Ar Comprimido (RAC)	38
5	Análise dos resultados	42
6	Conclusão	45
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Utilização do Aríete por soldados para adentrar muralhas inimigas	8
Figura 1-2 - Tubulação colapsada devido ao vácuo presente na linha	9
Figura 2-1 - Chaminé de equilíbrio	21
Figura 2-2 - Volante de inércia instalado no veio de uma bomba.....	22
Figura 2-3 - Válvula de alívio.....	23
Figura 2-4 - Válvula de Retenção.....	25
Figura 2-5 - Ventosa.....	26
Figura 2-6 - Reservatório de Ar Comprimido (RAC).....	27
Figura 3-1 - Balsa com bombas flutuantes	30
Figura 3-2 - Reservatório intermediário	30
Figura 3-3 - Sistema fixo de bombeamento	30
Figura 4-1 - Ábaco de Parmakian para determinação da subpressão na descarga da bomba	34
Figura 4-2 - Ábaco de Parmakian para determinação da subpressão na metade do encanamento.....	35
Figura 4-3 - Ábaco de Parmakian para determinação da sobrepressão na descarga da bomba	36
Figura 4-4 - Ábaco de Parmakian para determinação da sobrepressão na metade do encanamento.....	37

Figura 4-5 - Diagrama de M. Vibert para o cálculo simplificado do Reservatório de Ar39

Figura 5-1 - Diagrama P&I de controle do Reservatório de Ar Comprimido44

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 - Resumo das pressões resultantes.....	37
---	----

RESUMO

O estudo da mecânica dos fluidos e suas aplicações é muito importante na atuação de engenheiros. Medidas de proteção contra efeitos indesejados podem e devem ser estabelecidas em sistemas de bombeamento. A atuação de um engenheiro de Automação Industrial deve ser na prevenção de falhas catastróficas ou não catastróficas, através de sistemas de controle em malha fechada.

Este estudo apresenta a análise e proposta de solução de possíveis falhas em um sistema de bombeamento real com a utilização de reservatórios pressurizados de ar comprimido (RAC) servindo como atenuadores de Golpe de Aríete em caso de paralisação do sistema de bombeamento. A análise do Golpe de Aríete e dimensionamento do RAC se fez a partir da teoria proposta por Parmakian.

A solução adotada foi um sistema de controle em um reservatório de ar comprimido (RAC) com duas válvulas solenoides atuando como elementos finais de controle a partir de transmissão das variáveis de processo pelos transmissores diferenciais de pressão. O controlador utilizado é um PLC dedicado desenvolvido pela Siemens.

Palavras-chaves: Golpe de Aríete, Parmakian, RAC, bombeamento.

1 INTRODUÇÃO

Da análise dos mais variados aspectos que envolvem a hidráulica, um assunto dos mais complexos e que, nos últimos tempos, vêm apresentando progressos excepcionais, os chamados fenômenos transitórios tem uma importância cada vez maior. Na busca por um aprofundamento relativo a este assunto é possível perceber, sobretudo, a sua grande importância no que se refere aos projetos de sistemas hidráulicos, bem como às contribuições dos inesgotáveis progressos principalmente no campo computacional.

Em relação aos sistemas hidráulicos, formados por condutos forçados, esses se sujeitam às mudanças nas condições de escoamento que se caracterizam por mudança de pressão e velocidade de fluxo do fluido em função do tempo, ocasionado por regimes variados.

As condições de escoamento de uma adutora, sofrendo influências diversas como manobras de abertura e fechamento de válvula no sistema, queda de energia, ocasionando desligamento repentino de bombas, mudança de rotação de uma bomba, dentre outros tipos de perturbações que gerem variação no sistema dão origem ao regime variado ou não permanente, também chamado de transitório ou transiente.

O regime permanente em escoamentos sob pressão é caracterizado pela constância dos valores de pressão e velocidade em todas as seções da tubulação ao longo do tempo.

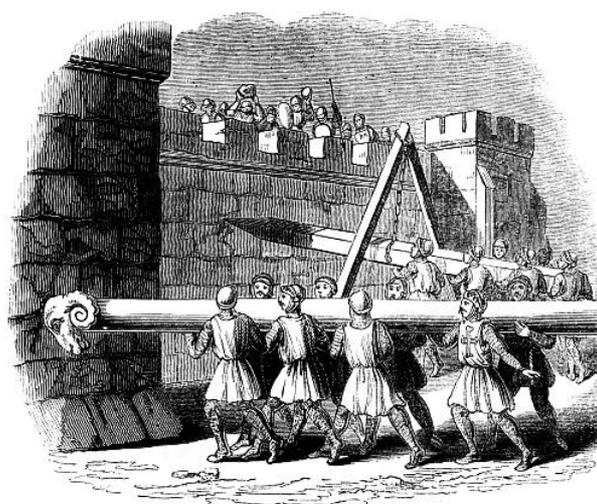
Dá-se o nome de transitório ou transiente hidráulico ao regime variado que ocorre durante a passagem de um regime permanente para outro regime permanente, sendo que qualquer alteração no movimento do fluido gera o fenômeno.

Na busca por um aprofundamento relativo sobre este assunto é possível perceber, sobretudo, sua grande importância no que se refere aos projetos de sistemas hidráulicos. E, do meio desses fenômenos, apresentando destaque em função de sua cotidiana ocorrência, sendo também bastante interessante, surge o processo conhecido como Golpe de Aríete.

Denomina-se Golpe de Aríete o choque violento produzido sobre as paredes de um conduto forçado quando o movimento do líquido modifica-se de forma brusca. Mais precisamente se traduz na sobrepressão e subpressão que as tubulações recebem quando, por exemplo, se fecha um registro interrompendo-se o escoamento.

O termo Golpe de Aríete foi criado pelos pesquisadores franceses, que assimilaram o som rítmico produzido pelas sucessivas ondas de pressão que atingiam um registro de gaveta ao som das batidas de um aríete ao arrombar portas e muralhas de fortificações. O aríete é uma antiga máquina de guerra, usada até o século XV, consistindo basicamente em um tronco de madeira pendurado em um pórtico; o tronco, impulsionado por vários soldados, era arremetido seguidas vezes contra a porta ou muralha a ser arrombada. A palavra aríete é de origem latina, aries, arietis, que significa carneiro.

Figura 1-1 - Utilização do Aríete por soldados para adentrar muralhas inimigas



Fonte: <<https://www.wikipedia.org>>, Acesso em 04/12/13.

No desenvolvimento do fenômeno, a pressão poderá atingir níveis indesejáveis, que poderão causar sérios danos aos condutos ou avarias nos dispositivos nele instalados. Danos como rupturas de tubulações causadas por sobrepressões, avarias em bombas e válvulas, colapso de tubos devidos ao vácuo, rompimento do pórtico de apoio, podem resultar em falhas catastróficas.

Figura 1-2 - Tubulação colapsada devido ao vácuo presente na linha



Fonte: Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos Departamento de Engenharia Civil e Ambiental à UnB, MARWELL, Davi Tadeu Borges, 2009.

Assim é que torna-se necessária a análise do golpe, para que se possa quantificá-lo e, com isto, tornar possível a adoção de medidas preventivas cabíveis, que venham anular ou minimizar seus efeitos indesejáveis. Efetivamente esta análise se faz necessária, porque o desconhecimento dos efeitos do golpe de aríete pode ocasionar o super ou o subdimensionamento, isto é, projetos de sistemas de tubulações com espessuras de parede desnecessariamente elevadas ou perigosamente reduzidas.

Estudos detalhados foram realizados acerca desses fenômenos com o emprego de diversas técnicas, possibilitando, deste modo, o desenvolvimento de várias teorias. Assim, foram elaborados, baseados em diferentes suposições restritivas, diferentes métodos gráficos e analíticos. Mais tarde, com o advento da informática, tornou-se possível uma análise com maior precisão, reduzindo as possibilidades dos resultados serem influenciados de forma negativa.

John Parmakian, um dos maiores especialistas no assunto, forneceu elementos para a solução das questões do golpe de aríete, em situações mais complexas, considerando a elasticidade dos encanamentos e a compressibilidade do líquido.

Para efeito de ordenamento, o trabalho é desenvolvido em capítulos. No primeiro faz-se uma introdução. No segundo, um levantamento bibliográfico sobre a teoria do Golpe de Aríete citando seus principais estudiosos e suas teorias. Com isso pretende-se avaliar estudos e pressupostos que possam contribuir para uma maior compreensão do fenômeno a fim de estruturar o campo de ação. O capítulo três mostra a metodologia básica do trabalho, evidenciando as características do sistema estudado. No capítulo quatro, estima-se a intensidade do Golpe de Aríete apresentando e considerando os efeitos dos equipamentos presentes no modelo proposto por Parmakian. No capítulo cinco uma análise dos resultados obtidos por meio do modelo e as proposições de um sistema de proteção dos condutos e equipamentos presentes. Por fim, no capítulo seis, são apresentadas as conclusões e recomendações obtidas no estudo.

1.1 Objetivo

O objetivo deste estudo é quantificar a variação da pressão, através do método de Parmakian, de um sistema de captação de água recirculada de uma barragem de rejeitos. Pretende-se analisar os valores encontrados e, a partir desses, propor um dispositivo de proteção capaz de reduzir as cargas prejudiciais, provenientes do Golpe de Aríete, ao sistema em todo o seu ciclo de funcionamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo França (2006), Michaud foi certamente pioneiro ao aprofundar-se no estudo do fenômeno em tubulações tendo publicado as suas conclusões em 1878. Tempos depois, Joukowsky (1898) apresentou que a velocidade de propagação de uma variação de pressão, que ocorre através de uma manobra de alguma válvula do sistema, é função da elasticidade da tubulação. Os trabalhos de Joukowsky, com a formulação de teoria matemática para componentes do sistema como válvulas de alívio e chaminés de equilíbrio, são as primeiras grandes contribuições de elaboração da teoria deste fenômeno transitório.

Na obra *Teoria Del colpo d'aríete*, Allievi prosseguiu ainda mais com as pesquisas de Joukowsky, sendo essa a base mais adiante de elaborações acerca do assunto (FRANÇA, 2006).

Tendo as equações que regem o fenômeno transitório uma natureza complexa, tornou-se necessário o desenvolvimento de métodos gráficos, para que pudessem ser elaboradas as suas soluções, tendo como destaque os trabalhos de Schnyder e Bergeron no ano de 1932.

Segundo Macintyre (1997, p. 707), Louis Bergeron apresentou um método gráfico para representação e análise do Golpe de Aríete (Épuras de Bergeron) considerado, até hoje, como de enorme valia para esses estudos e em suas aplicações práticas, principalmente para casos complexos e de muita responsabilidade. Schlay, Schnyder, Löwy, e Angus também propuseram soluções gráficas, mas as Épuras de Bergeron são as mais empregadas.

Entre 1940 e 1960, vários pesquisadores se preocuparam em estudar os fenômenos transitórios, aprimorando os métodos analíticos e gráficos de resolução das equações envolvidas. Dentre os pesquisadores, destacam-se Parmakian, Jaeger e Rlech.

De acordo com Macintyre (1987, p. 707), John Parmakian, um dos maiores especialistas no assunto, na sua obra *Water-hammer Analysis*, forneceu elementos para solução das equações do Golpe de Aríete, em situações mais complexas, considerando a elasticidade das tubulações e a compressibilidade do líquido.

No livro *Hydraulic Transients*, o autor V. L. Streeter relaciona sete métodos de análise dessas questões, oscilando entre as de menor complexidade até as que fazem programação para cálculo utilizando computadores, consideradas mais complexas.

O campo computacional começou a partir de 1953 possibilitando a utilização de métodos numéricos, método das diferenças finitas e método das características, na solução das equações. As pesquisas de maior relevância foram de Streeter, Martin, Chaudhry, Wylie, Almeida e Tullis.

Dentre os vários métodos numéricos e computacionais utilizados para cálculos de transientes hidráulicos, autores como Streeter (1978), Almeida (1981), Martin (1982) e Chaudhry (1987) recomendam o Método das Características, considerando-o o mais adequado para solucionar problemas unidimensionais em escoamentos sob pressão.

2.1 Sistemas Hidráulicos

Os sistemas hidráulicos formados por condutos forçados estão sujeitos a mudanças nas condições de escoamento caracterizadas por alteração da pressão e velocidade de fluxo do fluido em função do tempo, gerando regimes variados.

As condições de escoamento de uma adutora, sofrendo influências das manobras de abertura ou fechamento de válvula no sistema, queda de energia, ocasionando desligamento repentino de bombas, pela mudança de rotação de uma bomba, aumento na demanda de uso, dentre outros tipos de perturbações que gerem variação no sistema dão origem ao regime variado ou não permanente.

A permanência dos valores de pressão e velocidade por toda a extensão dos condutos forçados de um sistema hidráulico ao longo do tempo caracteriza o regime permanente.

O regime variado que ocorre durante a mudança de um regime permanente para outro regime permanente denomina-se transitório hidráulico ou transiente. Deste modo, qualquer mudança no movimento ou interrupção de fluxo do fluido possibilita a ocorrência do fenômeno.

Depois da ocorrência do fenômeno, ocasionada por qualquer evento que interrompa o fluxo permanente do sistema, o regime permanente antes presente sofre modificação, originando um regime não permanente que, depois, retornará a um novo estado de permanência.

2.2 Fenômeno Golpe de Aríete

Por Golpe de Aríete são conhecidas as variações de pressão oriundas de variações da vazão, causadas por algum tipo de perturbação, seja voluntária ou involuntária, que se imponha ao fluxo de líquidos em condutos, tais como: operações de abertura ou fechamento de válvulas, falhas mecânicas de dispositivos de proteção e controle, parada de turbinas hidráulicas e ainda de bombas causadas por queda de energia no motor, havendo, no entanto, outros tipos de causas.

No desenvolvimento do fenômeno, a pressão poderá atingir níveis indesejáveis, que poderão causar sérios danos ao conduto ou avarias nos dispositivos nele instalados. Danos como ruptura de tubulações por sobre pressão, avarias em bombas e válvulas, colapso de tubos devido a vácuo, dentre outras, podem resultar em acidentes.

2.2.1 Fases do Golpe de Aríete

O fenômeno do Golpe de Aríete pode ocorrer em instalações de bombeamento a partir de alguma manobra rápida em uma válvula ou parada de bombeamento do sistema ou motivados por uma queda de corrente elétrica que alimenta motores e bombas ou, acidentalmente, por motivos mecânicos no conjunto motobomba. O fenômeno em estudo tem o processo de seu desenvolvimento numa instalação de bombeamento da seguinte maneira:

1ª Fase

Quando, por hipótese, o fornecimento de energia elétrica sofre interrupção, a única energia que permite a manutenção do rotor girando por algum tempo é a energia cinética do eixo dos estágios do conjunto moto-bomba. Esta energia, porém, é pequena comparada com a necessária para manter a descarga sob a altura manométrica correspondente à instalação, de modo que a velocidade angular do rotor diminua rapidamente.

A diminuição da velocidade angular acarreta perda de pressão de descarga. A coluna líquida na linha de recalque, graças a sua inércia e à energia residual transmitida pelo rotor em virtude da inércia do conjunto rotatório, prossegue escoando, porém, com celeridade decrescente até que as forças de inércia referidas se equilibrem através do efeito da ação da gravidade e do atrito, ou então, o líquido escoar em um reservatório dissipando sua energia pela elevação do seu nível.

Nesta etapa ocorre uma redução de pressão no interior da tubulação, sendo essa diminuição maior, no seu início, na união com a bomba, desenvolvendo-se ao longo do conduto no sentido de jusante. É a etapa do chamado Golpe de Aríete negativo.

Cada componente que se considere da tubulação se contrai sucessivamente por uma diminuição elástica do diâmetro enquanto a onda de depressão segue até o reservatório, com uma celeridade C , cujo valor pode ser calculado pela fórmula de Allievi:

$$C = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + K \cdot \frac{D}{e}}}$$

Onde;

D = diâmetro da tubulação, em metros;

e = espessura do tubo, em metros;

K = 0,5 para o aço, 1 para o ferro fundido; 5 para concreto; 18 para PVC rígido.

Se a distância entre a bomba e o reservatório é *I*, o tempo em que a onda leva para chegar ao reservatório é *I/C*. Após esse tempo, a tubulação está em depressão ao longo de toda sua extensão, e o fluido cessa.

2ª Fase

A água retorna à bomba ao longo da tubulação, e ao fim de um novo tempo *2I/C* a contar no início do fenômeno, a onda de pressão chega à bomba.

Podem ocorrer nessa segunda fase duas hipóteses, havendo ou não válvula de retenção. Esta pode funcionar como um anteparo à propagação da onda, sofrendo os danos provocados pelo fenômeno. A supressão desta válvula pode permitir a propagação da onda para o interior da voluta, cujos efeitos previsivelmente podem ser danosos.

2.3 Condições da ocorrência do Golpe de Aríete em Sistemas Hidráulicos

Os sistemas hidráulicos que apresentam em sua constituição tubulação com água sob pressão são passíveis de sofrerem alterações no que se diz respeito às

condições de escoamento caracterizadas pela variação de pressão e de velocidade de escoamento do fluido em função do tempo, ocasionando regimes variados.

Denomina-se transiente ou transitório hidráulico, o regime variado que ocorre durante a passagem de um regime permanente para outro regime permanente. Deste modo, qualquer alteração no movimento ou paralisação eventual de um elemento do sistema originam os chamados fenômenos transitórios. Posteriormente à ocorrência da perturbação, como o desligamento de uma bomba, o regime permanente presente antes da perturbação é alterado, dando origem a um regime não permanente que posteriormente passará a um novo estado de permanência.

No decorrer do transitório hidráulico, as oscilações de pressão ao longo da tubulação ocorrem de forma brusca, provocando ruídos semelhantes a pancadas. Deste modo, o transitório hidráulico também é comumente chamado de Golpe de Aríete.

As sobrepressões e subpressões ocorrentes durante o transitório hidráulico podem causar sérios problemas à tubulação e seus equipamentos, se estes não forem dimensionados para suportar tais sobrecargas, comprometendo a segurança e funcionamento do sistema. Desse modo, a quantificação das pressões máximas e mínimas é de suma importância para o projetista, a fim de que este possa dimensionar a tubulação e introduzir equipamentos protetores, cuja finalidade é amortecer as variações de carga, prejudiciais à vida útil da instalação.

A análise do Golpe de Aríete nos sistemas hidráulicos tem por base a equação de continuidade e a equação da quantidade de movimento. Ambas formam um sistema de equações diferenciais cuja solução exata não está disponível, sendo necessário utilizar técnicas específicas para se determinar uma solução aproximada do problema. Desse modo, foram criados diferentes métodos gráficos e analíticos, baseados em diferentes suposições restritivas. Esses métodos, até pouco tempo os únicos disponíveis, são pouco precisos e difíceis de serem aplicados a sistemas mais complexos.

Apesar dos fenômenos transitórios serem conhecidos desde o início do século, apenas recentemente, com o surgimento e aperfeiçoamento dos computadores digitais, que estes fenômenos puderam ser estudados mais detalhadamente, sem a necessidade de simplificações grosseiras, sendo, hoje em dia, ferramenta indispensável no dimensionamento de sistemas hidráulicos.

O estudo do Golpe de Aríete requer o conhecimento das condições iniciais do regime permanente e das condições de contorno da instalação, que são os pontos onde ocorrem descontinuidades das grandezas físicas, como pressão e velocidade de escoamento. Em função de ser um fenômeno complexo, geralmente é muito pouco discutido nos cursos de graduação, principalmente em razão da falta de divulgação e ensino da metodologia numérica apropriada.

2.4 Medidas de proteção contra o Golpe de Aríete

Um projeto cuidadoso de tubulação de recalque deve incluir uma adequada investigação e especificação de equipamentos e dispositivos, com vistas a se evitar transientes indesejáveis.

Em alguns casos são especificadas tubulações com classes de pressão capazes de suportar as sobrepressões e depressões previstas. Porém estas variações de pressão na tubulação submetem o material constitutivo do tubo a variações de tensões, que podem levá-lo à fadiga, o que não é recomendável para sua boa conservação. Portanto, um bom procedimento seria valer-se de algum tipo de proteção capaz de minimizar estas variações de pressão.

Assim, uma vez calculado o golpe de aríete, causado pela parada do grupo eletrobomba, já se pode analisar a conveniência e os meios de minimizá-lo.

A seleção de um ou vários dispositivos de proteção deverá resultar da análise de um número conveniente de alternativas que possibilitem eleger aquela de melhor resposta, considerando a eficiência, a economia, a natureza, a frequência de manutenção, etc.

Os dispositivos de proteção contra o golpe de aríete devem, portanto, ter por efeito limitar os valores da sobrepressão e da depressão. Alguns dispositivos utilizados para este fim são descritos nos tópicos que se seguem.

2.4.1 Medidas de ação direta

As medidas de ação direta, para evitar os aumentos de pressão num sistema de bombeamento, são baseadas, fundamentalmente, na intervenção sobre as causas associadas à variação das condições de escoamento, por exemplo, o tipo de válvulas de retenção adotadas ou o funcionamento dos grupos de bombas.

2.4.1.1 Aumento da resistência mecânica das tubulações

As pressões internas máximas não devem exceder, nas condições normais de operação, o valor da pressão de serviço admissível para cada classe de tubulação, dos acessórios e do restante equipamento. Para alguns materiais, como por exemplo, o PVC, a fadiga por repetição dinâmica poderá diminuir o valor limite da pressão interna admissível.

Em geral, nos condutos mais flexíveis e susceptíveis de sofrerem colapso por esmagamento, as pressões mínimas internas não devem atingir valores inferiores à pressão atmosférica. Quando o líquido transportado se trata de água para consumo humano, a condição anterior deve ser verificada, independentemente das características da tubulação que a transporta. Como referência, a pressão mínima interna relativa, associada à ocorrência de um regime transitório, em sistemas elevatórios de águas residuais, não deverá ser inferior a $0,5 \text{ BAR}_{\text{absoluto}}$ (Almeida, 1982).

Há casos em que o líquido a transportar num conduto apresenta características perigosas por ser corrosivo, tóxico ou se encontrar a temperaturas elevadas e poder evaporar-se para fora do sistema (por exemplo, em condutos de arrefecimento de instalações nucleares). O impacto da ocorrência de acidentes em sistemas elevatórios, transportando líquidos de natureza tão perigosa, como

acabado de referir, pode ser devastador para o meio ambiente em que se encontram inseridos os sistemas e, também, implicar a perda de vidas humanas.

Algumas situações de escoamento sob pressão de líquidos perigosos não permitem a aplicação de métodos convencionais utilizados para fazer face às variações máximas de pressão resultantes de regimes transitórios. Quando assim acontece, não restam alternativas para além de recorrer a tubulações que consigam suportar, em serviço, a pressão interna máxima, incluindo o golpe de aríete. O mesmo procedimento deverá ser aplicado aos acessórios que integram o sistema elevatório.

2.4.2 Medidas de ação indireta.

As técnicas de ação indireta representam uma estratégia de proteção contra os efeitos do golpe de aríete, com maior aceitação na indústria da engenharia hidráulica. Estas técnicas envolvem a instalação de dispositivos que, de forma indireta, garantam o controle das variações de fluxo e das pressões inerentes aos regimes transitórios. Os princípios básicos de funcionamento dos dispositivos integrados nesta categoria são os indicados a seguir (Almeida, 1990):

- Acumulação e dispersão alternada de energia ao escoamento, incluindo ou não o armazenamento e injeção de água, durante o regime transitório;
- Estabelecimento de ligação temporária com o exterior (atmosfera), a uma tubulação ou a um reservatório, em função da pressão interna e dos desníveis encontrados.

Alguns exemplos mais comuns de dispositivos de ação indireta são os reservatórios de ar comprimido (RAC) ou hidropneumáticos, os reservatórios unidirecionais (RUD), as chaminés de equilíbrio, as válvulas de admissão de ar ou ventosas, as válvulas de alívio e as tubulações de alimentação paralela ou “by-pass”.

De modo a maximizar a sua eficiência, grande parte dos dispositivos mencionados deverão ser instalados no sistema elevatório o mais próximo possível

da origem do regime transitório, por exemplo, junto do grupo de bombas ou da válvula de retenção.

Alguns destes dispositivos serão descritos a seguir.

2.4.2.1 Chaminés de Equilíbrio

As chaminés de equilíbrio são dispositivos que atuam ao mesmo tempo na proteção contra as depressões e contra as sobrepressões, visto que possibilitam a oscilação em massa da água entre a chaminé e o reservatório de descarga, evitando-se, neste trecho, a ocorrência de variações elevadas de pressões.

Com a parada do grupo motobomba, e conseqüente redução da pressão na tubulação, o nível da água na chaminé (localizada próxima da válvula de retenção) desce, alimentando a linha de recalque, reduzindo a variação da vazão e, com isto, reduzindo o valor da depressão. Em seguida, com a inversão do fluxo e fechamento da válvula de retenção, o nível da água sobe, transformando a energia cinética em potencial, e, assim, reduzindo o valor da sobrepressão.

Desta forma, com o afluxo e oscilação da água na chaminé, os efeitos do golpe de aríete entre esta e o reservatório são evitados. Portanto a chaminé de equilíbrio deverá estar tão próxima quanto possível da válvula de retenção. Deverá também ter tamanho adequado para não extravasar, a não ser que conte com vertedouro, e nem esvaziar para não permitir a entrada de ar na tubulação.

As chaminés simples são unidas, em sua parte inferior, sem estreitamentos, à tubulação de recalque. As chaminés com orifício possuem em sua parte inferior estreitamentos (estrangulamentos) que introduzem perdas de carga na passagem da água, contribuindo para que a carga em excesso seja dissipada, sendo, por isto, mais vantajosas que as simples. Eventualmente, além do orifício, poderia haver uma tubulação de união entre a chaminé e a tubulação de recalque. A chaminé de equilíbrios diferencial é uma associação das duas anteriores citadas.

Figura 2-1 - Chaminé de equilíbrio



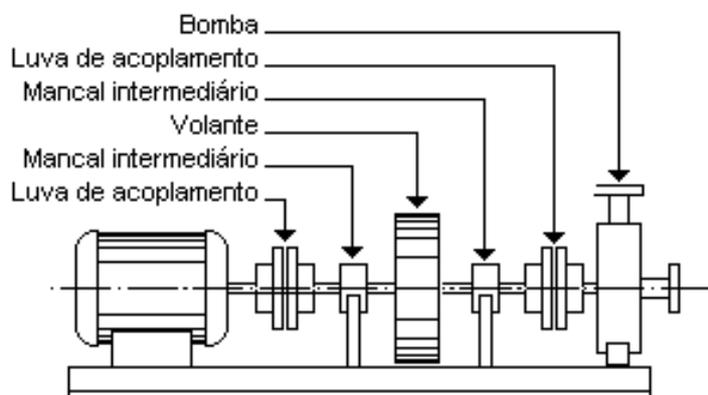
Fonte:<<http://www.panoramio.com/photo/39863266>>, acesso em 04/12/13.

2.4.2.2 Volantes de Inércia

Os volantes de inércia são dispositivos que atuam na proteção contra as depressões, devido à influência do tempo de parada no golpe de aríete. Ao se incorporar um volante ao grupo motobomba, sua inércia retardará a perda de rotações, aumentando o tempo de parada do conjunto e, conseqüentemente, diminuirá a intensidade do golpe. Devido à diminuição da depressão máxima, somente de forma indireta as sobrepressões serão atenuadas com estes dispositivos.

Assim, com a incorporação adequada de volantes, qualquer instalação poderá resultar em manobra lenta.

Figura 2-2 - Volante de inércia instalado no veio de uma bomba



Fonte: Próprio Autor

Quanto à utilização deste dispositivo de proteção é importante ressaltar que o acoplamento de volantes a grupos motobomba, apesar da aparente simplicidade, introduz uma questão de ordem eletromecânica, pois quanto mais seu peso aumenta, mais potente deverá ser o motor para vencer a inércia do volante na partida e maior será a intensidade de corrente elétrica de partida, elevando os custos de investimento e operação.

Portanto, este tipo de proteção fica bastante limitado na prática, podendo, eventualmente, o uso de ventosas, por exemplo, eliminar o vácuo com um custo significativamente inferior.

2.4.2.3 Válvula de Alívio

As válvulas de alívio são dispositivos que atuam na proteção contra as sobrepressões, pois, através de mecanismos de regulação, abrem-se quando a pressão excede a valores pré-fixados, permitindo a saída de uma quantidade de água até que a pressão caia abaixo do valor estabelecido, quando, então, fecham-se imediatamente. Desta forma, controlam o excesso de pressão, mantendo a pressão estabilizada.

Dado à pequena compressibilidade da água e ao curto tempo de ocorrência do golpe é de se esperar que para estabilizar a pressão, a quantidade de água extravazada não seja importante.

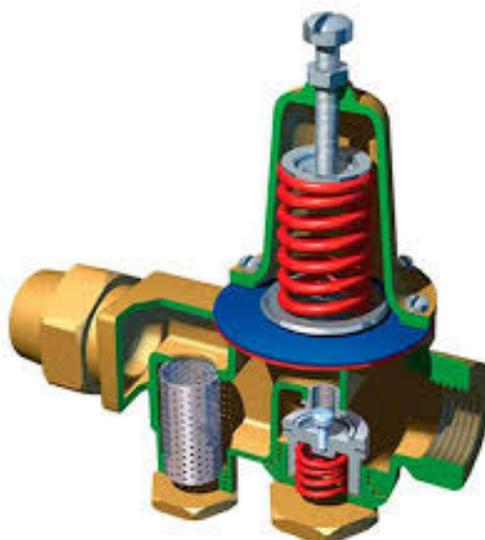
O funcionamento destas válvulas é por meio de molas que acionam um tampão, ou através de mecanismos mais aperfeiçoados (válvulas compensadas) que conferem maior precisão e eficácia.

Estes dispositivos, que devem ser instalados no trecho que se deseja proteger contra os efeitos da sobrepressão, devem abrir-se a uma pressão pré-fixada acima da pressão manométrica de operação. Este número é um limite prático médio recomendado por diversos especialistas.

Uma característica importante requerida para estas válvulas é que tenham uma baixa inércia, de forma que possam abrir antes que a pressão estabelecida (pré-fixada) possa ser, em muito, excedida. Esta característica associada a um fechamento amortecido dará uma grande eficácia à válvula de alívio.

Cabe ainda ressaltar que a utilização destas válvulas requer um programa de manutenção cuidadoso e contínuo, e assim sendo, as válvulas de alívio podem vir a ser uma solução viável e bem econômica.

Figura 2-3 - Válvula de alívio



Fonte:<<http://www.mecanicaindustrial.com.br>>, acesso em 01/12/13

2.4.2.4 Válvula de Retenção

As válvulas de retenção são dispositivos que, por servirem para impedir a inversão do fluxo num conduto, atuam na proteção contra as sobrepressões.

Um tipo muito comum de válvula de retenção é o de portinhola (tipo leve ou pesada), a qual se move por um mecanismo de rotação em torno de um eixo horizontal situado em sua parte superior.

Há, no entanto, outros tipos de válvulas de retenção, onde se incluem as de alta tecnologia, cuja concepção permite que o fechamento seja lento e acabe um pouco antes da inversão, com o propósito de minorar a sobrepressão.

A portinhola abre-se com o próprio movimento da água e fecha-se quando cessa o movimento, de modo a impedir o retorno da coluna de água. Assim, se instaladas convenientemente em uma linha de recalque, isolam entre si trechos da tubulação, possibilitando que trechos situados em níveis inferiores fiquem aliviados das cargas dos trechos de níveis superiores. Com base neste princípio é que se instalam válvulas de retenção nas saídas das bombas, isolando-as da linha de recalque, pois a sobrepressão atua e tem o seu valor máximo exatamente até a válvula, ficando, por conseguinte, a bomba protegida. Isto pode ser aplicado em outros trechos da tubulação onde se queira proteger contra as sobrepressões.

Como não poderia deixar de ser, a utilização destas válvulas também requer uma manutenção cuidadosa e contínua, pois, como mostrado, fora as considerações de natureza econômica, podem vir a ser uma solução satisfatória em muitos problemas de transientes indesejáveis.

Figura 2-4 - Válvula de Retenção



Fonte:<<http://www.elan.ind.br>>, acesso em 27/11/13

2.4.2.5 Ventosas

As ventosas são, também, dispositivos que atuam na proteção contra as depressões, uma vez que permitem a entrada de ar na tubulação através de um orifício localizado na parte superior da ventosa, limitando o valor da depressão ao da pressão atmosférica.

Entre os vários modelos existentes, um tipo comum é a ventosa com flutuador esférico.

Com a pressurização da linha, a água deslocará o flutuador para cima, em direção ao orifício de passagem do ar, mantendo-o fechado. Quando, decorrente do golpe de aríete na seção onde se encontra instalada a ventosa, a pressão cair, o nível da água descerá, movimentando o flutuador para baixo, abrindo o orifício e permitindo a entrada de uma quantidade de ar para a tubulação, que evitará a formação de vácuo, impedindo o colapso do conduto. Quando novamente a pressão aumentar, estando a ventosa instalada em ponto conveniente da linha, esta possibilitará também a saída do ar contido na tubulação, que deverá ser de maneira controlada para evitar sobrepressão.

As ventosas que controlam a velocidade de saída do ar são conhecidas como *slow-closing*, *anti-slam* ou de fechamento lento. Estas tem dimensionamento específico para cada aplicação, visando evitar a ocorrência de choque hidráulico proveniente da reaproximação da coluna líquida. Cada diâmetro de rede tem uma velocidade de aproximação adequada, variando conforme o material, espessura e regime de trabalho.

Figura 2-5 - Ventosa



Fonte: <<http://www.saint-gobain-canalizacao.com.br>>, acesso em 15/11/13

2.4.2.6 Reservatório de ar comprimido (RAC)

Atualmente, um dos dispositivos utilizados para proteção de sistemas elevatórios, contra os efeitos dos regimes transitórios, é o reservatório de ar comprimido (RAC).

Quando o perfil de uma tubulação elevatória não é suficientemente próximo do nível do líquido do reservatório de montante (passível instalação de chaminés de equilíbrio), o fornecimento de água à tubulação, quando ocorrem depressões resultantes da parada da bomba, pode ser conseguido recorrendo a um RAC. Este dispositivo é constituído por uma câmara fechada, contendo ar comprimido na parte superior e água que ocupa a zona inferior. O controle e a manutenção de uma

determinada de massa de ar, no interior do reservatório, são feitos utilizando manômetros e um compressor, respectivamente.

Em regime permanente, a massa de água armazenada no interior do RAC encontra-se em equilíbrio sob a ação da pressão do ar que ocupa a zona superior do dispositivo e a pressão na seção da tubulação onde se estabelece a ligação. Este equilíbrio é quebrado devido às variações de pressão, decorrentes de um regime transitório. Com a queda de pressão, provocado pelo transitório, logo após a partida da bomba parte do volume de água armazenado no reservatório é escoada para a tubulação, reduzindo o tempo de variação de fluxo. Na fase posterior, quando o sentido de escoamento é invertido e a pressão aumenta, o reservatório irá absorver, total ou parcialmente, o fluxo da tubulação (esta situação também se verifica nos instantes após o arranque do grupo motobomba).

Durante a fase de depressão e de alimentação da tubulação a pressão do ar no interior do reservatório diminui, permitindo a sua expansão e, com isto, o volume ocupado pelo ar aumenta. Durante a fase de sobrepressão e de armazenamento de água no RAC, o volume ocupado pelo ar diminui, como consequência do aumento da respectiva pressão.

Figura 2-6 - Reservatório de Ar Comprimido (RAC)



Fonte: <<http://www.heh.pt>>, acesso em 27/11/13

O volume deste tipo de dispositivos de proteção é menor que o volume das chaminés de equilíbrio. Tal fato deve-se à substituição da mobilização da energia potencial gravitacional (caso da chaminé de equilíbrio) pela mobilização da massa de ar como acumulador de energia (Almeida, 1982).

De forma a obter volumes ainda menores dos reservatórios de ar comprimido e a reduzir os efeitos das variações máximas de pressão, podem ser introduzidas perdas de carga adicionais na tubulação de ligação entre o RAC e a conduta elevatória. Para alcançar esse fim pode-se, por exemplo, instalar uma válvula de retenção na referida tubulação de ligação, e uma tubulação de by-pass, com diâmetro reduzido, que permita o reenchimento do RAC, quando o obturador da válvula de retenção fecha, na sequência da inversão do sentido do escoamento.

Parmakian (1963), a título sugestivo, refere que a perda de carga, quando o escoamento se processa no sentido do RAC, deverá ser 2,5 vezes superior à perda de carga na saída do líquido do reservatório para a tubulação principal.

Os reservatórios de ar comprimido apresentam alguns inconvenientes, como a necessidade de um compressor de ar e respectivos dispositivos de controle da pressão, implicando um investimento adicional, e a eventual influência negativa no fechamento da válvula de retenção de proteção da bomba, podendo provocar o fechamento brusco e violento do obturador, fenômeno conhecido como “check valve slam”.

Na exploração de sistemas com este tipo de reservatórios de ar comprimido, o maior problema reside na dificuldade em manter o nível de ar comprimido, podendo ser feito de forma automática utilizando controladores e válvulas automáticas.

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO DE ÁGUA

O objeto do estudo faz parte do sistema de recirculação de água da barragem de rejeito de uma usina de concentração de fosfato. As lamas de rejeito geradas pela usina de concentração são depositadas em barragens, onde a parte sólida presente na mistura decanta formando uma camada de água na superfície da barragem. Objetivando o reaproveitamento da água e a sustentabilidade do sistema, esta é recaptada e enviada novamente para a usina de concentração, afim de minimizar a utilização de água nova no processo.

O sistema é composto de uma estação flutuante (balsa) onde estão localizadas 5 (cinco) bombas flutuantes, 4 (quatro) operando e 1 (uma) em stand-by. Estas bombas captam a água da superfície da barragem e direcionam para uma estação intermediária onde é armazenada em um reservatório com capacidade de 1300 m³.

O reservatório possui um sistema de captação fixo composto por 4 (quatro) bombas Omega 250-480 A da KSB acionadas por motores de 800 cv, sendo que, 3 (três) operam normalmente e 1 (uma) em stand-by, retornando a água através de uma adutora de aço com o diâmetro de 28" até a usina de concentração com o comprimento de 2300 metros e diferença de elevação de 59 metros.

Devido à importância do sistema de bombeamento em questão para a continuidade operacional da usina de concentração, há a necessidade de avaliar a disponibilidade e segurança operacional do sistema. Dentre essas avaliações observa-se a necessidade de verificar a possibilidade da presença do Golpe de Aríete, a fim de estudar um sistema de proteção para a adutora e demais equipamentos do sistema de bombeamento fixo.

Figura 3-1 - Balsa com bombas flutuantes



Figura 3-2 - Reservatório intermediário



Figura 3-3 - Sistema fixo de bombeamento



4 MEMORIAL DE CÁLCULO E RESULTADOS

4.1 Análise do Golpe de Aríete pelo método de Parmakian

O método de Parmakian propõe a determinação do Golpe de Aríete de forma gráfica e analítica em situações mais complexas considerando as seguintes premissas:

- O líquido é homogêneo e elástico.
- As paredes do encanamento são homogêneas, elásticas e isotrópicas.
- As velocidades e pressões são uniformemente distribuídas ao longo de qualquer seção transversal.
- Os níveis de água nos reservatórios, durante a ocorrência do fenômeno, permanecem invariáveis.
- A bomba é do tipo centrífugo.
- Não há válvula de retenção.

Sendo assim, adotam-se as unidades em que a dedução foi estabelecida por Parmakian, para emprego imediato de seus gráficos.

Dados do sistema:

- L - Comprimento da Tubulação: 2300 m ou 7545,090 ft.
- d - Diâmetro interno do encanamento: 692,15 mm ou 2,270 ft.
- e - Espessura do encanamento: 3/8" ou 9,525 mm ou 0,0312 ft.
- h_e - Altura estática: 59 m ou 193,57 ft.
- H – Altura manométrica: 111 m ou 364,17 ft.
- Q - Vazão nominal da bomba: 1400 m³/h ou 13,73 ft.³/s

- V_0 - Velocidade de Escoamento do líquido antes do golpe de aríete: 2m/s ou 6,56 ft./s
- γ – Peso específico do líquido: 1000 Kg/m³ ou 62,4 lb./ft.³
- η - Rendimento da bomba: 82%
- r - Rotação da bomba: 1790 RPM.
- n_b - Número de bombas: 3

4.1.1 Cálculo da Celeridade

A celeridade de propagação de uma onda de pressão depende das propriedades físicas do fluido e das propriedades da tubulação relacionadas com o material, das dimensões e do tipo de apoio ou instalação da mesma, e ainda da aceleração da gravidade. Para o cálculo da celeridade C , calcula-se primeiramente o coeficiente C_1 . O valor de C_1 depende das condições de fixação da tubulação, sendo:

- $C_1 = 1$, para tubulações com juntas de expansão, e apoiadas nas extremidades;
- $C_1 = 1 - \mu^2$, para tubulações fixas nas extremidades;
- $C_1 = 5/4 - \mu$, para tubulações sem juntas de expansão, fixas na extremidade de jusante;
- $C_1 = 1 - \mu/2$, para tubulações com juntas de expansão, fixas nas extremidades.

Onde, μ = coeficiente de Poisson.

A tubulação em questão é de aço e fixa nas extremidades, portanto, tem-se:

Coeficiente de Poisson para tubulação de aço $\mu = 0,3$

$$C_1 = 1 - \mu^2 = 0,91 \quad (1)$$

Sendo assim, o valor da Celeridade é:

$$C = \sqrt{\frac{1}{\frac{\gamma}{g} \left(\frac{1}{K} + \frac{d \cdot C_1}{E \cdot e} \right)}} = 3660,957 \text{ ft./s} \quad (2)$$

Onde:

- g - Aceleração da gravidade: 32,15 ft./s²
- K - Módulo volumétrico do Líquido: 43,2 x 10⁶ lb./ft.²
- E - Módulo de Young do aço: 4,32 x 10⁹ lb./ft.²

4.1.2 Determinação do período

O período do encanamento ou tempo crítico, é o tempo que a onda de pressão leva para percorrer todo o comprimento da tubulação e retornar ao seu início. É calculado através da seguinte expressão:

$$T = \frac{2l}{C} = 4,122 \text{ s} \quad (3)$$

4.1.3 Determinação de 2ρ e de $K_1 \cdot 2l/C$

Para determinar graficamente os valores de subpressão e sobrepressão pelos ábacos de Parmakian, é necessário encontrar as constantes 2ρ e de $K_1 \cdot 2l/C$, assim:

$$2\rho = \frac{C \cdot V_0}{g \cdot H} = 2,050 \quad (4)$$

Para calcular K_1 encontra-se a vazão real do conjunto de bombas, conforme a expressão 5:

$$Q_v = V \cdot A = 26,548 \text{ ft}^3/\text{s} \quad (5)$$

Sendo assim,

$$K_1 = \frac{91600 \cdot H \cdot Q_r}{nb \cdot (PR^2) \cdot \eta \cdot r^2} = 0,139 \text{ s}^{-1} \quad (6)$$

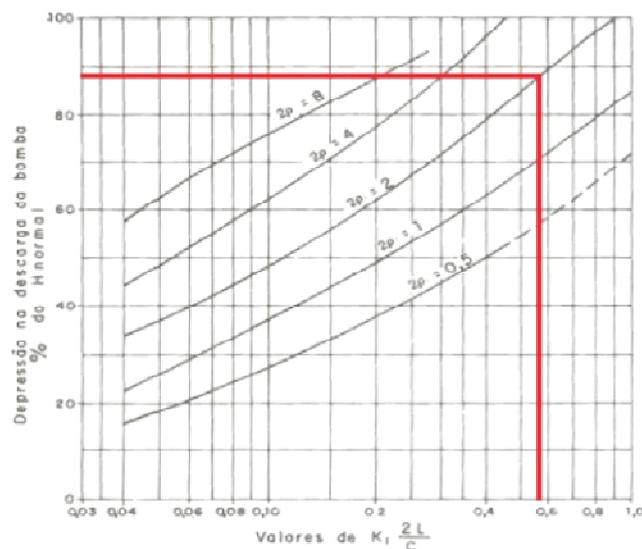
Portanto,

$$K_1 \cdot \frac{2l}{C} = 0,574 \quad (7)$$

4.1.4 Obtenção dos valores de Subpressão e Sobrepressão pelos ábacos de Parmakian

Conforme os valores obtidos nos cálculos de $2p$ e $K_1 \cdot 2l/C$, através dos ábacos de Parmakian, estimam-se os valores percentuais de subpressão e sobrepressão na descarga da bomba e na metade do encanamento.

Figura 4-1 - Ábaco de Parmakian para determinação da subpressão na descarga da bomba



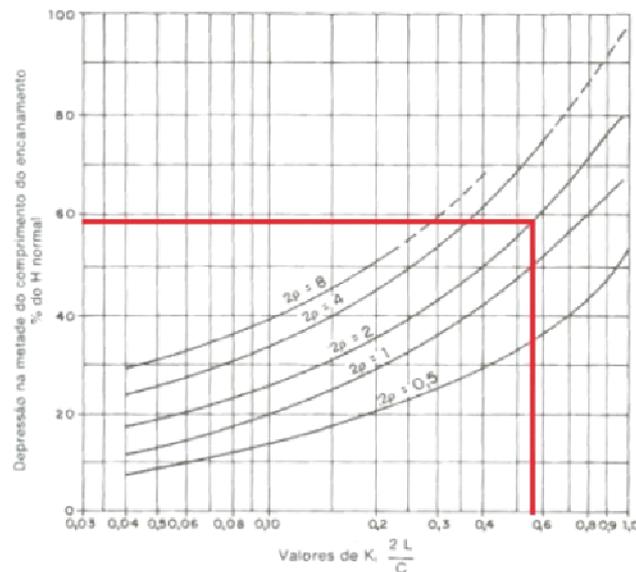
Fonte: Adaptado de MACINTYRE (1987)

De acordo com a figura 4.1, para um valor de $K_1 \cdot 2l/C = 0,574$ e $2p = 2,050$, tem-se uma depressão ou subpressão na descarga da bomba de aproximadamente 89% do valor da pressão manométrica, sendo assim:

$$\text{Subpressão na descarga da bomba} = 0,89 \times 111,0 \text{ mca} = 98,79 \text{ mca}$$

$$\text{Pressão resultante na fase de subpressão} = 111,0 - 98,79 = 12,21 \text{ mca}$$

Figura 4-2 - Ábaco de Parmakian para determinação da subpressão na metade do encanamento



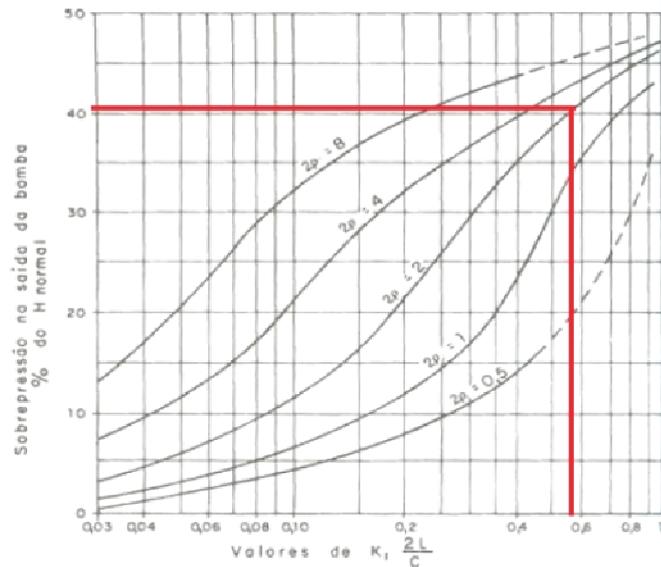
Fonte: Adaptado de MACINTYRE (1987)

De acordo com a figura 4.2, para um valor de $K_1 \cdot 2l/C = 0,574$ e $2p = 2,050$, tem-se uma depressão ou subpressão na metade do comprimento do encanamento de aproximadamente 59% do valor da pressão manométrica, desta forma:

$$\text{Pressão resultante na fase de subpressão} = 111,0 - 65,49 = 45,51 \text{ mca}$$

$$\text{Subpressão na metade do encanamento} = 0,59 \times 111,0 = 65,49 \text{ mca}$$

Figura 4-3 - Ábaco de Parmakian para determinação da sobrepressão na descarga da bomba



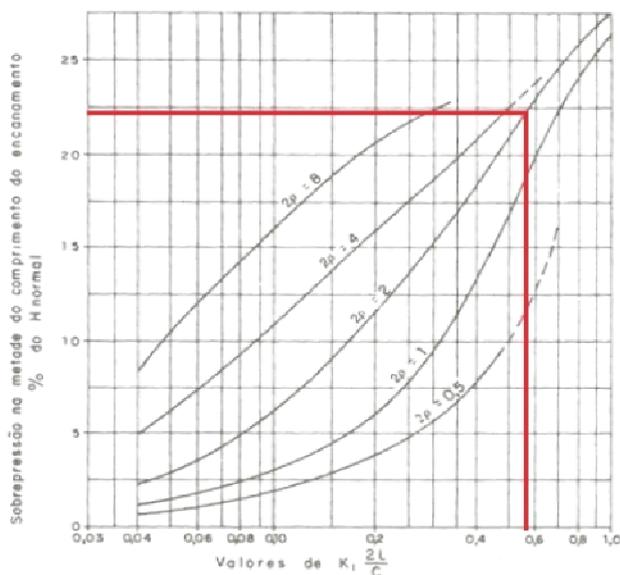
Fonte: Adaptado de MACINTYRE (1987)

De acordo com a figura 4.3, para um valor de $K_1 \cdot 2L/C = 0,574$ e $2p = 2,050$, encontra-se uma sobrepressão na saída da bomba de aproximadamente 41% do valor da pressão manométrica, sendo assim:

$$\text{Sobrepressão na saída da bomba} = 0,41 \times 111,0 = 45,51 \text{ mca}$$

$$\text{Pressão resultante na fase de sobrepressão} = 111,0 + 45,51 = 156,51 \text{ mca}$$

Figura 4-4 - Ábaco de Parmakian para determinação da sobrepressão na metade do encanamento



Fonte: Adaptado de MACINTYRE (1987)

De acordo com a figura 4.4, para um valor de $K_1 \cdot 2L/C = 0,574$ e $2\rho = 2,050$, a sobrepressão na metade do comprimento do encanamento de aproximadamente 21% do valor da pressão manométrica, assim:

$$\text{Sobrepressão na metade do encanamento} = 0,21 \times 111,0 = 23,31 \text{ mca}$$

$$\text{Pressão resultante na fase de sobrepressão} = 111,0 + 23,31 = 134,31 \text{ mca}$$

Os valores encontrados estão resumidos na tabela abaixo.

Tabela 4-1 - Resumo das pressões resultantes

Descrição	Pressão (mca)
Subpressão na descarga da bomba	12,21
Subpressão na metade da tubulação	64,49
Sobrepressão na descarga da bomba	156,51
Sobrepressão na metade da tubulação	134,31

Os valores de pressão a ser considerados para projeto são:

- Fase de subpressão: 12,21 mca
- Fase de sobrepressão: 156,51 mca

De acordo com os dados obtidos constata-se que o sistema necessita de um sistema de proteção para os equipamentos contra a propagação das ondas de pressão e um atenuador das ondas protegendo a adutora.

Conforme levantamento efetuado sobre os dispositivos de proteção, o dispositivo escolhido para impedir que as ondas de pressão se propaguem até as bombas foi a válvula de retenção. A válvula será instalada na adutora imediatamente após as bombas.

Já para a atenuação das ondas de pressão na adutora, o dispositivo escolhido foi o reservatório de ar comprimido, pois ele protege a adutora tanto contra a subpressão quanto contra a sobrepressão, estando em funcionamento em todo ciclo de funcionamento do sistema de bombeamento.

4.2 Cálculo do Reservatório de Ar Comprimido (RAC)

Para a determinação do volume do reservatório de ar comprimido, deve-se diminuir 10 m.c.a na subpressão e acrescentar 10 m.c.a na sobrepressão e na pressão manométrica (trabalho com pressões absolutas), portanto:

- Sobrepressão: 166,51 m.c.a.
- Subpressão: 2,21m.c.a.
- Pressão Manométrica: 121,00 m.c.a

A seguir, calculam-se os valores de H_{max}/H_0 e h_0/H_0 para que, através do diagrama de M. Vibert obtém-se o volume do RAC.

$$\frac{H_{max}}{H_0} = 1,376 \quad (8)$$

Onde,

- H_{\max} – Sobrepressão máxima na adutora
- H_0 – Pressão manométrica na adutora

Obtém-se h_0 através da expressão,

$$h_0 = \frac{V_0^2}{2g} = 0,294 \quad (9)$$

Onde,

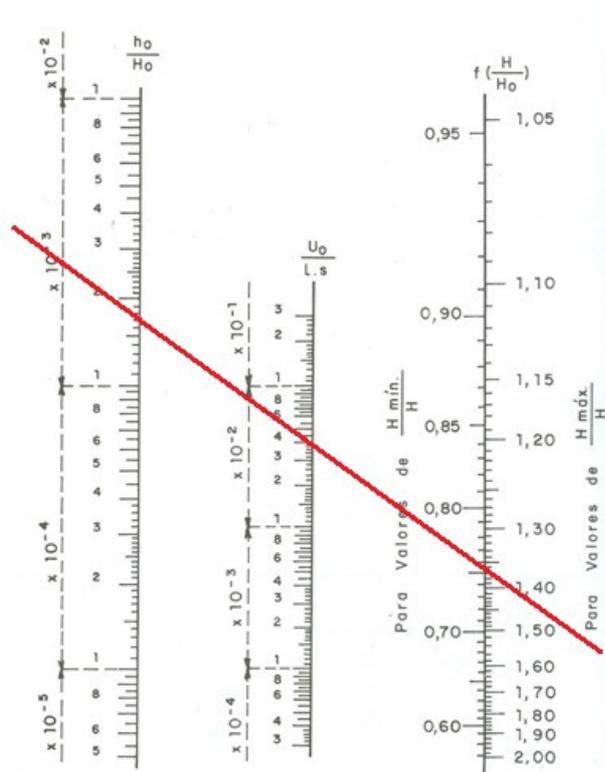
- V_0 – Velocidade de escoamento do fluido
- g – Aceleração da Gravidade

A partir de h_0 encontra-se que,

$$\frac{h_0}{H_0} = 0,00168 \quad (10)$$

No diagrama com os valores de $H_{\max}/H_0 = 1,376$ e $h_0/H_0 = 0,00168$, ligam-se estes pontos por uma reta.

Figura 4-5 - Diagrama de M. Vibert para o cálculo simplificado do Reservatório de Ar



Fonte: Adaptado de MACINTYRE (1987)

Obtem-se o valor de $U_0/l.A = 0,04$, e:

$$l.A = 2300 \times 0,376 = 865,404 \text{ m}^3 \quad (11)$$

O volume de ar dentro do RAC será,

$$U_0 = 0,04 \times 865,404 = 34,616 \text{ m}^3 \quad (12)$$

Como o reservatório tende a permanecer com 50% de água e 50% de ar comprimido o volume total do tanque será de aproximadamente 70m^3 .

Calcula-se o volume máximo de ar no tanque para certificar que este não ultrapasse o volume do reservatório encontrado. Pode-se calcular o volume máximo da depressão através da expressão:

$$U_0 \times H_0 = U_{max} \times \frac{H_{mín}}{H_0} \quad (13)$$

$$U_{max} = \frac{34,616}{0,75} = 46,154 \text{ m}^3 \quad (14)$$

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos levam a observar que:

- Há a possibilidade da existência do Golpe de Aríete nesta linha com a parada brusca do sistema de bombeamento.
- O comprimento muito significativo da linha deve atenuar a propagação e, conseqüentemente, os efeitos do Golpe (valor da celeridade). No caso desse projeto foi limitada a 50% do comprimento total
- O método de Parmakian pressupõe a inexistência do atrito. No entanto uma situação real certamente terá a altura manométrica com valor acima do desnível geométrico.
- A instalação do RAC (reservatório pressurizado de ar comprimido) tem o efeito de atenuar a propagação das ondas, funcionando como um extensor do comprimento da tubulação. De acordo com os dados obtidos constata-se que o sistema necessita de um sistema de proteção para os equipamentos contra a propagação das ondas de pressão e um atenuador das ondas protegendo a adutora. Conforme levantamento efetuado sobre os dispositivos de proteção, o dispositivo escolhido para impedir que as ondas de pressão se propaguem até as bombas é a válvula de retenção. A válvula é instalada na adutora imediatamente após as bombas.
- Segundo Macintyre (1997,p 726), “No caso de instalações de grande porte e responsabilidade é aconselhado o calculo pelo emprego das épuras de Bergeron, que conduzem a valores consideravelmente menores para o reservatório de ar, baseados na realidade do movimento ondulatório de propagação da onda de pressão”. No caso deste projeto o reservatório deve possuir 70m³ (ar + água).

O Reservatório de Ar Comprimido (RAC) alocado logo após a válvula de retenção será o ponto onde as ondas de pressão atingirão seu valor máximo. Ele atuará em

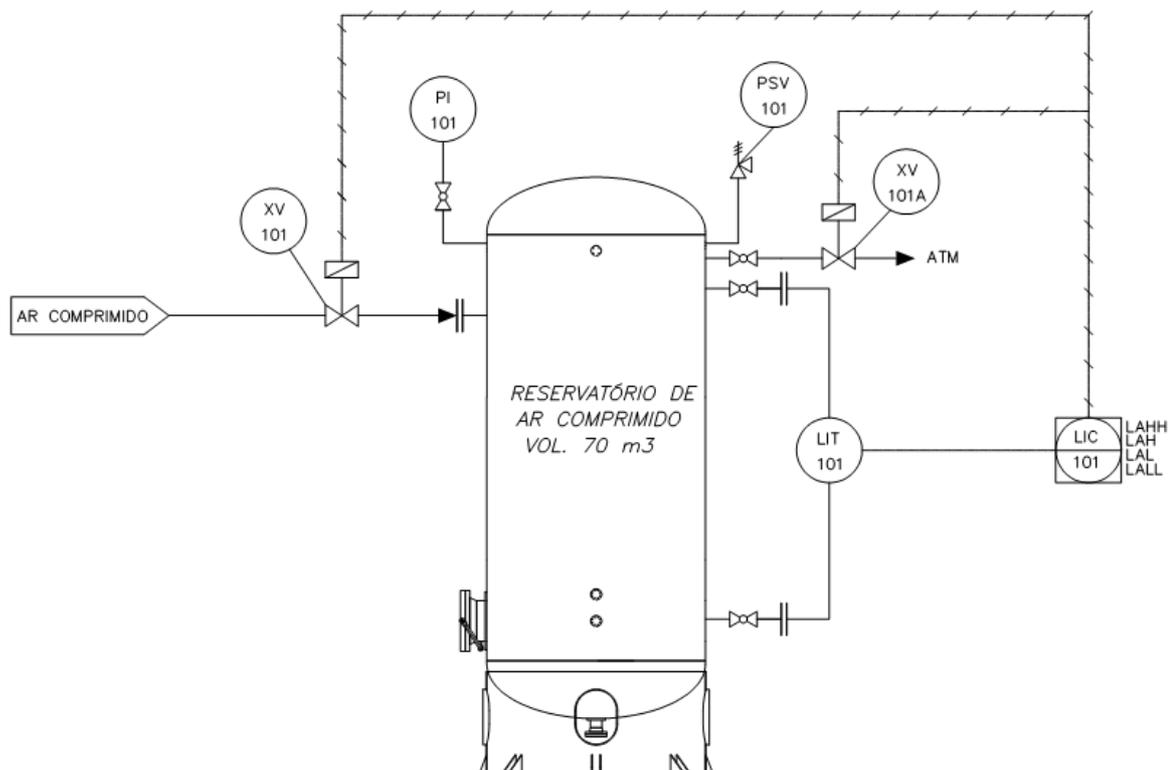
todos os processos transitórios (manobra de válvula, parada de funcionamento de uma ou mais bombas).

O RAC é dotado de um transmissor indicador de nível diferencial e duas válvulas solenoides normalmente fechadas (NF) que são responsáveis pela entrada e saída de ar comprimido no reservatório.

A figura 5.1 descreve um diagrama P&I proposto para o controle da pressão do ar no reservatório de ar comprimido (RAC) o transmissor lê o nível do reservatório e envia para o controlador do sistema. Se o nível estiver acima de 50% o controlador identifica que o sistema está passando por uma fase de sobrepressão, então envia um sinal para que a válvula solenoide de entrada se abra permitindo a entrada do ar comprimido no reservatório fazendo com que a pressão do ar empurre o líquido para a adutora produzindo um efeito de amortecimento da onda. Já em fase de subpressão, o controlador recebe o sinal do transmissor que o nível encontra-se abaixo de 50%, então envia um sinal para que a válvula solenoide de saída abra permitindo que o ar contido no reservatório escape diminuindo a pressão no interior do reservatório e assim minimizando a intensidade da onda de subpressão.

No caso de falta de energia geral (tanto para o sistema de bombeamento quanto de controle) as válvulas NF atingem a posição inicial e o controle se faz com 50% do volume total com ar atuando como um atenuador das ondas de pressão.

Figura 5-1 - Diagrama P&I de controle do Reservatório de Ar Comprimido



Fonte: Próprio Autor.

6 CONCLUSÃO

O método de Parmakian mostra-se satisfatório desde que:

- O atrito (altura manométrica) seja mínimo em relação ao desnível geométrico.
- O comprimento da tubulação, para efeito do estudo do Golpe de Aríete seja limitado até valores de atenuação total das ondas de pressão.

Mesmo com as restrições apontadas acima a presença da possibilidade do Golpe de Aríete foi notada; desta forma justifica-se a instalação do sistema auxiliar de atenuação (reservatórios pressurizados de ar comprimido). Funciona analogamente a uma tubulação de comprimento e diâmetro muito acima dos reais, promovendo a atenuação das ondas de pressão. Esse conjunto deve possuir o sistema de controle automático proposto, visto que o efeito do golpe e sua eminente possibilidade podem provocar danos catastróficos.

O método de Parmakian (1963) foi proposto numa época de menor desenvolvimento com limitação no processamento de cálculos (softwares). Atualmente a indústria de softwares específicos (por exemplo o ALLIEVI - www.ita.upv.es) desenvolve projetos específicos com valores apropriados que validam ou não cálculos de Parmakian. Portanto, o estudo da possibilidade do golpe não deve ser determinado de forma geral com restrições apontadas por Parmakian, mas por análises específicas da planta.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. B., O Golpe de Aríete em Conduitas Elevatórias - Síntese dos Conhecimentos Actuais, Memória N°550, LNEC, Lisboa 1981.

ALMEIDA, A. B., Manual de Protecção Contra o Golpe de Aríete em Conduitas Elevatórias, LNEC, Lisboa, 1982.

ALMEIDA, A. B., Protecção Contra o Golpe de Aríete, in: Manual de Saneamento Básico, Volume 1 – Elementos Gerais, Ministério do Ambiente e dos Recursos Naturais, Direcção Geral dos Recursos Naturais, Lisboa, 1990.

CHAUDRY, M. Hanif. – Applied Hydraulic Transients. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 2ª edição, 1987.

KOELLE, E. – Transientes Hidráulicos em Instalações de Conduitos Forçados. Tese de Livre Docência, EPUSP, São Paulo, 1983.

MACINTYRE, Archibald J. – Bombas e Instalações de Bombeamento, Rio de Janeiro, Editora Guanabara, 2ª Edição, 1987, 781p.

PARMAKIAN, J., Waterhammer Analysis, Dover Publications, New York, 1963.

TOMAZ, Plínio, - Golpe de aríete em bombeamento devido a queda de energia elétrica, 2007, 107p.

STREETER, Vítor L., WYLIE, E. Benjamin – Mecânica dos Fluidos, São Paulo, McGrawHill do Brasil, 1982, 585p.