



**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Unidade Araxá**

Gustavo Lucas de Sordi

Automação de Despoeiramento de Mina

Araxá-MG
2021

Gustavo Lucas de Sordi

Automação de Despoeiramento de Mina

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Automação Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador(a): Prof. Me. Frederico Duarte Fagundes
Coorientador(a): Prof. Me. Fernando Brandão

Araxá-MG
2021

Gustavo Lucas de Sordi

Automação de Despoeiramento de Mina

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Automação Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

BANCA AVALIADORA

Presidente e Orientador: Prof. Me. Frederico Duarte Fagundes
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

Coorientador: Prof. Me. Fernando Brandão
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

Membro titular: Prof. Dr. Admarço Vieira da Costa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

Membro titular: Prof. Dr. Alexandre Moraes de Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

Araxá
12 de abril de 2021.

Aos meus pais, que foram a base para que eu pudesse alcançar este objetivo.

À minha namorada, que esteve comigo em todos os momentos do curso.

Aos meus amigos, que fizeram do curso um momento alegre que será lembrado eternamente.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sem ele não haveria razão para existir.

Aos meus pais, pela educação que me deram, por todos os sacrifícios e esforços que fizeram para que eu pudesse alcançar este objetivo. Eles foram e continuam sendo a base das minhas conquistas.

Aos meus orientadores, Prof. Me. Frederico Duarte Fagundes e Prof. Me. Fernando Brandão, por todas as muitas horas dedicadas a este trabalho. Sem eles nada do que foi feito seria possível.

À Profa. Dra. Érica Daniela de Araújo, pelo apoio dado à elaboração deste trabalho.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Admarço Vieira da Costa e Prof. Dr. Alexandre Morais de Oliveira, por terem aceito participar da avaliação desta proposta.

*“Porque o Senhor dá a sabedoria,
e da sua boca vem o conhecimento e o entendimento.”*
Provérbios 2:6

RESUMO

A formação de poeira em ambientes de mineração é um problema inerente às indústrias mineradoras. A poeira formada em grande escala representa perigos aos trabalhadores da mina e aos moradores das regiões próximas ao ambiente de mineração, como riscos à saúde e ao meio ambiente, além de, muitas vezes, interromper a atividade e os processos de operação. O meio convencional utilizado pelas indústrias para solucionar esse problema parte da utilização de caminhões pipa para irrigar o solo, evitando a formação de poeira. Esse método gera prejuízo ambiental, uma vez que os caminhões consomem combustíveis fósseis, se mostrando, pois, ineficiente e financeiramente oneroso. Ante a este contexto, com esta pesquisa, objetiva-se desenvolver um sistema de despoieiramento automatizado, análogo aos sistemas de irrigação agrícola. Para isso, lida-se com a topografia hipotética de uma indústria mineradora, por meio da qual se gerou os dados analisados. Para obtenção desses dados, elaborou-se: (i) um *layout* de ligação hidráulica; (ii) a especificação hidráulica do sistema; (iii) a escolha de equipamentos, como válvulas e bombas hidráulicas; (iv) o dimensionamento elétrico do projeto, como a quantidade e o diâmetro dos condutores elétricos; (v) a escolha de um Controlador Lógico Programável e dimensionamento de módulos auxiliares. Após concluídas essas etapas, verificou-se que é possível elaborar um sistema automatizado para o Despoeiramento de Minas e que a metodologia empregada pode ser um caminho viável para projetos deste escopo.

Palavras-chave: Automação. Mineração. Despoeiramento. Umectação. Irrigação.

ABSTRACT

The formation of dust in mining environments is an inherent problem in the mining industries. Dust formed on a large scale poses dangers to mine workers and residents of regions close to the mining environment, such as health and environmental risks, in addition to often interrupting activity and operating processes. The conventional means used by the industries to solve this problem comes from the use of water trucks to irrigate the soil, avoiding the formation of dust. This method generates environmental damage, since trucks consume fossil fuels, thus proving to be inefficient and financially costly. In this context, this research aims to develop an automated dedusting system, analogous to agricultural irrigation systems. For this, we deal with the hypothetical topography of a mining industry, through which the analyzed data was generated. To obtain these data, we elaborated: (i) a hydraulic connection layout; (ii) the hydraulic specification of the system; (iii) the choice of equipment, such as valves and hydraulic pumps; (iv) the electrical dimensioning of the project, such as the number and diameter of the electrical conductors; (v) the choice of a Programmable Logic Controller and dimensioning of auxiliary modules. After completing these steps, it was found that it is possible to develop an automated system for the Dedusting of Mines and that the methodology used can be a viable path for projects of this scope.

Keywords: Automation. Mining. Dedusting. Wetting. Irrigation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Nuvem de poeira em uma indústria mineradora na cidade de Rio Largo/AL	3
Figura 2 - Sistema de Despoeiramento Automatizado Da Indústria Vale - Mina De Água Limpa - Rio Piracicaba / MG.....	5
Figura 3 - Sistema de Despoeiramento Automatizado Da Indústria Vale - Mina De Fábrica - Congonhas / MG.....	6
Figura 4 - Caminhão pipa realizando o processo de umectação da via.....	9
Figura 5 - Caminhão pipa realizando processos de limpeza em uma indústria de mineração.	10
Figura 6 - Exemplo de alturas geométricas de reservatório.	11
Figura 7 - Tipos de condutores.	20
Figura 8 - Condutor unipolar.	21
Figura 9 - Condutor multipolar.....	21
Figura 10 - Representação de um sistema de controle.	24
Figura 11 - Etapas de supervisão e controle utilizando CLP.....	25
Figura 12 - Aspersor Rain Bird Série 3000.	29
Figura 13 - Condição A.	30
Figura 14 - Condição B.	31
Figura 15 - Condição C.	31
Figura 16 - <i>Layout 1</i> (Aspersores Individuais).....	32
Figura 17 - <i>Layout 2</i> (Conjunto com Dois Aspersores).....	33
Figura 18 - <i>Layout 3</i> (Conjunto com Quatro Aspersores).	33
Figura 19 - Bomba Hidráulica Modelo ME-3.	40
Figura 20 - Válvula Solenoide 3" Asco Serie 8210.....	41
Figura 21 - CLP SIMATIC S7-1200	43
Figura 22 - CPU e Módulos selecionados	43
Figura 23 - Esquema de conexão entre CLP e Válvulas	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Margem de Segurança para motores elétricos.....	18
Tabela 2 – Temperatura característica dos condutores.....	22

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Coeficiente de Hazen-Wiiliams (C) para diferentes tipos de materiais.....	14
Quadro 2 - Perda de Carga Localizada.....	15
Quadro 3 - Momento elétrico.	23
Quadro 4 - Dados de desempenho do aspersor Rain Bird Série 3000.	29
Quadro 5 – Curvas Utilizadas por <i>Layout</i>	34
Quadro 6 - Dados Técnicos Elétricos da Válvula 8210	41
Quadro 7 - Resultados do Cálculo de Bitola dos Condutores.....	45
Quadro 8 - Resumo de Peças e Equipamentos	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMT	Altura Manométrica Total
ANM	Agência Nacional de Mineração
CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	<i>Central Process Unit</i>
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EPC	Equipamento de Proteção Coletiva
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PIB	Produto Interno Bruto

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	Peso específico do fluído.
Ps	Pressão entre os reservatórios de sucção
R	Resistência elétrica do condutor
Zd	Níveis do reservatório de descarga
Zs	Níveis do reservatório de sucção
D	Diâmetro Interno da Tubulação
Ep	Energia de pressão;
N/m^2	Newton por metro ao quadrado
P	Pressão atuante em um ponto do fluido;
Pa	Pascal
Pd	Pressão entre os reservatórios de descarga
H	Altura Geométrica
Hl	Perdas de carga na rede localizada
Hpc	Perdas de carga na rede distribuída
C	Coeficiente de Hazen-Willians

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 Impacto da Poeira no Meio Ambiente, na Saúde e nas Operações de Mina	7
2.2 Método Convencional para Despoeiramento	9
2.3 Especificação Hidráulica	10
2.4 Aspersores, Tubulações, Válvulas e Bombas.....	16
2.5 Dimensionamento Elétrico	20
2.6 Automação de Sistemas.....	23
3 METODOLOGIA.....	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1 Concepção do Projeto.....	28
4.2 Especificação Hidráulica	34
4.2.1 Dimensionamento da Tubulação e Cálculo da Perda de Carga.....	35
4.2.2 Dimensionamento da Bomba Hidráulica e Válvulas.....	40
4.3 Dimensionamento do Sistema de Controle	41
4.4 Dimensionamento Elétrico	44
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS	50
APÊNDICE 1 – PROJETO BÁSICO DO SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO AUTOMATIZADO	52

1 INTRODUÇÃO

A mineração é um dos pilares da economia nacional. Sua importância no Brasil pode ser evidenciada por meio de dados fornecidos pela Agência Nacional de Mineração (ANM, 2020), os quais evidenciam que a mineração gera 175 mil empregos diretos e 569 mil empregos na transformação mineral, representa 4% do PIB (Produto Interno Bruto) e é responsável por 25% do saldo comercial do país.

Frente a esses dados, é de se esperar que um segmento tão significativo para a economia brasileira possua desafios para manter seu nível de produção. Um dos grandes desafios encontrados *in loco* é a formação de poeira nos ambientes de mineração. Essa ocorre por inúmeras causas, mas, em geral, está relacionada à retirada da vegetação, deixando o solo com índices baixos de umidade, como explicou Neto (2013). Esse ambiente, unido ao forte tráfego de maquinário pesado e ao próprio ato da escavação, torna-se vulnerável ao surgimento de uma alta taxa de material particulado suspenso no ar, chamado rotineiramente de poeira, como mostra Silva (2018).

A formação de poeira normalmente ocorre em escalas muito acima do que é comumente encontrado em ambientes industriais, muitas vezes formando nuvens densas que são capazes de parar a produção. Essas nuvens de poeira dificultam a visualização a médias e a grandes distâncias, impossibilitando, assim, o tráfego de veículos, conforme ilustrado pela Figura 1.

Figura 1 - Nuvem de poeira em uma indústria mineradora na cidade de Rio Largo/AL.



Fonte: Rain Bird (2016).

A poeira, segundo Thompson et al. (1997 apud SILVA, 2018), conforme estudo realizado na África do Sul, é a principal causa de acidentes que ocorrem nas minas a céu aberto. Além do risco de acidentes, a poeira pode ser tratada pela ótica da saúde ocupacional. Conforme Neto (2013), a presença de poeira no organismo está relacionada à hipertensão, acidentes vasculares, problemas respiratórios e cardíacos. Borges et al., (2016), no entanto, asseveram que os impactos da poeira na saúde humana variam conforme o grau de toxicidade do material particulado. Portanto, deve-se considerar a poeira um risco à saúde dos trabalhadores da mina e dos moradores ao redor:

Um dos maiores transtornos sofridos pelos habitantes próximos às minerações relaciona-se com a poeira. Esta pode ter origem tanto nos trabalhos de perfuração da rocha como nas etapas de beneficiamento e do transporte da produção. Essa poeira apresenta uma fração muito fina, que fica durante muitas horas em suspensão no ar, espalhando-se por extensas áreas (NETO, 2013, p. 68).

Sobre isso, conforme aponta Gunson et al. (2011 apud SILVA, 2018), dados os riscos à saúde humana e os possíveis transtornos no ambiente de mineração (acidentes), as indústrias utilizam um método convencional para reduzir a formação de poeira (processo conhecido como despoeiramento). Esse processo consiste em realizar a umectação das áreas propensas à formação de material particulado suspenso. Ainda conforme o autor, esse processo é realizado fazendo-se uso de caminhões pipa que trafegam pelas vias da mina irrigando o solo, mantendo-o úmido.

A solução descrita por Gunson et al. (2011 apud SILVA, 2018), a partir do uso de caminhões pipa, apresenta dois problemas:: (i) aumento no número de veículos circulando pela mina e, consequentemente, do tráfego; e(ii) aumento na emissão de gases poluentes, uma vez que tais caminhões são movidos a base de combustíveis fósseis (óleo diesel). Além disso, é possível que, haja vista que a operação do caminhão pipa é realizada por operadores humanos e o trajeto desse caminhão na via não é fixo, a eficiência do processo de umectação da via não seja adequada.

Ante ao cenário descrito, o seguinte questionamento de pesquisa foi proposto: é possível desenvolver um sistema automatizado para realizar a umectação das vias de uma mina a céu aberto? Para responder a essa pergunta, com esta pesquisa, por meio da projeção de uma mina

hipotética, com dados de topografia escolhidos com base em consultas informais a dados de minas existentes na região de Araxá-MG, intenta-se: elaborar um sistema de despoeiramento automatizado, aplicado a ambientes de mineração. Logo, aventa-se como hipótese de pesquisa que, se se criar um sistema de despoeiramento automatizado para realizar a umectação da via de maneira autônoma, será possível resolver esse entrave, eliminando os prejuízos que estão atrelados ao uso de caminhões pipa.

Para tanto, delineou-se como objetivos específicos deste trabalho:

- Elaborar a projeção de uma mina a céu aberto hipotética;
- Analisar os requisitos para a especificação hidráulica para a implantação do sistema de despoeiramento pretendido;
- Analisar os requisitos para o dimensionamento dos condutores elétricos e eletrodutos;
- Conceber um *layout* de montagem de um sistema de despoeiramento automatizado;
- Analisar a escolha de um Controlador Lógico Programável (CLP).

Esse sistema funcionará analogamente a um sistema de irrigação e é controlado via Controlador Lógico Programável, com auxílio de válvulas e aspersores especificados no decorrer deste trabalho. As Figura 2 e Figura 3 exemplificam o funcionamento deste sistema.

Figura 2 - Sistema de Despoeiramento Automatizado Da Indústria Vale - Mina De Água Limpa - Rio Piracicaba / MG.



Fonte: Rain Bird (2016).

Figura 3 - Sistema de Despoeiramento Automatizado Da Indústria Vale - Mina De Fábrica - Congonhas / MG.



Fonte: Rain Bird (2016).

É importante salientar que é de conhecimento dos autores deste trabalho que existem sistemas de despoeiramento via umectação automatizados, que eliminam ou reduzem a utilização de caminhões pipa em uso por indústrias mineradoras. Todavia, com base em uma pesquisa nos bancos de dados de artigos científicos Scielo e Web Of Science foram encontrados poucos estudos sobre esses projetos em língua portuguesa, fato que justifica esta empreitada. Ademais, este trabalho se faz necessário pois a) a poeira representa um risco à saúde dos trabalhadores de minas a céu aberto e dos moradores do entorno; b) o sistema de despoeiramento convencional traz consigo uma série de prejuízos e representa um aumento na emissão de gases poluentes; e c) existe pouca literatura científica envolvendo automação do sistema de despoeiramento de minas.

A fim de realizar a investigação aqui apresentada, este trabalho está estruturado em três capítulos, além desta introdução e das considerações finais. No segundo capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os principais conceitos implicados nessa proposta de pesquisa, entre eles, cita-se os impactos da poeira no Meio Ambiente, na Saúde e nas Operações de Mina, o método convencional para o despoeiramento, sistemas hidráulicos, elétricos e de controle. No terceiro capítulo, detalha-se a metodologia utilizada neste estudo, a qual envolve, a partir da projeção de uma mina hipotética, as etapas da especificação hidráulica, dimensionamento elétrico e de controle. No quarto capítulo, analisa-se os dados coletados e discute-se os resultados obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda os conceitos e fundamentos necessários para a compreensão dos impactos da poeira na saúde, no meio ambiente e na Operações de Mina. Ademais, expõe-se os meios convencionais utilizados para o processo de despoieiramento, fundamentos relacionados à especificação hidráulica e conceitos relativos ao controle e à automação.

2.1 Impacto da Poeira no Meio Ambiente, na Saúde e nas Operações de Mina

De acordo com Neto (2013), o ambiente de mineração é propício à formação de poeira devido, por exemplo, ao uso de explosivos para a fragmentação de rochas, ao transporte em vias principais e secundárias da lavra e ao beneficiamento do minério, que geram material particulado em grande quantidade, sendo um risco iminente à integridade da atmosfera.

Sobre isso, Neto (2013) mostra que a mineração do tipo “lavra a céu aberto” representa um risco ainda maior para a formação de poeira, uma vez que, nesse tipo de lavra, não há barreiras físicas para a contenção dessas partículas, o que facilita sua dispersão por centenas de metros, atingindo comunidades próximas. Ademais, segundo Neto (2013), a poeira oriunda da atividade mineradora é constituída, em geral, por um material muito fino, o que faz com que tais elementos permaneçam suspensos durante longos períodos no ar, aumentando a extensão da área atingida. A atmosfera, dessa forma, é severamente afetada, o que gera consequências em cascata sobre todos os seres presentes na região afetada, incluindo plantas e animais.

Além do meio ambiente, a saúde dos trabalhadores e da população local também sofre risco com o surgimento de poeira oriunda da mineração. Souza e Quelhas (2003) apontam que os efeitos da poeira variam conforme o teor do material particulado suspenso no ar. Borges et al. (2016), por seu turno, evidenciam que se deve levar em conta o grau de toxicidade do material particulado, para se determinar os impactos que a poeira gera na saúde do ser humano exposto. Todavia, assim como Neto (2013), os autores citados anteriormente concordam que a poeira representa perigos à saúde humana, podendo gerar hipertensão, acidentes vasculares, problemas respiratórios e cardíacos.

Tendo em vista que a poeira na mineração ocorre em um ambiente de trabalho dos operadores da mina, Borges et al. (2016) a classifica como um problema de saúde ocupacional, tornando-a possível alvo de estudos no campo da medicina do trabalho. Esses riscos se agravam

pois, conforme Souza e Quelhas (2003) constataram, os trabalhadores não possuem o hábito de fazer o uso de EPIs (Equipamentos de Proteção Individual), como máscaras de proteção contra poeira. Nas palavras desses autores, “[...] nas poucas vezes em que algum deles (trabalhadores) utilizava uma máscara, ou a máscara não era a adequada ou a mesma já não vinha sendo substituída há muito tempo” (SOUZA; QUELHAS, 2003, p. 805).

Outro impacto importante de ser mencionado refere-se à formação de poeira em nuvens densas, as quais limitam a visão dos trabalhadores a médias e longas distâncias. Isso, aliado ao fato de que as minas do tipo “lavra a céu aberto” possuem tráfego intenso de maquinário pesado, pode representar um grave transtorno, como dito por Silva (2018), uma vez que, por medidas de segurança, a velocidade do tráfego dos veículos é reduzida ou, mesmo, o tráfego é interrompido até que a poeira se disperse.

Em ambientes de mineração, 74% dos acidentes são relacionados ao transporte. Nesse contexto, a poeira é a principal geradora de acidentes, justamente por reduzir a visibilidade dos motoristas e operadores de máquinas (THOMPSON et al., 1997 apud SILVA, 2018). O acidente não só causa riscos à saúde humana como também danifica os equipamentos, os veículos e as máquinas da indústria, aumentando os custos de manutenção. A entrada de poeira no motor e em outros equipamentos “resulta em taxas elevadas de desgaste e manutenção mais frequente de veículos” (SILVA, 2018).

Uma saída para a dificuldade no uso de EPIs e para os problemas relacionados ao transporte é a implantação de EPCs (Equipamentos de Proteção Coletiva). Tais equipamentos são capazes de garantir a segurança e diminuir o risco iminente a um grupo de trabalhadores e são menos suscetíveis ao mau uso por parte dos funcionários (SOUZA; QUELHAS, 2003). O EPC, indicado por Souza e Quelhas (2003) e por Neto (2013) para a resolução do problema da poeira em mineradora consiste na umectação de ambientes suscetíveis ao surgimento dessas partículas, por meio da irrigação do solo ou da superfície em questão.

Por fim, é importante salientar que, no Brasil, existe a Norma Regulamentadora do Ministério do Trabalho e Emprego sobre Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração, a qual trata sobre Proteção contra Poeira Mineral. Segundo essa Norma, “quando ultrapassados os limites de tolerância à exposição a poeiras minerais, devem ser adotadas medidas técnicas e administrativas que, reduzam, eliminem ou neutralizem seus efeitos sobre a saúde dos trabalhadores e considerados os níveis de ação estabelecidos nesta Norma” (BRASIL, 2019). Assim, a implantação de sistemas de despoieiramento, além de representar uma preocupação

ambiental, com a saúde ocupacional e com os índices de produção, também é fator decisivo para o cumprimento da legislação brasileira vigente.

2.2 Método Convencional para Despoeiramento

A utilização de métodos para reduzir ou mesmo eliminar a formação de poeira é frequente em indústrias de mineração, uma vez que, conforme abordado, a poeira possui impactos no meio ambiente, na saúde do trabalhador e na mineração em geral. Assim, o método mais usado por indústrias de mineração, conforme Silva (2018) e Neto (2013), é a umectação das vias com uso de caminhão pipa, que pode ser definido por:

[...] caminhão adaptado com um tanque acoplado de alta capacidade e que possui um sistema de bombeamento de água do tanque para o meio ambiente através de aspersores e/ou orifícios específicos, cuja finalidade principal é evitar que haja a suspensão de particulado no decorrer das operações. (SILVA, 2018, p. 22)

O processo de umectação das vias para a realização do despoeiramento, segundo Silva (2018), tem início no abastecimento do caminhão pipa em pontos localizados na mina. Em seguida, o caminhão pipa percorre a extensão da mina jateando água no solo. A forma do jato pode variar conforme o modelo da estrutura de irrigação disposta no caminhão: o jato pode partir da parte traseira, frontal e/ou pelas laterais do caminhão. Também há variações no tipo de aspersor da água, causando variações no formato do jato d'água que o caminhão pipa irá dispor. O princípio de funcionamento, no entanto, permanece o mesmo em todos esses casos. Um exemplo de caminhão pipa pode ser visto na

Figura 4.

Figura 4 - Caminhão pipa realizando o processo de umectação da via.



Fonte: Silva (2018).

Os caminhões pipa também podem ser utilizados para outras finalidades em uma indústria de mineração, como, por exemplo, a limpeza de pátios, tal como ilustra na Figura 5.

Figura 5 - Caminhão pipa realizando processos de limpeza em uma indústria de mineração.



Fonte: Silva (2018).

É preciso, contudo, levar em conta, conforme Ribeiro e Horta (s.d.), alguns pontos negativos do sistema convencional com uso de caminhões pipa, quais sejam:

- Utilização de combustível altamente poluente (óleo diesel);
- Uso não controlado da água – o operador do caminhão define a quantidade de água a ser utilizada no processo de umectação;
- Interferência no tráfego de veículos;
- Necessidade de mão de obra para a operação (motorista do caminhão).

Diante disso, o estudo de processos de irrigação automatizados mostra-se necessário, haja vista que o método em uso, na maioria dos casos, gera outros problemas. Por conseguinte, faz-se necessário uma abordagem relativa aos conceitos de hidráulica e mecânica dos fluidos, uma vez que a especificação de um sistema de irrigação está diretamente ligado a estes conceitos.

2.3 Especificação do Sistema Hidráulico

Alguns conceitos se tornam fundamentais quando se trata de Projetos Hidráulicos, tais como fluido, hidráulica, pressão, altura manométrica, entre outros.

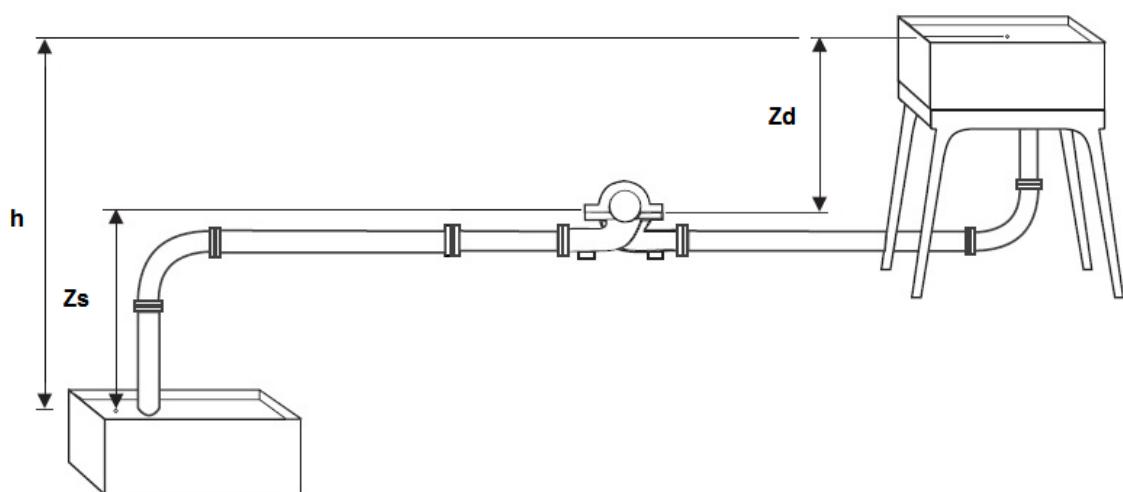
Por fluido, segundo Fialho (2019, p. 17), compreende-se “uma substância contínua e amorfa, cujas moléculas se movem livremente umas para as outras, sendo, portanto, capaz de escoar e apresentando a tendência de assumir forma do recipiente que a contém”. Ainda segundo o mesmo autor, hidráulica é um ramo da física que estuda líquidos em movimento e em repouso, sendo responsável por diversas leis que regem o comportamento de um fluido e suas variáveis. Por seu turno, por pressão compreende-se “a força exercida pelo fluido por unidade de área do recipiente que o contém”. Para medir a pressão, pode-se utilizar N/m² (Newton por metro ao quadrado), Pa (Pascal), entre outras.

Outro conceito importante para a especificação hidráulica é a altura manométrica. Segundo De Mattos e De Falco (1998), é possível compreender a altura manométrica do sistema como sendo a energia que o sistema vai requisitar da bomba para, em determinada vazão, ser possível transferir o fluido de um ponto a outro. O autor explica que são três fatores determinantes para o cálculo dessa perda de carga e a determinação da altura manométrica total (AMT): (i) altura geométrica (H), (ii) diferença de pressão entre os reservatórios de descarga (Pd) e a sucção (Ps) e (iii) as perdas de carga na rede distribuída (Hpc) e localizada (HI).

A altura geométrica do sistema é representada pela diferença entre os níveis do reservatório de sucção (Zs) e descarga (Zd). A referência para a localização do nível é o centro do rotor da bomba (

Figura 6), conforme Souza (2014).

Figura 6 - Exemplo de alturas geométricas de reservatório.



Fonte: Souza (2014).

Conforme demonstrou de Souza (2014), é possível afirmar que a variação da pressão nos reservatórios de sucção (P_s) e de descarga (P_d) também deve ser levada em conta para o cálculo da AMT, uma vez que a pressão está diretamente ligada à energia de um fluido, como mostra a Equação 1:

$$Ep = P / \gamma \quad (1)$$

Em que:

- Ep – Energia de pressão;
- P – Pressão atuante em um ponto do fluido;
- γ – Peso específico do fluído.

Levando em consideração que: (i) o peso específico é algo inerente ao tipo de fluido em escoamento; (ii) não deve haver mudanças no tipo desse fluido e (iii) quaisquer tipos de perdas de energia por atrito devem ser excluídas, pode-se determinar a variação da energia no reservatório de sucção e de recalque como sendo a diferença entre as pressões de sucção e recalque.

Segundo Brunetti (2008), a perda de carga compreende a transformação de energia mecânica do sistema em outros tipos de energia, como térmica, quando o fluido percorre acessórios conectados à rede hidráulica, como válvulas, curvas e conexões. A perda de carga (H_f) pode ser escrita como a soma das perdas de carga distribuídas e localizadas. De acordo com Carvalho (2004), a perda de carga distribuída é a transformação da energia mecânica do movimento de um fluido em energia térmica, devido à ação do atrito nas paredes da tubulação. Ela ocorre em trechos retos, cuja tubulação possua diâmetro uniforme.

A perda de carga distribuída pode ser definida por diversos métodos. Um dos mais conhecidos é a equação de Hazen-Williams. Essa equação foi desenvolvida para o fluxo de água em tubos maiores ($D > 5$ cm), dentro de uma faixa moderada de velocidade ($V < 3$ m/s). Segundo Carvalho (2004), a fórmula de Hazen-Williams foi obtida por meio de um estudo estatístico e amplamente aprovado na prática, o que valida seu uso e o define como um método confiável para o cálculo das perdas de carga distribuídas. Não foi do intuito deste trabalho realizar uma comparação entre métodos utilizados para o cálculo da perda de carga, sendo um ponto de pesquisa para futuros trabalhos.

Com unidades do sistema internacional de medidas, a equação tem a seguinte forma:

$$H_{PC} = 10,643.Q^{1,85}.C^{-1,85}.D^{-4,87}.L \quad (2)$$

Em que:

- Q – Vazão (m^3/s)
- H_{PC} – Perda de Carga na Tubulação Forçada (mca)
- C – Coeficiente de Hazen-Willians (Quadro 1)
- D – Diâmetro Interno da Tubulação (m)
- L – Comprimento da Tubulação Reta (m)

Os valores do coeficiente (C) podem ser encontrados por meio de quadros, tais como o exemplificado no Quadro 1. Analisando a Equação 1, pode-se perceber que, quanto maior for o coeficiente C, menor será a perda de carga na tubulação. Assim, na elaboração de projetos, é preferível a escolha de materiais que possuam um alto coeficiente C.

Quadro 1 – Coeficiente de Hazen-Willians (C) para diferentes tipos de materiais.

Material	C
Aço corrugado (chapa ondulada)	60
Aço com juntas lock-bar, em serviço	90
Aço rebilado, tubos novos	110
Aço soldado, tubos novos	130
Aço soldado com revestimento especial	130
Concreto, bom acabamento	130
Ferro fundido, novos	130
Ferro fundido, usados	90
Madeiras cm aduelas	120
Aço com juntas lock-bar, tubos novos	130
Aço galvanizado	125
Aço rebitado, em uso	85

Aço soldado, cm uso	90
Cobre	130
Concreto, acabamento comum	120
Ferro fundido, após 15-20 anos de uso	100
Ferro fundido revestido de cimento	130
Tubos extrudados, P.V.C.	150

Fonte: Adaptado de Carvalho (2004).

Existem métodos matemáticos para se encontrar a perda de carga localizada em cada componente do sistema. Todavia, tais métodos são demasiadamente complexos, por isso, frequentemente, é feito o uso de um método mais simples, como explica Souza (2014): o método do comprimento equivalente.

Esse método permite encontrar os valores de perda de carga localizada para diferentes tipos de conexões, a partir do tamanho da conexão, do tipo de material e do tipo de fluido que escoará pela tubulação. Cada conexão possuirá um valor equivalente de comprimento, em metros. A soma dos comprimentos equivalentes de todos as conexões deve ser acrescida ao comprimento total da tubulação e aplicada à fórmula utilizada para o cálculo de perda de carga distribuída, conforme Brunetti (2008).

Quadro 2 - Perda de Carga Localizada.

Comprimentos Equivalentes em Conexões										
Conexão		Diâmetro nominal X Equivalência em metros de canalização								
	Material	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	5"
Curva 90°	PVC	0,5	0,6	0,7	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,9
	Metal	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,3	1,6	2,1
Curva 45°	PVC	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
	Metal	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9
Joelho 90°	PVC	1,2	1,5	2,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,3	4,9
	Metal	0,7	0,8	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	3,4	4,2
Joelho 45°	PVC	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	2,5
	Metal	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,2	1,5	1,9
Té de Passagem Direta	PVC	0,8	0,9	1,5	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	3,3
	Metal	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	2,1	2,7
Té de Saída Lateral	PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3	10,0
	Metal	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4
Té de Saída Bilateral	PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3	10,0
	Metal	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4
União	PVC	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,2	0,25
	Metal	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04
Saída da Canalização	PVC	0,9	1,3	1,4	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,9
	Metal	0,5	0,7	0,9	1,0	1,5	1,9	2,2	3,2	4,0
Luva de Redução (*)	PVC	0,3	0,2	0,15	0,4	0,7	0,8	0,85	0,95	1,2
	Aço	0,29	0,16	0,12	0,38	0,64	0,71	0,78	0,9	1,07
Registro de Gaveta ou Esfera Aberto	PVC	0,2	0,3	0,4	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1
	Metal	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9
Registro de Globo Aberto	Metal	6,7	8,2	11,3	13,4	17,4	21,0	26,0	34,0	43,0
	Metal	3,6	4,6	5,6	6,7	8,5	10,0	13,0	17,0	21,0
Válvula de P4 com Crivo	PVC	9,5	13,3	15,3	18,3	23,7	25,0	26,8	28,8	37,4
	Metal	5,6	7,3	10,0	11,6	14,0	17,0	22,0	23,0	30,0
Válvula de Retenção	Horizontal	Metal	1,6	2,1	2,7	3,2	4,2	5,2	6,3	6,4
	Vertical	Metal	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4	8,1	9,7	12,9
Observações: 1 - Os valores acima estão de acordo com a NBR-5626/82 e Tabela de Perda de Carga da Tigre para PVC rígido e cobre, e NBR-92/80 e Tabela de Perda de Carga Tupy para ferro fundido galvanizado, bronze ou latão. 2 - (*) Os diâmetros indicados referem-se à menor bitola de reduções concêntricas, com fluxo da maior para a menor bitola, sendo a bitola maior uma medida acima da menor. Ex.: 1 1/4" x 1" – 1 1/2" x 1 1/4".										

Fonte: Shneider (2010).

As perdas de carga totais representam a somatória das perdas de carga distribuída (Hpc) e localizada (Hl), de modo que:

$$Hf = Hpc + Hl \quad (3)$$

Assim, pode-se definir a AMT como sendo:

$$AMT = Zd - Zs + Hf + (Pd/\gamma) - (Ps/\gamma) \quad (4)$$

2.4 Aspersores, Tubulações, Válvulas e Bombas

Para a elaboração de qualquer circuito hidráulico destinado à irrigação, é necessária a compreensão de alguns acessórios inerentes à rede.

Primeiramente, com relação aos aspersores, pode-se defini-los como sendo equipamentos utilizados no processo de irrigação. Eles recebem o fluido a uma pressão e vazão específicas e, com isso, são capazes de direcionar o fluxo de maneiras distintas, conforme a necessidade do sistema. Esse equipamento é classificado levando em conta seu funcionamento. Há os aspersores rotativos, quando uma engrenagem é responsável por movimentar o jato na região irrigada. Há os aspersores fixos, quando não há movimento do jato. Além disso, no que concerne ao ângulo de ação, os aspersores podem ter ângulo completo, quando o ângulo do movimento é de 360° ou ângulo setorial, quando o ângulo se limita a uma faixa de ação. No tocante ao ângulo de inclinação, os aspersores contam com inclinação normal, quando o jato é lançado de modo a atingir todo um segmento da área ou sub-copa, quando o jato não atinge a copa de plantas, no caso de irrigação em agriculturas. Ademais, é possível selecionar os aspersores quanto ao número de bocais e quanto à pressão de operação e distância do jato.

Com relação às tubulações existem inúmeros tipos diferentes, os quais se diferem pelo tipo de material, montagem e aplicação. É de conhecimento dos autores deste trabalho que o tipo de tubo PEAD é amplamente utilizado em indústrias de mineração. Os benefícios no uso desses tubos, segundo Danieletto (2007), são:

- Maior leveza (PEAD 60% mais leve do que tubos de ferro fundido de dimensões semelhantes);
- Maior flexibilidade (quando comparados com tubos de aço e à base de polietileno);
- Rugosidade baixíssima (coeficiente C = 150);
- Elevada resistência ao impacto;
- Resistência à maioria dos agentes químicos;
- Imunidade total a corrosão eletrolítica e galvânica;
- Reduzido número de juntas;
- Impermeável;
- Atóxico;
- Fácil manuseio e instalação;

- Baixíssimo efeito de incrustação;
- Elevada vida útil (mais de 50 anos).

Ainda segundo o autor, deve-se respeitar o critério de pressão, vazão e velocidade máxima de escoamento do fluido, a fim de se manter critérios de segurança e evitar o chamado “golpe de aríete”. Conforme Marcondes (2016),

O transitório hidráulico, também chamado de golpe de aríete, é o fenômeno que ocorre durante a mudança entre diferentes regimes permanentes de escoamento. SANTOS (2000) define transitório como qualquer alteração no movimento ou paralisação eventual de um elemento do sistema. Após a 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 estacionário (MARCONDES, 2016, p. 37).

Já com relação às bombas hidráulicas, é possível defini-las como “máquinas que recebem trabalho mecânico e o transformam em energia hidráulica, fornecendo energia ao líquido” (DENÍCULI, 2001 apud CARVALHO, 2004, p. 14). Essas bombas são, conforme Carvalho (2004), classificadas em dois segmentos: volumétricas e turbo-bombas.

As bombas volumétricas são divididas em bombas de pistão e bombas de diafragma. Sua principal característica é o fato de fornecerem energia ao fluido na forma de pressão. Já as turbo-bombas, também conhecidas como bombas hidrodinâmicas, são responsáveis por fornecer energia ao fluido na forma de energia cinética, de modo a aumentar a velocidade de escoamento e, consequentemente, da vazão. O Carvalho (2004) ainda as classifica quanto a:

- a) Trajetória do fluido dentro do rotor: centrífugas, axiais ou de fluxo misto;
- b) Número de entradas de sucção: simples ou dupla;
- c) Número de rotores: simples estágio ou múltiplos estágios;
- d) Posicionamento do eixo: horizontal ou vertical;
- e) Pressão desenvolvida: baixa pressão (menor ou igual a 150 KPa), média pressão (entre 150 a 500 KPa) e alta pressão (acima de 500kPa);
- f) Tipo de rotor: aberto, fechado ou semifechado;
- g) Posição da bomba em relação ao nível de água: sucção negativa, positiva ou bomba afogada.

Dessa forma, ao realizar a seleção de uma bomba, deve-se atentar primeiro à relação entre a AMT e a vazão (Q) fornecida pela bomba, uma vez que, caso a bomba escolhida não seja capaz de fornecer os valores de AMT e Q requisitados pelo sistema hidráulico, esse não irá ter funcionamento pleno, isto é, ou o fluido não terá energia suficiente para atingir todos os pontos do sistema na vazão desejada, ou irá possuir energia acima do que o sistema suporta (margem de segurança da tubulação, válvulas e assessórios), apresentando risco ao funcionamento do sistema, à integridade dos equipamentos e à segurança dos operadores.

Ademais, é possível, segundo Carvalho (2004), dimensionar a potência que será requisitada pela bomba, a partir da Equação 5:

$$\text{Potência} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot \text{AMT}}{75 \cdot n} \quad (7)$$

Em que n representa o rendimento da bomba (decimal).

O cálculo da potência da bomba é importante, pois, para seu funcionamento, ela requisita um motor. Conforme Carvalho (2004), há dois tipos de motores usados com frequência: motores movidos a energia elétrica e motores movidos a óleo diesel. Nos casos de motores elétricos, deve-se aplicar uma margem de segurança entre a potência exigida pela bomba e a máxima potência fornecida pelo motor, visando evitar a sobrecarga do motor durante o funcionamento. De acordo com Carvalho (2004), a margem de segurança deve seguir os valores dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Margem de Segurança para motores elétricos.

Potência exigida pela bomba (cv)	Margem de segurança recomendada
Até 2,0	50%
2,0 a 5,0	30%
5,0 a 10,0	20%
10,0 a 20,0	15%
Acima de 20,0	10%

Fonte: Adaptado de Carvalho (2004).

Por fim, no que tange às válvulas, Telles (2001) as denomina como sendo “dispositivos destinados a estabelecer, controlar e interromper o fluxo em uma tubulação”. Segundo esse

autor, as válvulas são os instrumentos mais importantes em uma rede de tubulação e, justamente por isso, deve-se ter cuidado e atenção ao realizar a especificação do sistema de tais instrumentos. Conforme ressalta o autor, deve-se escolher sempre o menor número de válvulas possível em uma instalação hidráulica, uma vez que tais equipamentos: (i) são caros (representam cerca de 8% do custo de uma instalação); (ii) oferecem perda de carga ao escoamento do fluido na tubulação, e (iii) apresentam com frequência a possibilidade de vazamentos, devido à deterioração de juntas e gaxetas.

Dito isso, ao realizar a escolha de uma válvula, deve-se levar em consideração se ela suporta os valores de pressão e vazão que serão aplicados a ela. Esses dados são fornecidos pelos fabricantes das válvulas em manuais e catálogos, assim como os valores que tal equipamento oferece de perda de carga localizada.

É importante salientar, ainda sobre esse equipamento, conforme Telles (2001), que há 4 tipos de válvulas:

a) Válvulas de bloqueio

São válvulas capazes apenas de estabelecer ou interromper o fluxo de fluido, ou seja, funcionam na posição completamente aberta ou completamente fechada.

b) Válvulas de regulagem

São capazes de controlar o fluxo de maneira parcial, com um fechamento gradativo.

c) Válvulas que permitem o fluxo em um só sentido

São válvulas cuja estrutura de montagem permite a passagem de fluido apenas em uma direção.

d) Válvulas que controlam a pressão

São válvulas que possuem mecanismos mecânicos que são capazes de efetuar uma regulação na pressão do fluido que passa por meio delas. Essa funcionalidade, conforme Telles (2001), é aplicada frequentemente em sistemas que requisitam um mecanismo de segurança adicional.

2.5 Dimensionamento Elétrico

Conforme Niskier (2000), o dimensionamento do sistema dos condutores elétricos consiste em uma parte fundamental de um projeto e deve ser feito de maneira planejada, visando garantir a segurança.

Segundo o autor, alguns metais conduzem melhor a corrente elétrica do que outros, oferecendo menor resistência ao fluxo elétrico. A resistência elétrica de um condutor também é função do comprimento do condutor e da sua seção transversal, como mostrado na Equação 5:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (5)$$

Em que:

R – Resistência elétrica do condutor (Ω)

ρ – Resistividade, variando conforme o material empregado ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)

L – Comprimento do condutor (m)

S – Seção (área) transversal do condutor (mm^2)

O metal mais utilizado em condutores elétricos é o cobre ($\rho = 0,0179 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ a 20°C), uma vez que esse possui um bom valor de resistividade média e um preço abaixo de outros metais com valores de resistividade próximos (prata e ouro). Esse condutor pode ter seu tipo de formação dividido entre fio (formado por um único fio sólido) ou cabo (formado por um encordoamento de diversos fios sólidos) (CAMARGOS, 2003), como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Tipos de condutores.



Fonte: Camargos (2003).

Em geral, por medidas de segurança, os condutores são isolados, ou seja, possuem uma capa protetora composta de um material não condutor, a fim de evitar a ocorrência de acidentes

com humanos na forma de choques elétricos e evitar o curto circuito quando mais de um condutor se encostam. No Brasil, a fabricação de fios adota a “série métrica”, de modo que os condutores têm sua seção transversal representada em mm^2 , sendo fabricados, normalmente, seções entre $0,5\text{mm}^2$ e 500mm^2 .

Além disso, os condutores podem ser encontrados em cabos unipolares (cf.Figura 8) ou multipolares (cf. Figura 9). No caso dos primeiros, cada condutor isolado é recoberto por uma camada protetora mecânica chamada cobertura

Figura 8 - Condutor unipolar.



- (1) Condutor formado de fios de cobre nu, têmpera mole (encordoamento).
- (2) Camada interna (composto termoplástico de PVC) cor branca até a seção nominal de 6 mm^2 .
- (3) Camada externa (composto termoplástico de PVC) em cores.

Fonte: CEMIG (2003).

Por sua vez, nos cabos multipolares, dois ou mais condutores isolados são envolvidos pela cobertura.

Figura 9 - Condutor multipolar.



- (1) Condutor formado de fios de cobre nu, têmpera mole (encordoamento).
- (2) Isolação (composto termoplástico de PVC) em cores.
- (3) Capa interna de PVC.
- (4) Cobertura (composto termoplástico de PVC) cor preta (cabos multipolares).

Fonte: CEMIG (2003).

Segundo Niskier (2000), é necessário, para a determinação da seção (mm^2) mínima dos condutores, adotar dois critérios básicos: limite de condução de corrente e limite de queda de tensão. Ambos os critérios resultam em valores diferentes, de maneira que se deve escolher o maior valor entre eles.

- a) Limite de condução de corrente

Quando circula corrente, por meio de um condutor, existe a dissipação de energia na forma de calor. Esse calor é transferido para o ambiente ao redor do condutor. Esse fato pode comprometer a funcionalidade do condutor, uma vez que esse foi desenvolvido para operar em certos níveis de temperatura. Ao se exceder esses níveis, pode-se comprometer gravemente sua isolação. Cada tipo de isolamento possui uma temperatura máxima suportada, conforme Tabela 2:

Tabela 2 – Temperatura característica dos condutores.

Tipo de isolamento		Temperatura máxima para serviço contínuo (°C)	Temperatura limite de sobrecarga (°C)	Temperatura limite de curto circuito (°C)
Cloreto de Polivinila (PVC)		70	100	160
Borracha etileno-propileno (EPR)		90	130	250
Polietileno Reticulado (XLPE)		90	130	250

Fonte: Adaptado de CEMIG (2003).

O dimensionamento do fio pode ser feito mediante cálculos, porém existem dados que relacionam a corrente a ser circulada no condutor, a temperatura ambiente e o número de condutores instalados em um eletroduto, informando a seção transversal que o condutor deve apresentar para suportar tal demanda de corrente e permanecer dentro dos limites de temperatura.

b) Limite de queda de tensão

Como dito anteriormente, ao se conduzir eletricidade em um condutor elétrico, há uma perda de energia na forma de calor. Essa perda também pode ser descrita como uma perda de potência e, consequentemente, uma queda de tensão no condutor elétrico. Conforme a Equação (5), ao incrementar a seção transversal de um condutor, sua resistência diminui. A resistência do condutor interfere diretamente na queda de tensão. Logo, uma forma de reduzir a queda é aumentar a seção transversal do condutor.

O cálculo do momento elétrico (ME) auxilia nesse ponto, pois, considerando que uma certa tolerância de queda de tensão é aceitável, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) fornece os dados para que a seção transversal mínima do condutor seja encontrada, de acordo com essa tolerância. O ME pode ser descrito como o produto da corrente (A) que passa pelo condutor por uma distância total (m) em metros desse circuito:

$$ME = A \cdot m \quad (6)$$

O Quadro 3 relaciona a seção transversal mínima com relação ao “[...] produto Ampère x Metro (A.m) para quedas de tensão com diferentes valores percentuais (1%, 2% e 4%) e de tensões aplicadas para condutores de cobre com isolamento em PVC/70°C” (CAMARGOS, 2003, p. 69).

Quadro 3 - Momento elétrico.

Condutor (mm ²)	Momento Elétrico (A.m) – Eletroduto de Material Não Magnético								
	127 V Monofásico			220 V Monofásico			220 V Trifásico		
	1%	2%	4%	1%	2%	4%	1%	2%	4%
1,5	55	110	221	96	192	383	111	222	443
2,5	91	182	363	157	314	628	179	358	715
4	141	282	564	244	488	977	282	564	1127
6	218	436	871	357	714	1427	412	824	1648
10	332	664	1327	574	1148	2297	666	1332	2664
16	498	996	1992	863	1726	3451	995	1990	3981
25	726	1452	2903	1257	2514	5028	1457	2914	5828
35	941	1882	3763	1630	3260	6519	1880	3760	7521
50	1176	2352	4704	2037	4074	8148	2340	4680	9361
70	1494	2988	5976	2588	5176	10353	3014	6028	12055
95	1841	3682	7363	3188	6376	12753	3667	7334	14667

Fonte: CEMIG (2003).

2.6 Automação de Sistemas

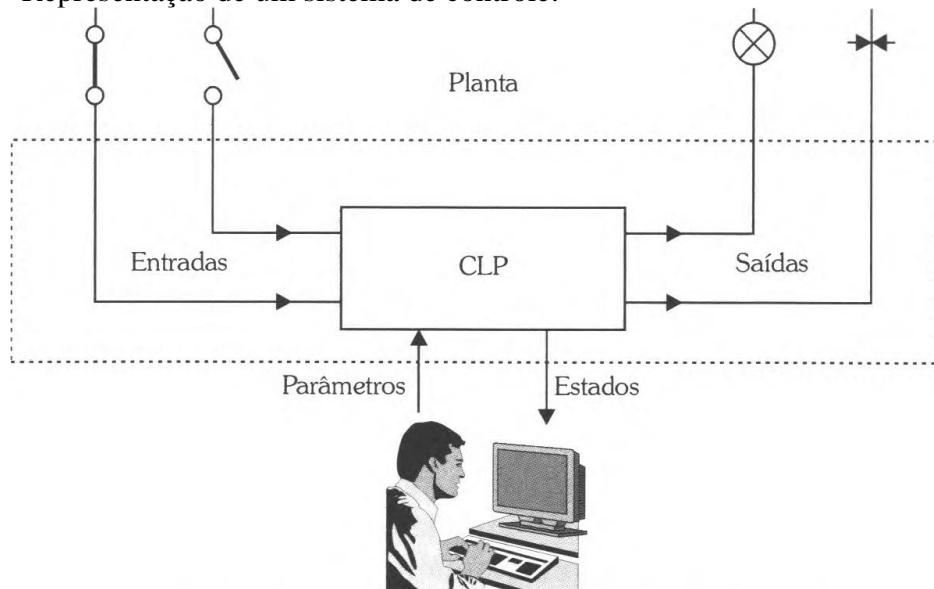
Os primeiros sistemas automatizados surgiram durante a Primeira Revolução Industrial (1750-1850), momento em que dispositivos mecânicos realizavam algumas tarefas pontuais. Tempos depois, durante a Segunda Revolução Industrial (1850-1945), a chegada da eletricidade propiciou o surgimento de novas tecnologias. Já, durante a Terceira Revolução Industrial (1950-1970), os processos de automação tiveram um desenvolvimento mais amplo. Foi nesse último cenário histórico que se deu o advento de uma nova tecnologia: os Controladores Lógicos Programáveis (CLP), os quais podem ser definidos como “um computador projetado para trabalhar no ambiente industrial” (FRANCHI; CAMARGO, 2008, p. 23). Segundo esses

autores, a diferença principal entre o CLP e um computador convencional é a robustez: o hardware do CLP é feito para suportar o ambiente industrial, no qual o manuseio e as condições de limpeza nem sempre são adequadas, além de enfrentar ruídos elétricos, umidade e altas temperaturas. Ainda assim, o CLP oferece uma interface amigável ao usuário, como também é capaz de executar lógicas de controle de alta complexidade.

Historicamente, o advento do CLP foi determinante para a evolução da automação, pois permitiu o controle maior e melhor de atuadores no campo, como válvulas, motores, entre outros, recebendo um número maior de informações vindas do campo, por meio de sensores, e podendo comunicar com outros dispositivos através de redes de comunicação industrial.

Prudente (2011) ressalta que os sistemas de controle podem ser divididos em três partes, a saber: (i) sensores/transdutores, responsáveis por converter a unidade física do elemento medido em sinais elétricos; (ii) atuadores, responsáveis por converter o sinal elétrico vindo do CLP em impulso físico; e (iii) os controladores, responsáveis por interpretar e emitir impulsos elétricos a partir de uma lógica de controle programada em seu *software*. Um sistema de controle com os três itens pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Representação de um sistema de controle.

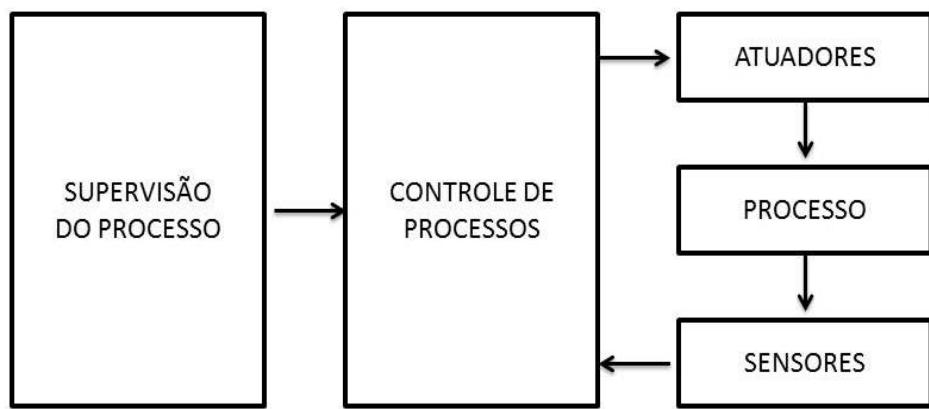


Fonte: Franchi e Camargo (2008, p. 25).

Conforme Georgini (2009), operador é de suma importância na indústria moderna. Segundo ele, para facilitar a análise de dados vindos da planta, a maioria das plantas industriais possui um sistema chamado SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), que fornece

uma interface amigável ao usuário, para que esse possa interpretar informações da planta e executar ações de controle. Nesse caso, o CLP também se torna importante, dado que é ele o responsável por transmitir os dados vindos do chão de fábrica ao sistema supervisório, bem como por enviar os comandos vindos do supervisório aos atuadores da planta, como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Etapas de supervisão e controle utilizando CLP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dadas as definições sobre os conceitos relativos ao impacto da poeira e o sistema convencional utilizado para solucionar tal problema, os conceitos base de hidráulica, elétrica e automação, o trabalho propôs a elaboração de um sistema de irrigação automatizada, o qual seria capaz de mitigar a formação de poeira em ambientes de mineração sem oferecer os riscos causados pelo uso de caminhões pipa.

3 METODOLOGIA

Para realizar este trabalho, lançou-se mão de uma metodologia de natureza básica, dado que se objetiva gerar conhecimentos sobre a problemática descrita, sem que esses conhecimentos sejam aplicados em uma realidade prática. Quanto à forma de abordagem, trata-se de uma pesquisa qualitativa, uma vez que busca descrever, compreender e analisar o problema do despoeiramento das minas, sem, com isso, traduzir esses dados em números, mas em interpretações sobre essa realidade.

Quanto aos objetivos, trata-se de um estudo: (i) exploratório, dado que proporciona maior familiaridade com o problema, haja vista a elaboração de dados hipotéticos, sem relação com qualquer mina conhecida, mas seguindo padrões de conformidade encontrados frequentemente, como a largura das vias; e (ii) explicativo, uma vez que busca identificar, compreender e aprofundar os conhecimentos nessa área. Quanto aos procedimentos técnicos utilizados para a realização deste intento, cita-se: (i) bibliográfico, uma vez que se pesquisou outros estudos nessa área; e (ii) laboratorial, já que se elaborou uma mina hipotética, de modo a dimensionar de um projeto hidráulico automatizado para fins de despoeiramento de mina.

Ante ao delineamento de pesquisa apresentado, a primeira etapa deste trabalho consistiu em analisar os requisitos para a especificação do sistema hidráulico para implantação de um sistema de despoeiramento automatizado. Nessa etapa, realizou-se um levantamento topográfico, a fim de determinar parâmetros base para o prosseguimento dos cálculos, como, por exemplo, o posicionamento da rede hidráulica em relação ao fluxo do tráfego de veículos na mina hipotética. Além disso, nessa etapa, escolheu-se o aspersor a ser utilizado, levando-se em conta valores disponibilizados por fabricantes, encontrados em catálogos.

Estipuladas as condições, partiu-se para a especificação hidráulica, momento em que se dimensionou a rede de tubulações, a pressão e a vazão ideal requisitada pelo aspersor, para que esse pudesse desempenhar seu funcionamento pleno. Além disso, nessa etapa, levou-se em conta as condições de operação da tubulação. Ademais, para a escolha do tipo de tubulação, critérios como a facilidade no processo de instalação e a aplicabilidade em ambientes de mineração foram considerados. Utilizou-se métodos para cálculo de perda de carga, tais como mencionados na fundamentação teórica deste trabalho.

É importante ressaltar que a especificação do sistema da tubulação também levou em conta curvas e demais peças adicionadas à rede hidráulica. Logo, desenvolveu-se uma relação

entre a quantidade de curvas, de válvulas e de aspersores a serem adicionados na rede, bem como o comprimento da rede e a quantidade, em metros, de tubulação necessária.

Em seguida, tendo as condições de pressão e de vazão estabelecidas, foi feito a especificação do sistema da bomba hidráulica capaz de fornecer os valores determinados. Esse dimensionamento foi realizado tendo como base os dados disponibilizados nos catálogos de fabricantes de bombas. Ao fim, determinou-se um modelo de bomba que não só pudesse fornecer os valores de pressão e vazão requeridos, como também suportasse o ambiente de mineração, ambiente que requer equipamentos com maior proteção a intempéries do meio.

Na sequência, dimensionou-se o tipo de válvula responsável pelo acionamento dos aspersores. Essa etapa foi desenvolvida analisando-se dados de diferentes tipos de válvulas, levando em consideração não apenas a pressão e a vazão suportadas, como também critérios, como o tipo de acionamento a (se elétrico, pneumático ou outros), dando preferência ao acionamento elétrico, devido à dificuldade de implementar outros tipos de acionamento em ambientes hostis como o da mineração.

Feito isso, a etapa seguinte consistiu em analisar os requisitos para o dimensionamento dos condutores elétricos e eletrodutos para a implantação de um sistema de despoieiramento automatizado. A rede elétrica responsável por realizar a alimentação e o acionamento das válvulas foi dimensionada, levando-se em conta a perda de tensão e a corrente elétrica atrelada ao comprimento da via.

Por fim, foi dimensionado o controlador, bem como a lógica de controle necessária para o funcionamento desse sistema. O controlador escolhido teve como requisito ter que suportar saídas para as válvulas de acionamento dos aspersores, bem como receber dados de entrada de sensores de pressão posicionados ao longo da tubulação.

É importante salientar que não faz parte do escopo desta proposta realizar o dimensionamento dos instrumentos de medição, nem tampouco elaborar uma lógica de controle detalhada em linguagem específica dos CLPs ou afim. Além disso, o trabalho não levou em conta critérios referentes à geologia do ambiente ou relacionados à formação de poeira.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresenta-se os resultados obtidos em cada etapa de cálculo para o dimensionamento do sistema de despoeiramento automatizado. Para tanto, optou-se por dividir essa apresentação em quatro itens, quais sejam: (i) Concepção do Projeto, momento em que se expõe os dados iniciais para o início dos cálculos; (ii) Especificação do Sistema Hidráulico, contendo os métodos utilizados para dimensionar os equipamentos necessários para o funcionamento correto do sistema, bem como os equipamentos sugeridos; (iii) Dimensionamento Elétrico, etapa em que se dimensionou os condutores para a alimentação das válvulas e, por fim, (iv) Dimensionamento do Sistema de Controle, no qual se detalhou a lógica de controle e o Controlador necessário nesse caso.

4.1 Concepção do Projeto

O sistema de despoeiramento automatizado foi projetado visando trazer uma perspectiva geral sobre a aplicabilidade desse tipo de automação. Assim sendo, para os fins deste trabalho, estipulou-se uma via com as seguintes especificações:

- Comprimento estimado da via: 2.400 metros;
- Variação de altura entre os pontos A e B: 0 metros;
- Largura média da via: 30 metros.

Com base nesses dados estipulado de topografia, escolheu-se o aspersor ideal para esse contexto. Tal escolha contemplou um requisito principal: o jato de água gerado por ele deve ser capaz de alcançar toda a largura da pista, ou seja, deve ter, no mínimo, 30 metros, para que possa realizar com sucesso o processo de umectação da via. Em outros termos, optou-se por projetar a tubulações de irrigação e os condutores elétricos apenas em um dos lados da via, eliminando o cruzamento de tubos pelo meio da via. Dessa forma, escolheu-se um aspersor que possuía um raio suficiente para atingir toda a largura da via. Além disso, o modelo escolhido deve oferecer robustez adequada ao ambiente de mineração, não sendo recomendado aspersores projetados para jardins e ambientes sem impactos de intempéries.

Ante a esses requisitos, após análise de diversos modelos, escolheu-se o modelo Rain Bird Série 3000 (Figura 12), sendo esse um aspersor de impacto próprio para ambientes de mineração.

Figura 12 - Aspersor Rain Bird Série 3000.



Fonte: Rain Bird (2016).

Os dados desse aspersor, disponíveis em catálogo, como ilustra o Quadro 4, mostram que: se aplicando 3 bar de pressão em um aspersor desse modelo, com bocal de 14 mm e uma vazão de 13 m³/h, é possível obter um raio do jato de água de 32 metros, mais do que o necessário à topografia criada. O encaixe do aspersor possui 2" de diâmetro.

Quadro 4 - Dados de desempenho do aspersor Rain Bird Série 3000.

BARS @ Bocal	TAMANHO DO BOCAL											
	14 mm		16 mm		18 mm		20 mm		22 mm		24 mm	
	(m) Raio	(m ³ /hr) Vazão	(m) Raio	(m ³ /hr) Vazão	(m) Raio	(m ³ /hr) Vazão	(m) Raio	(m ³ /hr) Vazão	(m) Raio	(m ³ /hr) Vazão	(m) Raio	(m ³ /hr) Vazão
3,0	32,0	13,0	32,5	16,8	36,0	21,6	40,5	26,5	40,0	31,5	40,0	38,0
3,5	33,5	13,9	34,0	18,0	38,0	23,0	42,0	28,4	41,5	33,8	42,0	40,4
4,0	34,8	14,8	36,0	19,2	40,0	24,5	42,8	30,3	42,5	36,2	43,0	43,2
4,5	36,0	15,7	38,0	20,4	42,0	26,0	43,5	32,2	43,5	38,5	44,0	45,9
5,0	37,5	16,6	38,5	21,5	43,3	27,4	45,0	33,9	46,3	40,6	47,3	48,3
5,5	39,0	17,4	39,0	22,5	44,5	28,8	46,5	35,5	49,0	42,6	50,5	50,7
6,0	40,2	18,2	40,5	23,6	45,5	30,2	48,0	37,3	50,5	44,5	53,0	53,2

Fonte: Rain Bird (2016).

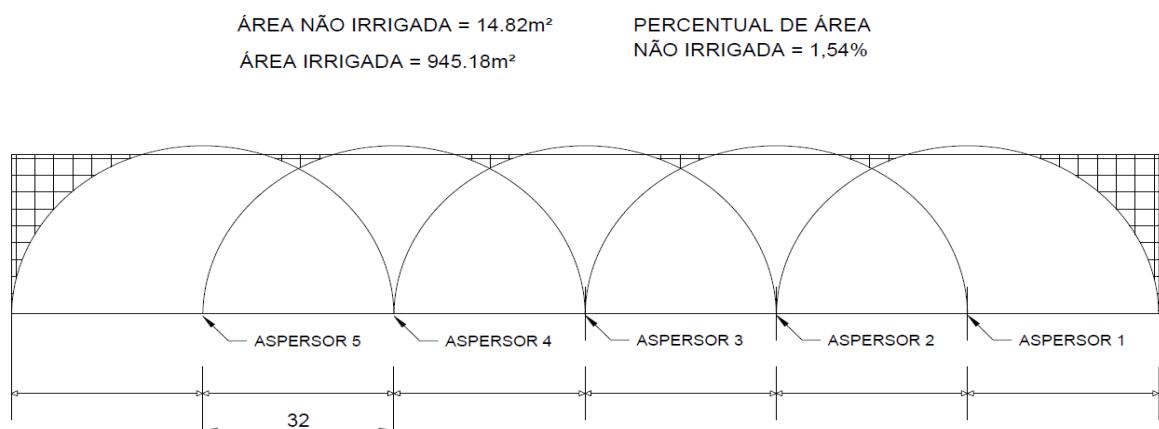
A partir da escolha do modelo do aspersor, definiu-se o *layout* do sistema, com base no dado do raio de alcance do equipamento. Esse *layout* compreendeu a definição de como foi feita a ligação das tubulações, bem como quantas válvulas e aspersores foram necessários ao projeto. Para isso, primeiro considerou-se que toda a via deve ser irrigada a um menor custo possível. Logo, uma menor vazão diminui a velocidade de escoamento do fluido, conforme

equações apresentadas. Para reduzir a vazão necessária no projeto, o sistema irá acionar apenas uma válvula por vez, mantendo-a acionada por um intervalo de tempo; em seguida, fechando-a para o acionamento da válvula seguinte. A lógica de controle é melhor detalhada na sequência.

Sabendo-se que o raio do aspersor selecionado, nas condições escolhidas, é de 32 metros, elaborou-se três esboços que exemplificam opções de posicionamento dos aspersores na via projetada. Foram elaboradas condições diferentes para que fosse possível analisar situações distintas de operação do sistema, escolhendo, assim, a opção que oferecerá os melhores resultados.

No primeiro caso (Condição A, Figura 13), os aspersores são posicionados a uma distância de 32 metros. Nesse cenário, necessita-se de 76 aspersores para suprir toda a extensão da via. Nesse caso, há uma área não irrigada entre aspersores de 14,82 metros quadrados. A área não irrigada equivaleria a 1,55%.

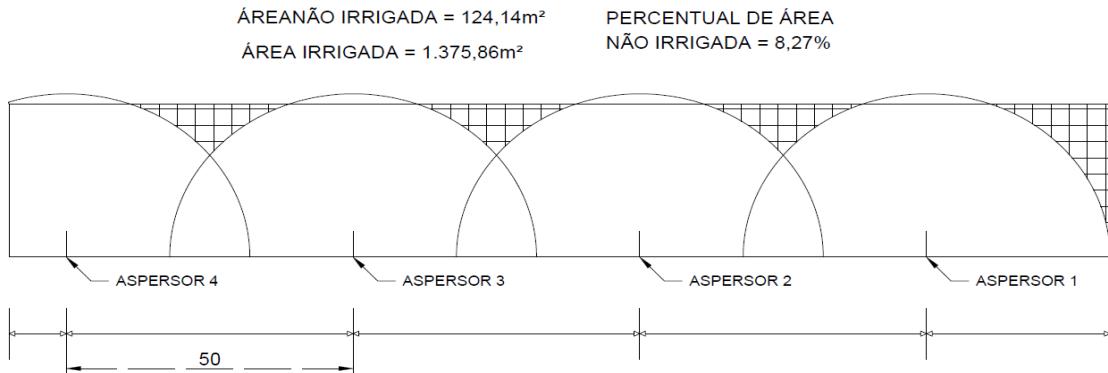
Figura 13 - Condição A.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Já no segundo caso (Condição B, Figura 14), os aspersores são posicionados a uma distância de 50 metros. Nesse caso, são necessários 50 aspersores para suprir toda a extensão da via. Há uma área não irrigada entre aspersores de 124,14 metros quadrados, a qual equivaleria a 8,28%.

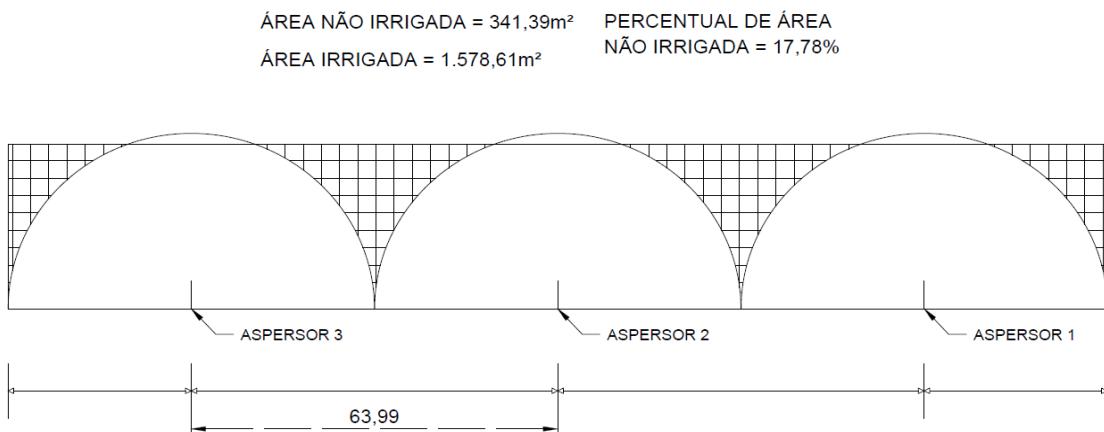
Figura 14 - Condição B.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, no terceiro caso (Condição C, Figura 15), os aspersores são posicionados a uma distância de 64 metros. Nesse caso, serão necessários 38 aspersores para suprir toda a extensão da via. Há uma área não irrigada entre aspersores de 341,39 metros quadrados, a qual equivaleria a 17,79%.

Figura 15 - Condição C.

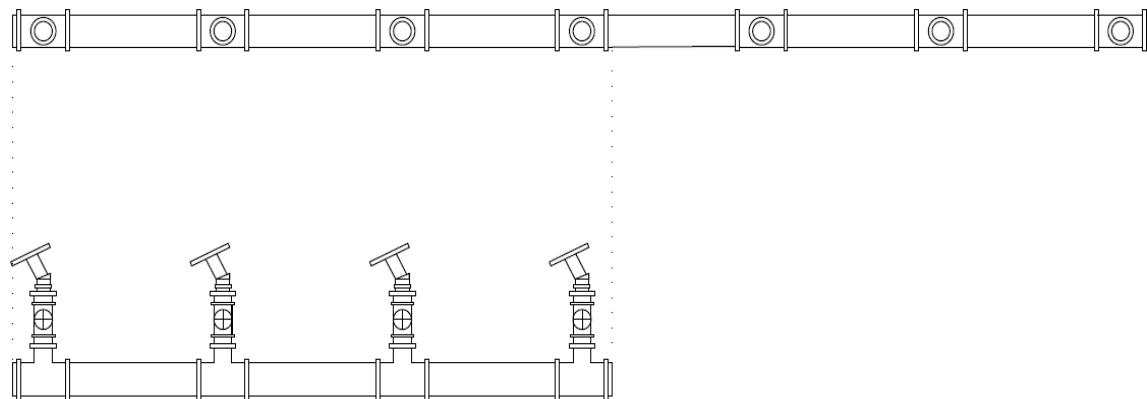


Fonte: Elaborada pelo autor.

Após uma análise crítica dos três casos projetados, optou-se pela Condição B, utilizando um número de 50 aspersores. A escolha se deu em razão de que a área não irrigada é relativamente pequena, se comparada à área irrigada (8,27% de área não irrigada). Além disso, o próprio tráfego de maquinário na via acaba levando parte da água em contato com os pneus dos veículos para a região não irrigada, impedindo a formação de poeira. Dessa forma, não há razão para um investimento maior em número de aspersores, sendo 50 aspersores o suficiente para os requisitos do caso em questão.

Sabendo-se o número de aspersores, definiu-se como seria feita sua ligação. Para isso, três modelos foram esquematizados. No primeiro, ilustrado na Figura 16, uma tubulação principal seria disposta em toda a extensão da via e dela, individualmente, partiriam 50 conjuntos, cada qual contendo uma válvula e um aspersor. A tubulação partiria com diâmetro de 3" e seria reduzida para 2", a partir de uma conexão do tipo T.

Figura 16 - *Layout 1 (Aspersores Individuais).*

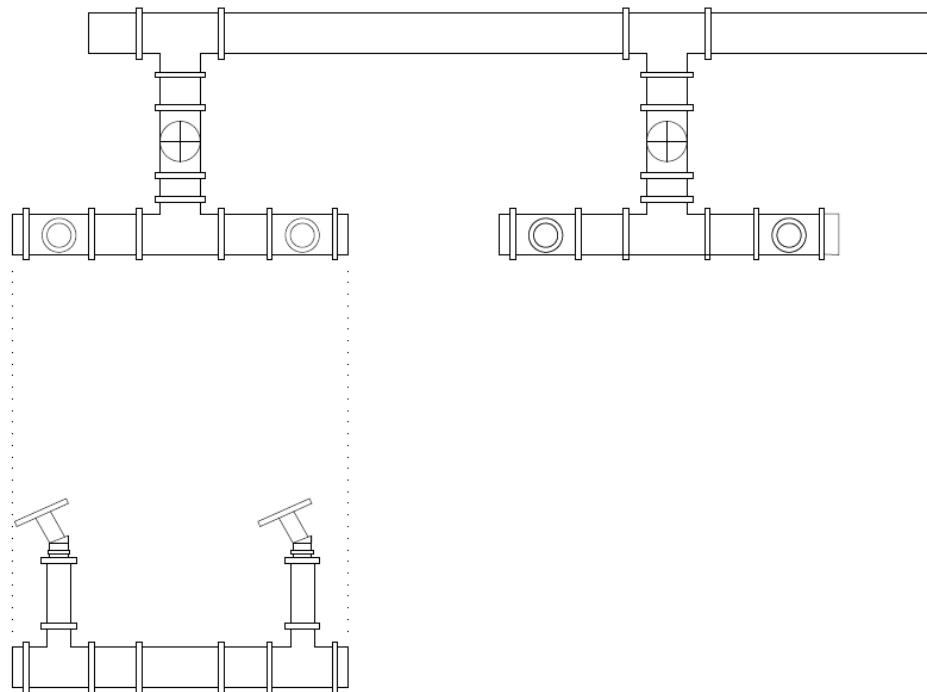


Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante ressaltar que o diâmetro de 2" da tubulação foi estimado, nesse momento, a fim de se ter uma compatibilidade com o aspersor. Já o diâmetro de 3" foi estimado com o intuito de diminuir a velocidade de escoamento do fluido, novamente, com a intenção de se respeitar os critérios de segurança de tubulações, mencionados no tópico 2.4. Salienta-se, no entanto, que cálculos foram realizados nas etapas seguintes a fim de se validar ou não essa escolha, de modo que, fosse determinado o melhor diâmetro para o contexto em tela.

Um segundo modelo, exposto na Figura 17, foi esquematizado com a tubulação principal disposta por toda a via. Dessa vez, com 24 conjuntos de 2 aspersores sendo ativados por uma válvula. A tubulação partiria com um 3" de diâmetro e seria reduzida para 2" após a última curva dentro do conjunto.

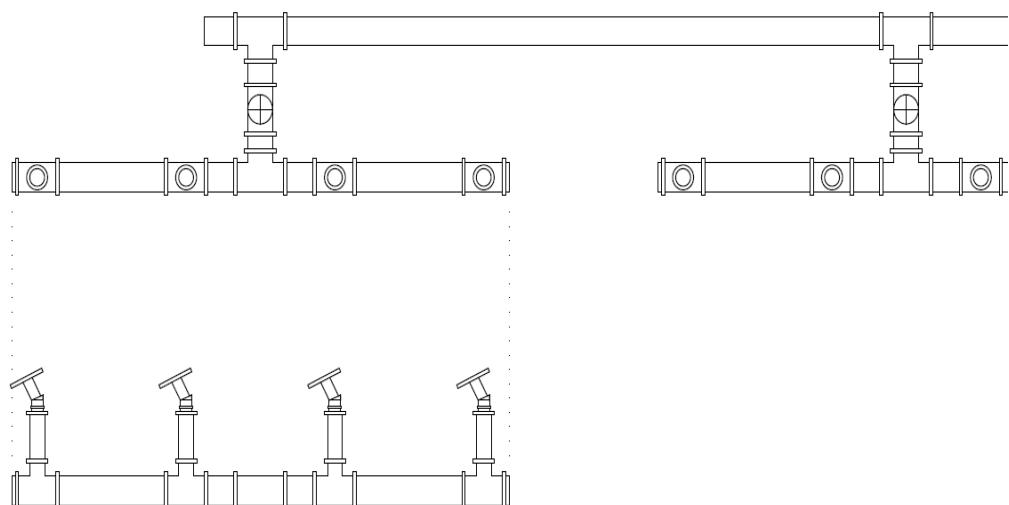
Figura 17 - *Layout 2 (Conjunto com Dois Aspersores).*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, um terceiro esquema foi idealizado, evidenciado na Figura 18, ainda com a tubulação principal em todo o comprimento da via. Agora, com 12 conjuntos de 4 aspersores e uma válvula e 1 conjunto com 2 aspersores sendo ativados por uma válvula. Novamente, a tubulação partia com um 3" de diâmetro e seria reduzida para 2" após a última curva dentro do conjunto.

Figura 18 - *Layout 3 (Conjunto com Quatro Aspersores).*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos três casos, como não há informações fornecidas pelo fabricante a respeito da altura de instalação dos aspersores, devem-se realizar ensaios a fim de estipular a melhor altura de instalação dos aspersores em relação ao ponto da via onde se encontram.

A partir dos três projetos de ligação dos aspersores, partiu-se para a especificação do sistema hidráulico.

Quadro 5 – Curvas Utilizadas por *Layout*.

Curvas <i>Layout 1</i>	
Tipo	Quantidade
Curvas 90° com redução de 3" para 2"	1
T com redução de 3" para 2"	23
T de 3"	0
Curvas <i>Layout 2</i>	
Tipo	Quantidade
Curvas 90° com redução de 3" para 2"	48
T com redução de 3" para 2"	0
T de 3"	24
Curvas <i>Layout 3</i>	
Tipo	Quantidade
Curvas 90° com redução de 3" para 2"	48
T com redução de 3" para 2"	48
T de 3"	24

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Especificação do Sistema Hidráulico

A especificação do sistema hidráulico foi realizado com o objetivo de atingir os requisitos de vazão e pressão do sistema, mantendo-se os níveis de segurança dos equipamentos. Em casos de projetos de irrigação, é importante se atentar para a vazão e a pressão necessárias para que o aspersor tenha um funcionamento pleno. Assim, toda a rede hidráulica foi dimensionada com o intuito de suprir os requisitos citados.

No entanto, não se escolheu os materiais que irão compor a rede hidráulica unicamente com base nos dados fornecidos pelo fabricante, uma vez que tanto a tubulação quanto cada componente inserido nela (válvulas, curvas, instrumentos de medição) desenvolve uma perda de energia no escoamento do fluido devido ao atrito, de modo que o valor deve ser recalculado, levando-se em conta perdas de carga, conforme apresentado no referencial teórico deste trabalho. Por esse motivo, foi preciso realizar uma análise caso-a-caso dos *layouts* propostos, verificando qual deles se adequa melhor ao sistema.

4.2.1 Especificação da Tubulação e Cálculo da Perda de Carga

Tendo em vista que o sistema foi aplicado em um protótipo que imita um local onde não há a ocorrência de curvas fechadas e que fica exposto a céu aberto em ambiente adverso, foi escolhida uma tubulação que seja resistente aos intempéries relativos ao ambiente de mineração e que possua o mínimo de acessórios e conexões possível, dado que cada acessório representa uma perda de carga localizada no processo. Ante a essas delimitações, após analisar algumas opções disponíveis no mercado, optou-se pelo uso de tubos PEAD (Polietileno de Alta Densidade).

Com relação ao diâmetro da tubulação, optou-se por maiores diâmetros, dado que apresentam menos perda de carga, sendo, pois, mais viáveis para esse contexto. Contudo, válvulas para diâmetros acima de 3" são encontradas, em geral, com acionamento pneumático, e não elétrico, o que encarece muito o projeto, uma vez que se faria necessário levar uma rede de ar comprimido em toda a extensão da tubulação. Ante a isso, por limitações da válvula, o diâmetro da tubulação selecionado foi de no máximo 3".

Sabendo-se que o requisito de pressão e vazão do aspersor é fornecido pelo fabricante e não necessita ser calculado, partiu-se para a análise das perdas de carga na rede hidráulica, iniciando-se pela perda de carga distribuída. Para isso, foram realizados cálculos baseados na equação de Hazen-Williams (Quadro 7), a qual é amplamente utilizada em projetos de canalização de água, haja vista sua precisão no fornecimento dos dados.

Para determinar a perda de carga localizada, ou seja, a perda de carga gerada por peças e instrumentos instalados na rede hidráulica, foi realizado o cálculo a partir do método do comprimento equivalente. Nesse método, cada componente representa um valor numérico na

unidade de comprimento, que é acrescido ao comprimento total da via e leva em conta o cálculo de perda de carga distribuída.

Por fim, considerou-se a variação de altura do sistema, uma vez que essa implica na variação de energia potencial do sistema, e, com isso, na queda de pressão. Desse modo, quanto maior a variação de altura do sistema, maior a queda de pressão estabelecida. Assim sendo, a especificação do sistema hidráulico leva em consideração a análise dos valores das perdas de carga encontradas, tendo-se, portanto, a partir dessa análise, um novo valor de pressão requisitado pelo sistema, maior do que o valor original.

Em todos os *layouts*, a variação de altura e o comprimento da tubulação principal é a mesma, mas o comprimento do sistema muda, visto que nos *layouts* 2 e 3 existem tubulações secundárias de 3", além da tubulação principal. Para os três *layouts* citados, os valores de comprimento equivalente às conexões foram:

Quadro 6 – Dados de Comprimento Equivalente.

Comprimento equivalente de curvas, conexões e válvulas, <i>Layout 1</i>			
Tipo	Quantidade	Perda de Carga por Unidade	Total
Curvas 90° com redução de 3" para 2"	1	1,3	1,3
T com redução de 3" para 2"	23	7,6	174,8
T de 3"	0	8	0
TOTAL DE COMPRIMENTO EQUIVALENTE			175,1 m
Comprimento equivalente de curvas, conexões e válvulas, <i>Layout 2</i>			
Tipo	Quantidade	Perda de Carga por Unidade	Total
Curvas 90° com redução de 3" para 2"	48	1,3	32,4
T com redução de 3" para 2"	0	7,6	0
T de 3"	24	8	192
TOTAL DE COMPRIMENTO EQUIVALENTE			122,4 m
Comprimento equivalente de curvas, conexões e válvulas, <i>Layout 3</i>			

Tipo	Quantidade	Perda de Carga por Unidade	Total
Curvas 90° com redução de 3" para 2"	48	1,3	32,4
T com redução de 3" para 2"	48	7,6	364,8
T de 3"	24	8	192
TOTAL DE COMPRIMENTO EQUIVALENTE			589,2 m

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos dados de comprimento equivalente referentes às conexões do sistema, sabe-se que o comprimento equivalente total deve ser o comprimento total da tubulação, acrescido do comprimento equivalente de equipamentos. Logo, deve-se considerar ainda que, nos *layouts* 2 e 3, há uma certa quantidade de tubulação adicional, utilizada para a construção dos conjuntos de ramificações, sendo ela igual a 750 metros no *layout* 2, uma vez que o comprimento das ramificações, conforme projeto, equivale a 31,25% de adição ao comprimento da linha principal, e 1170 metros no *layout* 3, uma vez que o comprimento das ramificações, conforme projeto, equivale a 48,75% de adição ao comprimento da linha principal.

Assim, o comprimento total para cada *layout* é a soma do comprimento da tubulação principal, da tubulação adicional e do comprimento equivalente dos equipamentos, sendo:

- *Layout 1* (Aspersores individuais): $2400 + 0 + 175,1 = 2575,1$ metros
- *Layout 2* (Conjuntos com Dois Aspersores): $2400 + 750 + 122,4 = 3272,4$ metros
- *Layout 3* (Conjuntos com Quatro Aspersores): $2400 + 1170 + 589,2 = 4159,2$ metros

Ademais, é possível comparar a velocidade de escoamento em cada *layout*. Sabendo que a velocidade de escoamento é o resultado da divisão entre a área da seção transversal da tubulação pela vazão, considerando a vazão requisitada pelo aspersor escolhido de $13 \text{ m}^3/\text{h}$. É importante lembrar que, nos casos em que há mais de um aspersor por conjunto, a vazão deve ser multiplicada pela quantidade de aspersores no conjunto, uma vez que irá alimentar não um, mas dois ou quatro aspersores concomitantemente.

- *Layout 1* (Aspersores individuais) - Velocidade de Escoamento: 0,78 m/s

- *Layout 2* (Conjuntos com Dois Aspersores) - Velocidade de Escoamento: 1,59 m/s
- *Layout 3* (Conjuntos com Quatro Aspersores) - Velocidade de Escoamento: 3,17 m/s

Com os dados de comprimento total e de velocidade de escoamento, obtidos por meio da equação de Hazen-Williams, determinou-se a perda de carga do sistema. De modo que:

Quadro 7 – Dados da Especificação do Sistema Hidráulico.

Dados de entrada – Layout 1				
Velocidade média	V =	0,78	L/s	m ³ /s
Comprimento da tubulação	L =	2575,1	m	
Diâmetro interno	Di =	3	pol	
Rugosidade absoluta	ε =	0,015	mm	
Coeficiente de Hazen-Williams	C =	145		
Viscosidade dinâmica	μ =	0,001	kg/m.s	
Massa específica	ρ =	998	kg/m ³	
RESULTADO - PERDA DE CARGA CALCULADA – Layout 1				
Fórmula	Hazen-Williams (água)			
Perda de carga (unitária)	J =	0,008774508	m/m	
Perda de carga (absoluta)	ΔH =	24,33434351	m	
Variação de pressão (mesmo nível)	Δp =	238242,47	Pa	
Dados de entrada – Layout 2				
Velocidade média	V =	1,59	L/s	m ³ /s
Comprimento da tubulação	L =	3272,4	m	
Diâmetro interno	Di =	3	pol	
Rugosidade absoluta	ε =	0,015	mm	
Coeficiente de Hazen-Williams	C =	145		
Viscosidade dinâmica	μ =	0,001	kg/m.s	
Massa específica	ρ =	998	kg/m ³	
RESULTADO - PERDA DE CARGA CALCULADA – Layout 2				
Fórmula	Hazen-Williams (água)			

Perda de carga (unitária)	$J =$	0,032766681	m/m
Perda de carga (absoluta)	$\Delta H =$	107,2256856	m
Variação de pressão (mesmo nível)	$\Delta p =$	1049780,208	Pa
Dados de entrada – Layout 3			
Velocidade média	$V =$	3,17	L/s m ³ /s
Comprimento da tubulação	$L =$	4159,2	m
Diâmetro interno	$Di =$	3	pol
Rugosidade absoluta	$\epsilon =$	0,015	mm
Coeficiente de Hazen-Williams	$C =$	145	
Viscosidade dinâmica	$\mu =$	0,001	kg/m.s
Massa específica	$\rho =$	998	kg/m ³
RESULTADO - PERDA DE CARGA CALCULADA – Layout 3			
Fórmula	Hazen-Williams (água)		
Perda de carga (unitária)	$J =$	0,117437664	m/m
Perda de carga (absoluta)	$\Delta H =$	488,4467308	m
Variação de pressão (mesmo nível)	$\Delta p =$	4782079,105	Pa

Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema, originalmente, iria requisitar 3 bar (300000 Pa) de pressão para o acionamento correto dos aspersores. Acrescendo a variação de pressão encontrada, obteve-se a pressão e a vazão necessária para cada *layout*:

- *Layout 1* (Aspersores individuais)

Pressão necessária: 5,38 bar

Vazão necessária: 13 m³/h.

- *Layout 2* (Conjuntos com Dois Aspersores)

Pressão necessária: 13,49 bar

Vazão necessária: 26 m³/h

- *Layout 3* (Conjuntos com Quatro Aspersores)

Pressão necessária: 63,47 bar

Vazão necessária: 50,82 m³/h

A partir dessa análise, determinou-se que o melhor *Layout* do sistema é o segundo modelo, pois:

- Apresenta uma velocidade de escoamento dentro do limite de segurança da tubulação;
- Apresenta valores de pressão e vazão facilmente atendidos por bombas hidráulicas encontradas comumente em indústrias;
- Apresenta uma redução no número de válvulas se comparado ao *Layout* 1;
- O número reduzido de válvulas representa uma redução no custo de condutores elétricos no projeto.

Confira, no Apêndice 1, o desenho esquema de ligação feito a partir do *layout* definido.

Com a pressão e vazão definidas, passou-se para a especificação da bomba hidráulica para o sistema.

4.2.2 Especificação da Bomba Hidráulica e Válvulas

A bomba hidráulica, por sua vez, deve ser capaz de suprir os valores de vazão e pressão requisitados pelo sistema, respectivamente, 26 m³/h e 13,49 bar, referentes ao *Layout* 2, obtidos no tópico 4.2.1. Além disso, é preciso se atentar para que a bomba tenha uma estrutura robusta para suportar o ambiente adverso na qual será instalada. Para isso, analisou-se vários catálogos de fabricantes de bombas hidráulicas. Após essa análise, optou-se pelo uso do modelo ME-3, da fabricante Schneider, neste estudo.

Figura 19 - Bomba Hidráulica Modelo ME-3.



Fonte: Schneider (s.d.).

Dadas as definições fornecidas no tópico 2.4 e considerando que o sistema proposto deve trabalhar com 13,49 bar de pressão e 26 m³/h de vazão, optou-se por uma válvula que atenda a esses limites. Ao analisar diversos modelos, verificou-se que o modelo 8210 da fabricante ASCO, conforme Figura 20, atende aos requisitos mencionados, possuindo Diâmetro de 3", Temperatura Máxima do Fluido de 82 °C e Potência da Bobina de 16,7 VA.

Figura 20 - Válvula Solenoide 3" Asco Serie 8210.



Fonte: Asco (s.d.).

Quadro 6 - Dados Técnicos Elétricos da Válvula 8210

Classe de Isolamento Standart	Tamanho da Bobina	Potência Nominal / Consumo				Bobina Sobressalente		
		C.C.		C.A.		Prefixo SC*		
		Watts	Watts	VA Sustentação	VA Arranque	C.C.	C.A.	
F	M-6	9,7	6	15,6	34	400325-142	400325-125	400325-128
F	M-XX	11,2	10,5	23	55	400425-142	400425-125	400425-128
F	M-XX	19,7	16,7	35	78	400425-342	400425-225	400425-228
F	M-12	16,8	15,4	33,6	110	400625-142	400525-125	400525-128
F (H para C.C.)	M-12	36,2	20	43	240	400626-542	400525-225	400525-228

Fonte: Asco (s.d.).

4.3 Dimensionamento do Sistema de Controle

Conforme asseverado, o CLP é um equipamento fundamental para o funcionamento do sistema de despoieiramento, sendo o responsável por determinar a lógica de controle. Essa, por

sua vez, se deu de modo a permitir a abertura apenas de uma válvula por vez. Como cada válvula representa um conjunto com dois aspersores e o raio de ação de cada um é de 50 metros, a umectação da via ocorrerá em conjuntos de 100 metros.

Por meio de programação do próprio CLP, cada conjunto será acionado por um tempo e, antes do acionamento do próximo conjunto, se esperará mais um tempo, a fim de se reestabelecer a pressão da linha hidráulica. Ambos os tempos devem ser definidos pelos usuários, de acordo com a necessidade do local.

Ademais, o CLP ainda é responsável pelo monitoramento da pressão ao longo da via, por meio de sensores posicionados ao longo da rede hidráulica. Não cabe a este trabalho determinar a posição ideal, o número ou o modelo de sensor ideal. Todavia, deve-se ressaltar que é ideal haver pelo menos um sensor no ponto de menor perda de carga da rede hidráulica e um sensor no ponto em que há maior perda de carga.

O sensor posicionado no ponto de menor perda de carga (denominado aqui de sensor A), estará também no ponto em que haverá maior pressão, sendo responsável pela segurança do sistema. Ele deve atuar sempre que a pressão atingir um valor determinado, correspondente com a margem de segurança da tubulação e dos equipamentos. Isso minimiza problemas como quebra de equipamentos e aumenta a segurança dos operadores.

O sensor posicionado no ponto de maior perda de carga (denominado aqui de sensor B), por sua vez, tem a função de evitar que a pressão fique abaixo do nível determinado para o funcionamento pleno do sistema. Assim, quando o CLP receber a informação desse sensor de que a pressão atingiu níveis demasiadamente baixos, um sinal será enviado a fim de acionar a bomba, aumentando a pressão da rede hidráulica.

Assim sendo, percebe-se que a bomba hidráulica não irá operar de maneira contínua, sendo acionada apenas quando o sensor B detectar uma queda na pressão da rede. O valor da queda de pressão também deverá ser definido pelo usuário, de acordo com os critérios estabelecidos em projeto.

Para o sistema projetado neste trabalho, optou-se por um CLP da marca Siemens, com a CPU (*Central Process Unit*) modelo SIMATIC S7-1200, conforme Figuras 21 e 22, por atender aos requisitos de robustez e processamento necessário e por ser um produto amplamente utilizado no mercado.

Estipulou-se, ainda, o uso de módulos adicionais, destinados a saída do sinal responsável pelo acionamento das válvulas, optando-se pelo modelo SM 1222, da fabricante Siemens, por

possuir correta conexão com a CPU escolhida e 16 saídas a relé, adequadas para o acionamento em tensão alternada. Como serão necessárias 24 saídas para controle (uma para cada válvula) e cada um dos módulos suporta 16 saídas, serão necessários dois módulos do modelo mencionado.

Figura 21 - CLP SIMATIC S7-1200



Fonte: Siemens (2021).

Figura 22 - CPU e Módulos selecionados

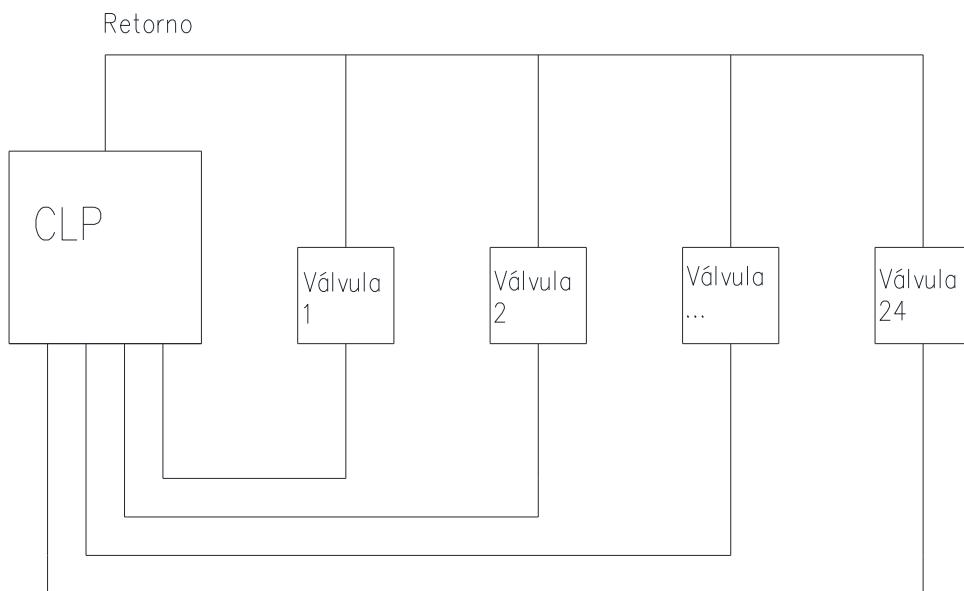


Fonte: Siemens (2021).

4.4 Dimensionamento Elétrico

Sabendo que cada saída do CLP precisa ser conectada a uma válvula, o dimensionamento dos condutores elétricos se faz necessário. Cada válvula terá um contato direto e individualizado com o módulo de CLP, além de um fio chamado de “comum”, comum entre as válvulas. O esquema de ligação se dá como exemplificado na Figura 23:

Figura 23 - Esquema de conexão entre CLP e Válvulas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os cálculos levarão como base os 2400 metros de extensão da tubulação principal, uma vez que os condutores seguirão junto à mesma. Contudo, como mostra a Figura 23, apenas a válvula mais distante terá o maior comprimento da fiação, de modo que cada uma das válvulas anteriores terão uma redução de 100 metros. Isso ocorre uma vez que cada válvula é responsável pelo acionamento de 2 aspersores, cada um a uma distância de 50 metros do próximo (*Layout 2 e Condição B*). Em resumo, a válvula 1 terá um total de 50 metros, válvula 2 um total de 150 metros e assim sucessivamente até a válvula 24 que terá 2350 metros (o comprimento e excesso se deve ao fato de que o último conjunto não é completo). O total obtido com a soma dos comprimentos das 25 válvulas foi 28.800 metros, com o maior comprimento sendo de 2350

metros referente ao comando da válvula 24 e 2350 metros do condutor de retorno comum às 24 válvulas.

Uma vez que a válvula demanda uma tensão de 240V, corrente de 0,069 A e potência de 16,7 W e que tem-se o conhecimento das distâncias aplicadas a cada uma das válvulas, pode-se calcular o momento de cada uma das válvulas com uso da equação (6) e, comparando-se os resultados no Quadro 3, obter a dimensão dos condutores.

Dessa forma, os resultados obtidos podem ser vistos no Quadro 7:

Quadro 7 - Resultados do Cálculo de Bitola dos Condutores

Válvula	Distância	Corrente	Tensão (V)	Potência (W)	Momento Elétrico	Condutor Para 4% de queda (mm ²)
1	50	0,070	240	16,7	3,48	1,5
2	150	0,070	240	16,7	10,44	1,5
3	250	0,070	240	16,7	17,40	1,5
4	350	0,070	240	16,7	24,35	1,5
5	450	0,070	240	16,7	31,31	1,5
6	550	0,070	240	16,7	38,27	1,5
7	650	0,070	240	16,7	45,23	1,5
8	750	0,070	240	16,7	52,19	1,5
9	850	0,070	240	16,7	59,15	1,5
10	950	0,070	240	16,7	66,10	1,5
11	1050	0,070	240	16,7	73,06	1,5
12	1150	0,070	240	16,7	80,02	1,5
13	1250	0,070	240	16,7	86,98	1,5
14	1350	0,070	240	16,7	93,94	1,5
15	1450	0,070	240	16,7	100,90	1,5
16	1550	0,070	240	16,7	107,85	1,5
17	1650	0,070	240	16,7	114,81	1,5
18	1750	0,070	240	16,7	121,77	1,5
19	1850	0,070	240	16,7	128,73	1,5
20	1950	0,070	240	16,7	135,69	1,5
21	2050	0,070	240	16,7	142,65	1,5
22	2150	0,070	240	16,7	149,60	1,5
23	2250	0,070	240	16,7	156,56	1,5
24	2350	0,070	240	16,7	163,52	1,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste ponto, dois fatores devem ser ponderados: primeiramente, em termos de porcentagem de queda de tensão aceitável, não foi possível obter informações da válvula, assim, considerou-se uma queda de tensão aceitável de 4%. Além disso, com os resultados encontrados em cálculo, o momento elétrico encontrado indica que bitolas inferiores a 1,5 mm² poderiam ser utilizadas, ainda assim, optou-se pelo valor de 1,5 mm² pois a aplicação exige certa robustez, como já mencionado, inclusive dos condutores. A manipulação de condutores com diâmetro inferior poderia ocasionar rompimentos e demais problemas que podem ser evitados utilizando-se um condutor com 1,5 mm².

Considerando a distância aplicada para cada válvula, acrescida do condutor de retorno, o projeto irá requisitar um total de 31.200,00 metros do condutor de diâmetro mencionado.

Com isso, é possível realizar o levantamento das peças e equipamentos requisitadas para a implantação do sistema dimensionado neste trabalho, sendo ela mostrada no Quadro 8.

Quadro 8 - Resumo de Peças e Equipamentos

Lista de Peças e Equipamentos				
Tipo	Fabricante	Modelo/Tipo	Quantidade	Medida
Aspersores	Rain Bird	Série 3000	48	unidades
Válvulas	Asco	8210 3"	24	unidades
Curvas 90° com redução		3" para 2"	48	unidades
Conexão Tipo "T"		3"	24	unidades
Tubo PEAD		3"	3150	metros
Bomba Hidráulica	Schneider	ME-3	1	unidades
CLP (CPU)	Siemens	SIMATIC S7-1200	1	unidades
CLP (Módulo)	Siemens	SM 1222	2	unidades
Condutores Elétricos		1,5 mm ²	31200	metros

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A formação de poeira em ambientes de mineração é um problema real inerente ao tipo de atividade econômica. Não é algo que pode ser deixado de lado ao se analisar os riscos de uma indústria mineradora. Os riscos de se subestimar este problema podem ter como alvo tanto a própria indústria, com problemas na produção, quanto a sociedade, com problemas relacionados à saúde e segurança dos trabalhadores e da comunidade local. Ainda são visíveis problemas relacionados ao impacto ambiental causado pela poeira. Borges et al., (2016) e Thompson et al. (1997 apud SILVA, 2018), comprovam isso.

Este problema, no entanto, não é esquecido pelas indústrias do segmento. Silva (2018) realiza um estudo em que mostra como é realizado o método convencional para o despoieiramento de minas: utilizando caminhões pipa. Este método, embora conseguindo solucionar o problema que é a formação de poeira, acaba trazendo impactos negativos em ambientes de mineração, o que gera uma necessidade de buscar novas maneiras de solucionar o problema da poeira em ambientes da mineração.

Uma possível saída é o uso de um sistema de umectação de vias automatizado, de modo que o objetivo deste trabalho fora analisar se há a possibilidade de realizar tal feito. Assim, o dimensionamento de um sistema de umectação de vias em ambientes de mineração se mostrou um projeto complexo, por envolver diversos segmentos da engenharia, que englobam estudos hidráulicos, mecânicos, elétricos e de controle e instrumentação, tornando um estudo que demanda tempo e requisita conhecimentos em um leque de temas da engenharia.

A complexidade se torna ainda maior se for levado em consideração as variações relativas à análise do meio onde o projeto será destinado, ou seja, as características da via como largura, comprimento, presença de curvas e variação de altura entre pontos da via. Ainda assim, o trabalho teve resultados extremamente satisfatórios, comprovando que é possível elaborar um sistema de irrigação automatizado destinado à umectação de vias contemplando todos os critérios de segurança e eficiência já mencionados neste trabalho.

Durante a elaboração deste trabalho, foi possível determinar componentes recomendados para aplicações de irrigação em ambientes adversos, como a mineração. Ressaltou-se a importância da assertividade na análise do ambiente a qual o projeto será destinado, bem como o tipo da tubulação, de aspersos e o layout de montagem do sistema.

A partir do projeto elaborado, relatou-se que há fortes evidências de que este sistema se torna viável ao se comparar com sistemas utilizados com maior frequência.

Contudo, deve-se levar em conta que não há uma base sólida de estudos relativos à formação de poeira em vias de mineração, como, por exemplo, a relação entre o tipo de minério e o grau de umidade da via com a real formação de poeira, o que torna difícil mensurar a eficiência de sistemas de umectação de via, seja por meio de caminhões pipa ou via sistema de irrigação. A própria poeira, na maior parte dos casos, é reportada pelos próprios trabalhadores via observação humana, sem auxílio de equipamentos de medição que monitorem o grau de poeira.

Salienta-se, ainda, a dificuldade em se realizar uma comparação com sistemas de umectação via caminhões pipa e o sistema de irrigação automatizado, devido à dificuldade em se levantar os custos de implantação e manutenção de um sistema de irrigação automatizado. Essa dificuldade nasce do fato de que o preço das peças pode variar conforme a região e o tempo, bem como os custos de manutenção variam de acordo com cada empresa.

Por fim, não há, no momento, possibilidade de realizar uma análise *in loco* dos impactos da implantação destes sistemas e sua real redução de custos, devido aos distúrbios causados pela pandemia do novo Coronavírus.

Dado o resultado obtido, abre-se um leque de pesquisas que podem partir do tema, como:

- **Levantamento de custos de implantação e manutenção do sistema:** analisar valores de compra médio dos equipamentos e peças recomendados, comparando fornecedores, e levantando o preço e tempo médio para manutenção de um sistema de despoieiramento automatizado, podendo-se utilizar a medida de custo por metro.
- **Análise de viabilidade econômica se comparado ao sistema convencional:** Comparar os custos de instalação e manutenção do sistema de despoieiramento convencional e automatizado, analisando o tempo de *PayBack*, ou seja, quando o investimento no sistema automatizado daria o retorno financeiro.
- **Detalhamento do sistema de instrumentação e controle:** Dimensionar os sensores do sistema, bem como seu posicionamento na rede, além de elaborar a lógica de controle em linguagem própria para o CLP. Também deve-se elaborar um sistema supervisório integrado ao controle a fim de se realizar o monitoramento do processo e verificar a possibilidade do uso de sensores de poeira, umidade e pluviosidade.

- **Análises geológicas relacionadas à formação de poeira:** determinar uma unidade de medida para ser referência sobre a quantidade de poeira e, a partir dela, identificar quais tipos de mina são mais propensos à formação da poeira e a partir de qual nível a poeira já se tornaria um risco à saúde humana, ao meio ambiente e às operações da mina.

REFERÊNCIAS

- ANM – Agência Nacional de Mineração, **Informe Mineral**, Brasília, jul. 2020.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 22 – Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2019.
- BORGES, Ritta de Cássia Canedo Oliveira et al. Evaluation of pulmonary function and respiratory symptoms in pyrochlore mine workers. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, [s.l.], v. 42, n. 4, p.279-285, ago. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-37562015000000221>.
- CARVALHO, Guilherme Busi de. **Dimensionamento e simulação hidráulica da irrigação localizada sob condição variável de setores de operação**. 2004. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- CAMARGOS, João Octavio. **Manual de Instalações Elétricas Residenciais**. CEMIG, 2003.
- NETO, José Chaves. **Apostila de Meio Ambiente**. Fortaleza: Governo do Estado do Ceará, 2013. 132 p.
- DANIELETTTO, José Roberto B.. **Manual de tubulações polietileno e polipropileno**. São Paulo: Linha Aberta, 2008. 524 p.
- FIALHO, Arivelto Bustamante. **Automação Hidráulica: Projetos, Dimensionamento e análise de Circuitos**. 7. ed. rev. São Paulo: Erica, 2019.
- FRANCHI, Claiton Moro; CAMARGO, Valter Luis Arlindo de. **Controladores lógicos programáveis: Sistemas discretos**. São Paulo: Érica, 2008. 353 p.
- GEORGINI, Marcelo, **Automação Aplicada: Descrição e Implementação de Sistemas sequenciais com PLCs**, 9. ed. São Paulo: Erica, 2009
- Houghtalen, R. J., Hwang, N. H., & Akan, A. O. (2012). **Engenharia Hidráulica**. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda
- MORE: Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013. Disponível em: < <http://www.more.ufsc.br/> >. Acesso em: 02 dez 2019.
- NISKIER, Julio; MACINTYRE, Archibald Joseph; COSTA, Luiz Sebastião. **Instalações Elétricas**. Grupo Gen-LTC, 2000.
- PENTAIR. (2013). **Manual de Dimensionamento para Válvulas de Controle**. São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Potter, M. C., Wiggert, D. C., Hondzo, M., & Shih, T. I.-P. (2004). **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning.

POUSO, Manuella Thereza Pereira, **Sistema De Automação E Controle De Um Sistema De Irrigação**, 2012, 85 f. TCC (Graduação), Curso de Engenharia da Computação, Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2012. 46

PRYSMIAN. (Dezembro de 2006). **Instalações Elétricas Residenciais**. Santo André, São Paulo, Brasil.

RAIN BIRD. **Catálogo de Produtos de Irrigação**. Uberlândia: Rain Bird Corp, 2016. 190 p.

RIBEIRO, Fernando da Silva; HORTA, Sergio Luiz Lima. **Apresentação Mineração**. [s. L.]: Irricom, 20--.

SILVA, Breno Heleno Ferreira. **Consumo, desperdício e parâmetros operacionais das atividades dos caminhões pipa aplicados à mineração**. 2018. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2018.

SOUZA, Pedro Henrique A. I. de. **Apresentação dos cálculos para seleção de bomba para sistema de reaproveitamento de água de poços artesianos**. 2014. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SOUZA, Vladimir Ferreira de; QUELHAS, Osvaldo Luis Gonçalves. Avaliação e controle da exposição ocupacional à poeira na indústria da construção. **Ciência e Saúde Coletiva**, [s. L], v. 3, n. 8, p.801-807, jan. 2003.

TELLES, Pedro C Silva. **Tubulações industriais: Materiais, projeto, montagem**. 10. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2001. 276 p.

PRUDENTE, F. **Automação Industrial – PLC: Teoria e Aplicações: Curso Básico**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GEORGINI, M. **Automação Aplicada: Descrição e Implementação de Sistemas Sequenciais com PLCs**. São Paulo: Érica, 2000.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 425 p.

DENÍCULI, W. **Bombas Hidráulicas**. Viçosa: UFV, 2001. 162p.

DE MATTOS, EDSON E., DE FALCO, REINALDO, **Bombas Industriais**, 2^a Ed, Rio de Janeiro, Interciênciac 1998.

MARCONDES, Ricardo Augusto de Castro, **Estudo Do Uso Das Tubulações De Pead Em Sistemas De Distribuição De Água No Brasil**, 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental. São Paulo, 2016.

APÊNDICE 1 – PROJETO BÁSICO DO SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO AUTOMATIZADO

