

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA - CAMPUS PATOS DE MINAS
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

KAYROH GABRIEL ALVES MARTINS

**UM ESTUDO DA COMUNICAÇÃO DE SISTEMAS SCADA COM
INFRAESTRUTURA *LEAKY FEEDER* EM MINA SUBTERRÂNEA**

Patos de Minas

2023

KAYROH GABRIEL ALVES MARTINS

**UM ESTUDO DA COMUNICAÇÃO DE SISTEMAS SCADA COM
INFRAESTRUTURA *LEAKY FEEDER* EM MINA SUBTERRÂNEA**

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Eletrônica e de
Telecomunicações.

Orientadora: Prof. Dra. Karine Barbosa
Carbonaro

Patos de Minas

2023

KAYROH GABRIEL ALVES MARTINS

**UM ESTUDO DA COMUNICAÇÃO DE SISTEMAS SCADA COM
INFRAESTRUTURA *LEAKY FEEDER* EM MINA SUBTERRÂNEA**

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Eletrônica e de
Telecomunicações.

Patos de Minas, 04 de agosto de 2023.

Banca Examinadora:

Dra. Karine Barbosa Carbonaro – FEELT/UFU (orientadora)

Dr. Daniel Costa Ramos – FEELT/UFU

Dr. Júlio César Coelho - FEELT/UFU

RESUMO

Leaky Feeder é um meio físico para transporte de sinal de radiofrequência, amplamente utilizado nos processos de comunicação de rádio móvel em ambientes adversos devido a simplicidade de instalação, manutenção, custo-benefício e resistência a condições climáticas extremas. Nesse trabalho utiliza-se esse meio físico para a transmissão de dados de um sistema SCADA em uma mina subterrânea. Os resultados apresentados demonstram a possibilidade de utilização do cabo *Leaky Feeder* para automação dos processos na mina subterrânea. O sistema permite o monitoramento e a leitura dos dados de equipamentos de forma a reduzir custos em equipamentos de automação.

Palavras-chave: Automação, *Leaky Feeder*; mina subterrânea, sistema SCADA.

ABSTRACT

Leaky Feeder is a physical medium for radiofrequency signal transport, widely used in mobile radio communication processes in harsh environments due to its simplicity of installation, maintenance, cost benefit and resistance to extreme weather conditions. In this work, this physical medium is used to transmit data from a SCADA system in an underground mine. The results presented demonstrate the possibility of using the Leaky Feeder cable for automating processes in the underground mine. The system allows the monitoring and reading of equipment data to reduce costs in automation equipment.

Keywords: Automation, Leaky Feeder, underground mine, SCADA system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mineração <i>placer</i>	15
Figura 2.2 – Lixiviação no local.....	16
Figura 2.3 – Mineração a céu aberto.....	16
Figura 2.4 – Mineração subterrânea.....	17
Figura 2.5 – Representação de um sistema de comunicação TTE, no <i>downlink</i>	18
Figura 2.6 – Guias de ondas nos modos TE e TM.....	19
Figura 2.7 – Cabo <i>Leaky Feeder</i>	20
Figura 2.8 – Sistema de comunicação <i>Leaky Feeder</i>	21
Figura 2.9 – Componentes principais do sistema de comunicação <i>Leaky Feeder</i>	21
Figura 2.10 – Comunicação entre dois mineiros.....	23
Figura 2.11 – Análise de um enlace de comunicação <i>Leaky Feeder</i>	24
Figura 2.12 – Topologia de rede linear.....	25
Figura 2.13 – Topologia de rede em árvore.....	25
Figura 2.14 – Expansão da cobertura de um sistema.....	25
Figura 2.15 – Arquitetura Modbus.....	27
Figura 2.16 – Estrutura de barramentos RS485.....	29
Figura 2.17 – Controlador AC800M.....	31
Figura 2.18 – Drive, inversores de frequência Danfoss.....	32
Figura 2.19 – Módulo VSDM.....	33
Figura 2.20 – Módulo VIDM.....	33
Figura 3.1 – Extensão do sistema, superfície e subterrâneo.....	34
Figura 4.1 (a) – Topologia do sistema proposto.....	35
Figura 4.1 (b) – Fotografia sistema proposto (superfície).....	36
Figura 4.1 (c) – Fotografia sistema proposto (subsolo).....	36
Figura 4.2 – Recomendação de parâmetros no manual do drive Danfoss.....	37
Figura 4.3 – Sequência de bits informada no manual do drive Danfoss.....	38
Figura 4.4 – Configuração no ModScan.....	39
Figura 4.5 – Comunicação estabelecida e monitoramento dos registros do inversor via ModScan.	40
Figura 4.6 (a) – Configuração no sistema 800xA, drive parado.....	41
Figura 4.6 (b) – Configuração no sistema 800xA, drive rodando.....	41

Figura 4.1 – Mapa de memória.....	43
Figura 4.2 – Status da comunicação ModBus no sistema 800xA.....	44
Figura 4.3 – Status da comunicação Modbus no sistema 800xA após <i>reset</i> na fonte de alimentação do <i>Leaky Feeder</i>	44
Figura 4.4 (a) - Sistema 800xA com status do inversor rodando na Nexa Vazante: leitura da corrente em velocidade em 100%.....	45
Figura 4.4 (a) - Sistema 800xA com status do inversor rodando na Nexa Vazante: leitura da corrente em velocidade em 50%.....	46
Figura 4.5 – IHM de controle do drive.....	46
Figura 4.6 – Arquitetura final.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	<i>ASEA Brown Boveri</i>
AGC	Controle Automático de Ganho
COM	Centro de Operações de Mina
CPU	Unidade Central de Processamento
DC	<i>Direct Current</i>
EOW	<i>Extended Operator Workplace</i>
GHz	Giga Hertz
IDM	Equipamento de Dados de Subsolo
IEEE	Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
IHM	Interface Homem-Máquina
IP	<i>Internet Protocol</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LK	<i>Leaky Feeder</i>
Mbps	Megabits por segundo
MAC	<i>Media Access Control</i>
MHz	Mega Hertz
MTU	Unidade Terminal Mestre.
NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PCD	Bloco de Leitura e escrita do drive
PLC	Controlador Lógico Programável
RF	Radiofrequência
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RTU	Unidade Terminal Remota
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
TE	<i>Transverse Electric</i>
TM	<i>Transverse Magnetic</i>
TTA	<i>Through the Air</i>
TTE	<i>Through the Earth</i>

TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TTW	<i>Through the Wire</i>
UART	Receptor Transmissor Assíncrono Universal
UHF	<i>Ultra-high Frequency</i>
VIDM	Módulo de Dados em Linha VHF
VHF	<i>Very-high Frequency</i>
VSDM	Módulo de Dados de Superfície VHF

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	TEMA DO PROJETO	12
1.2	PROBLEMATIZAÇÃO	13
1.3	HIPÓTESES	13
1.4	OBJETIVOS	13
1.4.1	Objetivo Geral	13
1.4.2	Objetivos Específicos	13
1.5	JUSTIFICATIVAS	14
1.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	TIPOS DE MINAS	15
2.2	PROPAGAÇÃO SUBTERRÂNEA	17
2.2.1	Propagação pela terra.....	17
2.2.2	Propagação pelo ar.....	18
2.2.3	Propagação pelo cabo	19
2.3	<i>LEAKY FEEDER</i>	20
2.4	SISTEMA SCADA.....	26
2.5	PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO.....	27
2.5.1	Modbus TCP/IP	27
2.5.2	Modbus RTU	28
2.5.3	RS485	29
2.5.4	Ethernet/IP	30
2.6	EQUIPAMENTOS	30
2.6.1	Controladores Lógico Programáveis	30
2.6.2	Drives.....	31
2.6.3	<i>Head end</i>	32
2.6.4	VSDM e VIDM.....	32
2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
3	MATERIAS E MÉTODOS.....	34
4	DESENVOLVIMENTO.....	36

4.1 SISTEMA PROPOSTO.....	36
4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	44
4.1 RESULTADO DA ETAPA 1	44
4.2 RESULTADO DA ETAPA 2.....	44
4.3 RESULTADO DA ETAPA 3	46
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
6 CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIA	52

1. INTRODUÇÃO

O mercado brasileiro e mundial de mineração só tem aumentado, e atualmente, o Brasil ocupa a terceira posição no *ranking* mundial de produção de minério [1]. A maioria das operações do mercado de mineração brasileiro são subterrâneas envolvendo equipamentos e trabalhadores. Nesse cenário, é fundamental a utilização de um sistema de comunicação adequado para manter contato em tempo real com todos os membros das equipes que trabalham em espaços confinados. Além disso, a crescente automação na mineração tornou importante garantir a comunicação entre os diferentes equipamentos e a superfície.

Os requisitos do sistema de comunicação de uma mina são: bidirecional e em tempo real garantindo tanto a comunicação dos trabalhadores em casos de desastres quanto a automação e supervisão dos processos.

As minas subterrâneas são consideradas um ambiente úmido e os fatores como água corrosiva, poeira, calor, gases explosivos e tóxicos afetam o bem-estar dos trabalhadores e prejudicam a vida útil e a regulagem dos equipamentos, como os de comunicação. Além disso, nas minas observa-se uma expansão de área em função da retirada de minério conduzindo alterações na infraestrutura de telecomunicações [2].

Existem três modelos de comunicação que podem ser utilizados no ambiente hostil das minas subterrâneas: *Through the Air* (TTA), *Through the Earth* (TTE) e *Through the Wire* (TTW) [2]. O TTA utiliza a rádio frequência para a comunicação e o TTW usa meios guiados para comunicação dentro da mina e, entre superfície e minas. Esses sistemas podem ter alterações nos seus coeficientes de reflexão e difração influenciadas pela condutividade das paredes da mina. E isso conduzirá a dispersão temporal do canal de propagação. Já no TTE, os sinais são enviados por antenas da superfície até o interior da mina. Nesse sistema, a perda de propagação no canal é influenciada pela condutividade do meio que depende do tipo de mineral explorado e da proporção desse mineral. Cada um desses sistemas é mais indicado para uma determinada aplicação e apresentam requisitos específicos e distintos para os seus equipamentos.

1.1 TEMA DO PROJETO

Estudar a possibilidade de utilização do cabo *Leaky Feeder* para tráfego de sinais provenientes dos sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition - SCADA*) em um ambiente de mina subterrânea.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

O ambiente extremo que compõe uma mina subterrânea indica fatores que prejudicam e tornam os sistemas existente mais vulneráveis a danos e falhas.

Desta forma a utilização do *Leaky Feeder* para a aplicação em sistemas de baixo tráfego de dados permitirá o monitoramento de um processo existente na mina com a utilização de um meio físico projetado para suportar as condições existente do local, no entanto, um ponto a ser considerado é a dificuldade de transformar um cabo desenvolvido para sinais VHF/UHF em um meio de transmissão via protocolo de comunicação Modbus TCP/IP, sendo fisicamente um modelo de comunicação RS485.

Estudos preliminares de fornecedores de equipamentos de comunicação para mina subterrânea apontam que por meio de módulos de conversão e comunicação é possível utilizar o *Leaky Feeder* como meio de transmissão de um sistema de controle supervisão e aquisição de dados (SCADA - *Supervisory Control And Data Acquisition*).

O *Leaky Feeder* é utilizado para comunicação em rádio frequência na mina e, ele está instalado em todas as frentes de operação. Ele suporta as condições adversas das minas subterrâneas. Observa-se a possibilidade de utilização dele para a automação de processos e equipamentos existentes. Essa nova utilização dele proporcionará uma redução no custo de instalação e manutenção de fibra ótica, instalada nas galerias subterrâneas das minas. Com isso, será possível gerar relatórios de falhas, verificar em tempo real o funcionamento de um determinado equipamento e atribuir um comando (ligando e desligando) sem a adição de custo de instalação de infraestrutura de controle.

1.3 HIPOTHESES

Com a busca por aprimoramento e novas tecnologias para a automação na mineração, seria possível monitorar e controlar um processo, com baixa taxa de dados, com qualidade e sem perda de informações?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Estudo e avaliação da transmissão de dados de um sistema SCADA via *Leaky Feeder* em uma mina subterrânea.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudo da tecnologia existente no do *Leaky Feeder* empregada no sistema proposto;
- Aprendizado sobre o funcionamento dos módulos de conversão de um sinal RF para comunicação RS485;
- Desenvolvimento de um sistema de bancada para a verificação do funcionamento do cabo do *Leaky Feeder* para um sistema de supervisão e aquisição de dados;
- Validação dos resultados obtidos via simulação em bancada e iniciar estudos futuros com uma aplicação real;
- Conclusão do estudo realizado apresentando a viabilidade do sistema proposto.

1.5 JUSTIFICATIVA

Dentre os modelos de comunicação aplicados ao ambiente das minas, este trabalho estuda o modelo híbrido entre os modos de propagação TTW e TTA. Nesse modelo tem-se o meio cabeado híbrido do *Leaky Feeder* que é utilizado para receber e transmitir informações pelos túneis de mineração. Ele é constituído por um cabo permeável que possibilita a saída do sinal de comunicação que está sendo emitido por ele. Assim, é possível acessar a informação ao longo de toda área de cobertura do cabo.

1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O restante desse trabalho está organizado da seguinte maneira: No Capítulo 2 é descrito o referencial teórico. O desenvolvimento da metodologia é apresentado no Capítulo 3. O Capítulo 4 apresenta a discussão dos resultados obtidos. Por fim, as conclusões são apresentadas no Capítulo 5

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são definidos os tipos de mineração e propagação de sinais no ambiente das minas. Na terceira seção desse capítulo, é apresentado o cabo *Leaky Feeder* responsável pela comunicação nas minas subterrâneas. E nas outras seções são apresentados os conceitos do sistema SCADA, dos protocolos de comunicação e alguns equipamentos.

2.1 TIPOS DE MINERAÇÃO

Na extração de minérios são utilizadas técnicas definidas conforme a dificuldade de extração e seu valor econômico. Atualmente os tipos de mineração mais conhecidas são garimpo, lixiviação, a céu aberto e subterrânea [3].

A Figura 2.1 ilustra a Mineração *Placer* (garimpo), método de separação de metais preciosos por meio de peneiração. Esse método é geralmente realizado em leitos de rios, areias e onde acontecem depósitos de sedimentos naturais. Os minérios comuns neste tipo de extração são: ouro, platina, diamantes e estanho.

Figura 2.1 –Mineração *placer*.

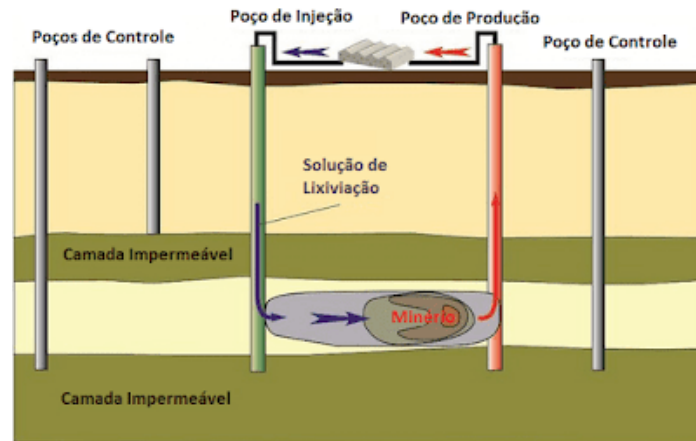


Fonte: [4].

No processo de extração por lixiviação (arraste ou lavagem) acontece a remoção de compostos inorgânicos ou orgânicos de rochas minerais, solo, resíduos sólidos, e outros. Os principais tipos de lixiviação são no local “in situ”, em pilha ou em depósito (*heap* ou *dump*), percolação ou cuba (*Vat*), em tanques pachuca e sob pressão em autoclaves. A Figura 2.2 ilustra a Lixiviação no local (*In-situ mining*), método usado para recuperar composto mineral em seu local de origem por meio de injeção de solução que o dissolve retirando a

mistura por meio de bombeamento para superfície. O minério mais comum para este tipo de extração é o urânio [5].

Figura 2.2 – Lixiviação no local.



Fonte: [5].

A Figura 2.3 ilustra a Mineração a Céu Aberto (*Surface mining*), geralmente utilizada para extração de minérios que estão próximos a superfície, o minério mais comum nesse de tipo de extração é o carvão, ferro e bauxita.

Figura 2.3 – Mineração a céu aberto.



Fonte: [6].

A Figura 2.4 ilustra a mineração subterrânea (*Underground mining*) que necessitam de túneis embaixo da terra, devido à profundidade, de 300 metros até 3,1 km. Os principais minérios são, ouro, chumbo, prata e zinco.

Atualmente, as tendências na indústria da mineração que demonstram que as minas subterrâneas tendem a ser mais profundas, de acesso muito mais difícil. E de acordo com [8], o aumento da profundidade das minas subterrâneas torna os seus processos complexos e mecanizados.

Figura 2.4 – Mineração subterrânea.



Fonte: [7].

2.2 PROPAGAÇÃO NAS MINAS SUBTERRÂNEA

O meio de propagação nas minas subterrâneas que possuem rochas maciças, solo e água atenuam as ondas eletromagnéticas em frequências altas. Por isso, é necessário estabelecer enlaces de propagação pela terra (TTE - *Through The Earth*), pelo ar (TTA - *Through The Air*) e pelo cabo (TTW - *Through The Wire*).

2.2.1 Propagação pela terra

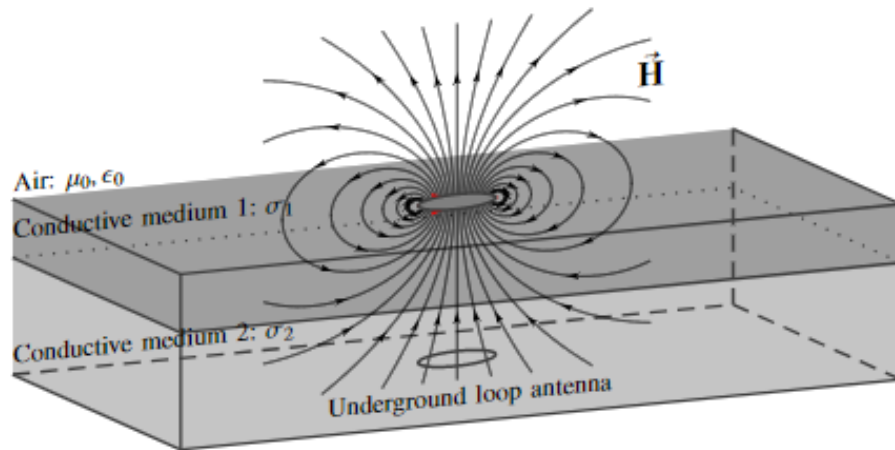
A propagação pela terra (TTE) consiste no uso de ondas eletromagnéticas para estabelecer uma ligação entre a superfície e a mina subterrânea utilizando como meio de propagação a terra. A transmissão ocorre por indução magnética em frequências abaixo de 30 kHz, o que pode estar sujeito a ruídos atmosféricos e harmônicos produzidos por equipamentos limitando o desempenho da comunicação, especialmente no *uplink* [9].

Após o *MINER Act*, o NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) apoiou o desenvolvimento de uma série de tecnologias de comunicação e rastreamento em minas subterrâneas [2]. Cinco protótipos foram desenvolvidos por cinco empresas: *Alertek*, *Spectrum Technologies*, *Lockheed Martin*, *Stolar* e *Ultra Electronics*. Desses cinco protótipos

tem-se quatro que se baseiam na detecção de campos magnéticos, utilizando antenas loop na detecção de campos elétricos como ilustrado na Figura 2.5.

Os sistemas TTE desenvolvidos proveem comunicação unidirecional e em alguns casos bidirecional com alcance de profundidade de 300 m para voz e 600 m para texto. Para transmitir voz, os protótipos utilizaram frequências de 3150 Hz a 4820 Hz. Alguns protótipos possuíam modo de localização baseado em triangulação, onde apenas um tom é transmitido no enlace de subida. Usando os receptores colocados na superfície é possível determinar a posição do transmissor processando o sinal recebido. [9]

Figura 2.5 – Representação de um sistema de comunicação TTE, no *downlink*.



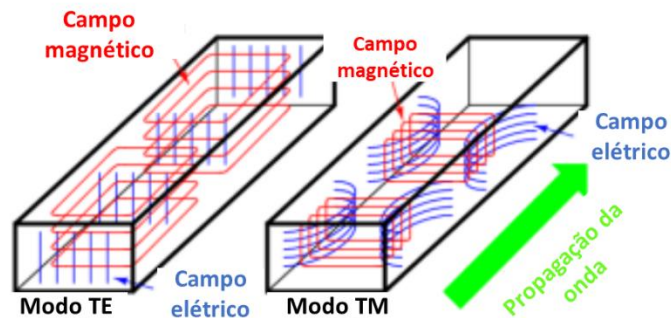
Fonte: [9].

2.2.2 Propagação pelo ar

Na propagação pelo ar (**TTA**), o ar da mina com meio de propagação. Minas abertas sustentadas por pilares apresentam condições de propagação de ondas diferentes das minas em túnel que criam um efeito de guia de onda com baixo nível de propagação. Os sistemas baseados em TTA apresentam facilidade de instalação e adaptação a expansão das minas. Eles são adaptações de um ou vários sistemas de comunicação sem fio para curto alcance como: guias de ondas, Zigbee, WiFi e RFID (*Radio Frequency Identification*) [2].

Túneis de guias de ondas: Em [10], os autores identificaram os túneis de minas subterrâneas como guias de ondas com baixo nível de perda por propagação. O modelo de propagação de transmissão em modos transversal magnético (TM – *Transverse Magnetic*) e elétrico (TE – *Transverse Electric*) como ilustrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Guias de ondas nos modos TE e TM.



Fonte: Adaptado de [10].

Zigbee: sistema sem fio, operando na faixa de 2,4 GHz, para rede de área pessoal de baixo consumo e custo. Essas redes são, frequentemente, usadas como rede de núcleo para as transmissões RFID em minas subterrâneas.

WiFi: tecnologia versátil utilizada para formar as redes *ad hoc* de simples implementação em minas subterrâneas.

Identificação por rádio frequência, RFID: sistema baseado em etiquetas que permitem a identificação de pessoas, objetos ou equipamentos em uma mina subterrânea. Para etiquetas passivas a distância é de 8 metros e para as etiquetas ativas é de 100 metros. Os sinais das etiquetas são recebidos pelos roteadores fixos e enviados a estação base para a monitoração do usuário em tempo real.

2.2.3 Propagação pelo cabo

Na propagação pelo cabo (TTW) são usados meios guiados tanto para comunicação dentro da mina quanto entre a superfície e a mina.

Um dos mais antigos instrumentos para comunicação em minas é o telefone de magneto, baseado em linha cabeada para comunicação de voz. Ele é composto por um gerador de magneto formado por ímãs e acionado manualmente por uma alavanca produzindo tensão alternada de 100 V entre 15 e 20 Hz, que após sua transmissão pelo cabo aciona os sinos dos outros telefones conectados. Estabelecida a conexão, baterias são usadas para garantir a alimentação dos equipamentos de comunicação de voz [2].

As fibras ópticas são utilizadas porque permitem altas taxas de transmissão por longas distâncias dentro de uma mina e, podem atingir distâncias de 70 km. Elas possuem grande

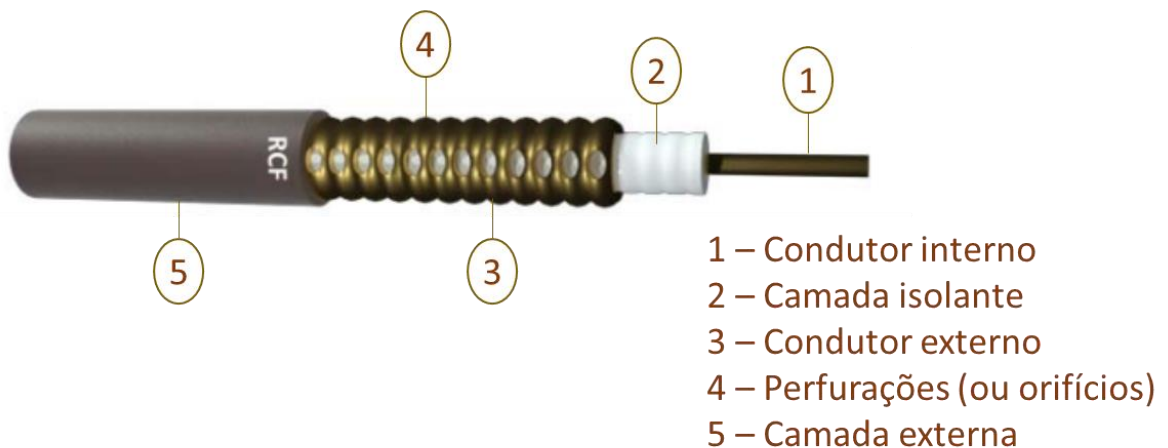
capacidade e, por isso são utilizadas no monitoramento de algumas atividades em tempo real como, automatização de sistemas e proteção contra incêndio. Porém, a sua implantação é cara e inflexível.

Além desses meios de comunicação, a propagação pelo cabo pode ser realizada pelo *Leaky Feeder*.

2.3 LEAKY FEEDER

A Figura 2.7 ilustra o *Leaky Feeder* que é um meio físico para o transporte de sinal de radiofrequência operando na faixa de VHF em 150 MHz ou na faixa de UHF em 450 MHz [11]. Observe os pontos 3 e 4 da Figura 2.7, no lugar da blindagem metálica externa para proteção contra as interferências eletromagnéticas, esse tipo de cabo coaxial possui uma fina camada de cobre com pequenas perfurações ou orifícios. Ao longo de todo o cabo, essas perfurações funcionam como um arranjo de antenas com capacidade de transmitir e receber sinais de rádio ao longo de toda a sua extensão. De acordo com as características de irradiação e recepção, esse cabo pode ser considerado um híbrido entre os modos de propagação TTW e TTA.

Figura 2.7 – Cabo *Leaky Feeder*.

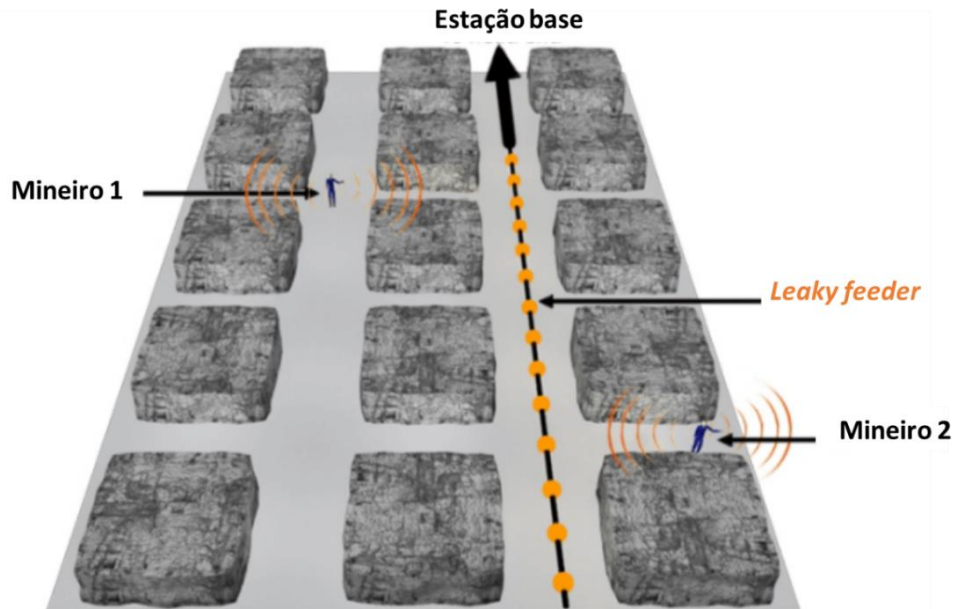


Fonte: Adaptado de [11].

O cabo *Leaky Feeder* é um meio de transmissão com baixa perda que possibilita a transmissão de sinais de radiofrequência a distâncias maiores do que seria possível sem o cabo. Ele é amplamente utilizado em ambientes adversos devido a simplicidade de instalação, manutenção, custo-benefício e resistência a condições climáticas extremas [11].

A Figura 2.8 ilustra a aplicabilidade do cabo *Leaky Feeder* em uma mina subterrânea. Observe que os dois mineiros são capazes de se comunicarem porque possuem rádios portáteis na faixa de RF do cabo.

Figura 2.8 – Sistema de comunicação *Leaky Feeder*.

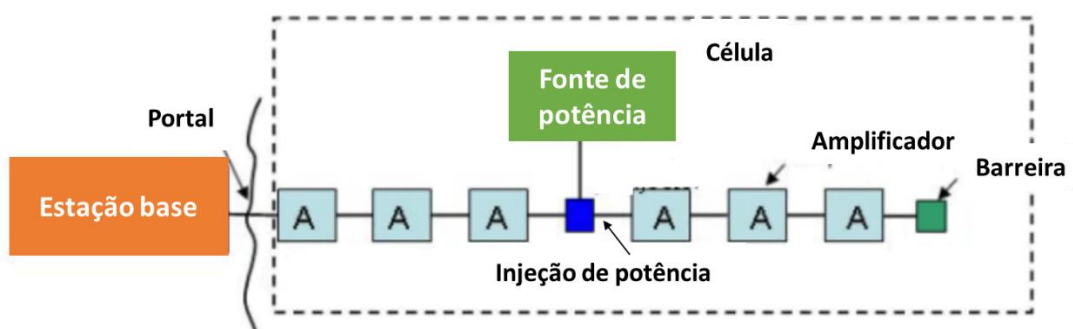


Fonte: Adaptado de [11].

Os rádios portáteis subterrâneos e dos mineiros têm comunicação com um transceptor de rádio, estação base, no Centro de Operações da Mina (COM) localizado na superfície. O cabo estende o alcance efetivo da estação base.

Na Figura 2.9 são ilustrados os componentes que compõem o sistema. São eles [11]: estação base, acoplador de potência, amplificadores de linha, barreiras, divisores, rádios móveis, antenas auxiliares e terminadores.

Figura 2.9 – Componentes principais do sistema de comunicação *Leaky Feeder*.



Fonte: Adaptado de [11].

A estação base é o concentrador principal do sistema. Ela trata as comunicações originadas no COM, trafega as informações para a mina e as retransmite entre os diferentes ramos do sistema. A configuração típica da estação base inclui um *head end*, repetidores de rádio, fontes de alimentação, interconexão telefônica, servidores de dados e acesso de rede ethernet.

As comunicações na mina alimentam o *head end* que transmitem os sinais para baixo, transmissão *downlink*. As comunicações de rádio originadas na mina trafegam ao longo do cabo “para cima” até a estação base, transmissão *uplink*. As frequências de *uplink* e *downlink* não são iguais porque o *head end* realiza um deslocamento de frequência antes de retransmitir a mensagem. Portanto, o rádio portátil transmite em uma frequência e recebe em outra. Por exemplo, um rádio VHF transmite em 170 MHz e recebe em 150 MHz e, um rádio UHF transmite em 470 MHz e recebe em 450 MHz [11].

O sinal de comunicação entre o COM e o portal da mina trafega em um cabo não irradiante. Porém, quando o sinal chega ao subsolo, dentro da mina subterrânea, o cabo não irradiante é emendado ao cabo *Leaky Feeder*. A potência DC é injetada no *head end* para alimentar os componentes localizados ao longo do cabo. Os sinais de RF no cabo *Leaky Feeder* sofrem perda de energia à medida que eles propagam pelo cabo. Isso ocorre porque há muito vazamento intencional do sinal ao longo da extensão do cabo. Outra perda de energia significativa ocorre nos pontos de junção onde a potência do sinal pode ser dividida entre dois ou mais ramos de alimentação. Para amenizar essa perda, são inseridos amplificadores de linha ao longo do cabo para aumentar a força do sinal. Para aplicações industriais, os amplificadores são unidirecionais, mas para a aplicação em minas subterrâneas, os amplificadores bidirecionais são necessários.

O próprio cabo *Leaky Feeder* usa a potência injetada no *head end* para alimentar os amplificadores de linha mais próximos ao COM. Na configuração típica, os amplificadores são espaçados de 450 a 550 metros de distância [11]. Esses amplificadores utilizam o controle automático de ganho (AGC) para garantir que o nível de potência de saída permaneça constante e independente do nível de potência do sinal de entrada. Isso equilibra os níveis de potência ao longo do sistema e suaviza sobretensões.

As barreiras são dispositivos utilizados para separar as células, que são os blocos de construção de um sistema *Leaky Feeder*. Essas barreiras passam os sinais de RF entre as seções, mas também promove o isolamento da potência entre elas. Isso garante potência em todo o sistema e, confina os desequilíbrios em uma única célula. A divisão do sistema em células é uma demanda da mineração para permitir que os sistemas operem em uma atmosfera explosiva.

As junções são pontos onde o cabo apresenta ramificações em outras direções. Nessas junções, o uso de divisores divide o cabo em dois ou mais. Os divisores mantêm a correspondência de impedância adequada entre as ramificações. As junções também determinam como a potência é dividida entre cada ramificação, caso uma ramificação exija mais ou menos potência.

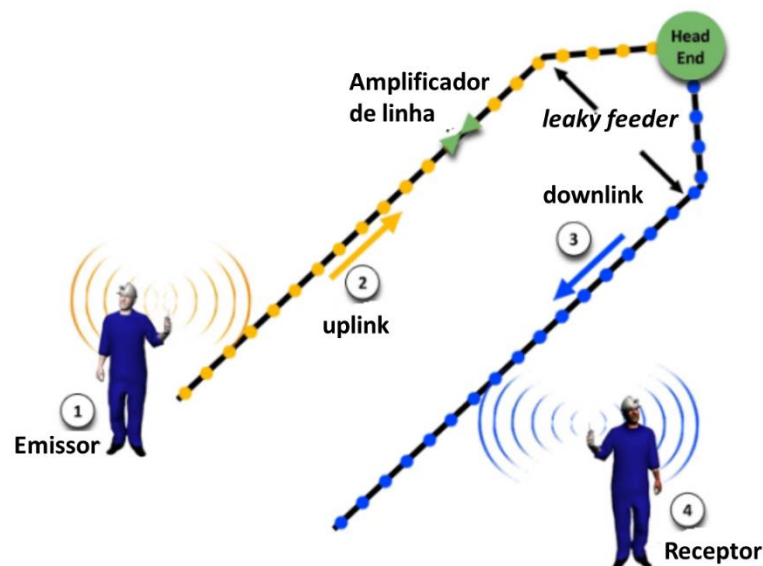
Os rádios portáteis móveis são os principais dispositivos que se conectam ao cabo. Outros dispositivos, como o RFID, quando conectados ao cabo retransmite as informações de volta para a estação base no COM toda vez que é feita a varredura de uma etiqueta.

Para estender o alcance do cabo é utilizada uma antena auxiliar ou de cobertura. Essas antenas são anexas a uma ramificação para fornecer cobertura em um corte transversal ou a uma entrada paralela. As antenas auxiliares, de forma e tamanhos variados, atendem aos requisitos de cobertura de rádio. As antenas de terminação, na extremidade do cabo, também estendem o alcance além do comprimento do cabo.

A unidade terminadora encontra-se no final do cabo e, minimiza as reflexões ou efeitos indesejáveis devido as mudanças abruptas na impedância do cabo.

A Figura 2.10 ilustra a comunicação entre dois mineiros conversando em seus rádios portáteis.

Figura 2.10 – Comunicação entre dois mineiros.



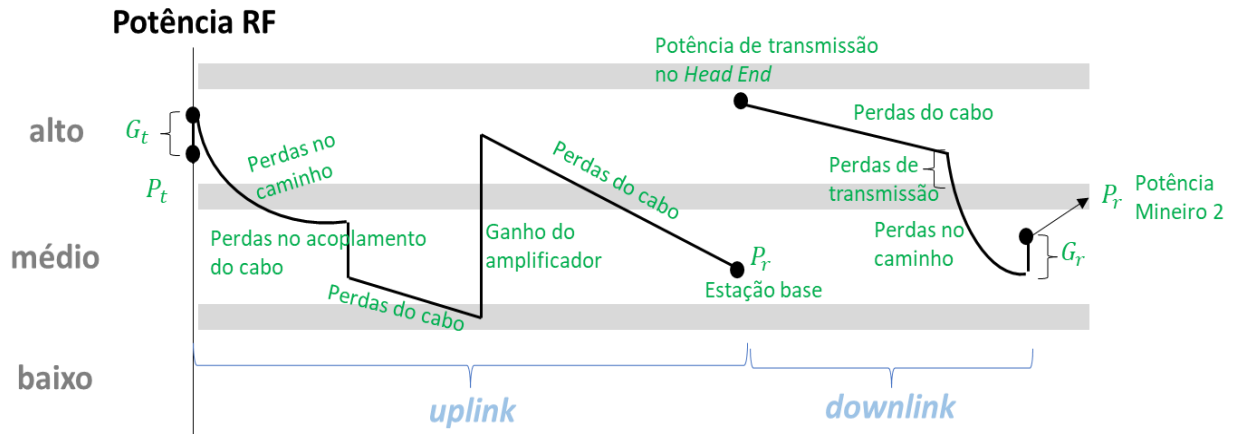
Fonte: Adaptado de [11].

O primeiro enlace, *uplink*, estende do rádio do mineiro emissor até o *head end* na estação base, partes 1 e 2 do diagrama. Na parte 1, o sinal propaga pelo ar e na parte 2, propaga pelo

cabo. O segundo enlace, *downlink*, estende da estação base até o rádio do mineiro receptor, partes 3 e 4 do diagrama. Na parte 3, o sinal propaga pelo cabo e na parte 4, o sinal é irradiado no ar até o rádio portátil.

A Figura 2.11 ilustra a análise conceitual do enlace esboçado na Figura 2.10. Quando o sinal alcança o amplificador de linha, o nível do sinal é elevado pelo ganho desse amplificador. Porém, mais perdas ocorreram até o sinal atingir a estação base. Na estação base, o sinal é amplificado e retransmitido, em uma frequência diferente, para propagar no enlace de *downlink*. Nessa parte do enlace, há perdas do sinal no cabo até que ele chegue ao local mais próximo do rádio receptor. Também há perda no processo de conversão, do sinal do cabo para o ar, e na propagação do sinal no ar. Caso a antena receptora tenha ganho positivo, pode acontecer um aumento na potência de RF. A potência recebida no rádio do receptor deve estar acima do limiar de nível de sinal para que o enlace seja considerado viável. O emissor e o receptor não devem se afastar do cabo porque isso aumentará a perda de propagação e conseqüentemente diminuirá a potência.

Figura 2.11 – Análise de um enlace de comunicação *Leaky Feeder*.

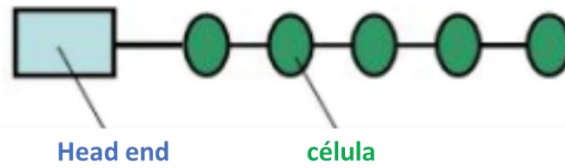


Fonte: Adaptado de [11].

A topologia de rede linear é ilustrada na Figura 2.12. Observe que as lacunas entre as células, fornecem isolamento de corrente direta para que a alimentação dos amplificadores de linha em uma célula seja independente de outra célula. Os sinais de RF conseguem saltar essas lacunas. Esse tipo de topologia é compatível com as longas entradas das minas.

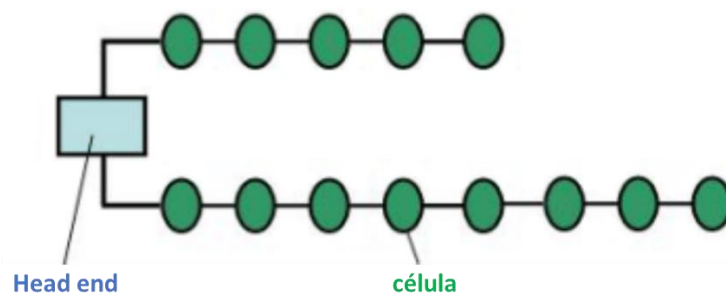
A Figura 2.13 ilustra a topologia da rede em árvore. Ela é utilizada quando é desejado uma comunicação com entradas paralelas. Todas as comunicações passam pelo *head end*, que atua como base da árvore.

Figura 2.12 – Topologia de rede linear.



Fonte: Adaptado de [11].

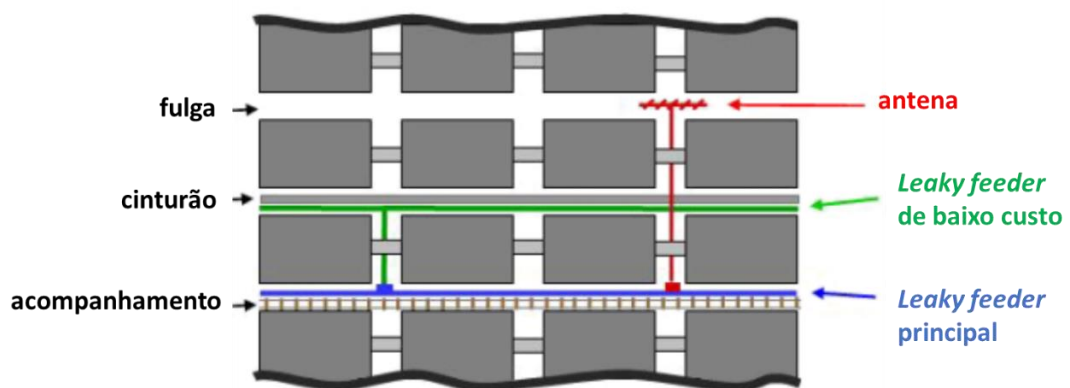
Figura 2.13 – Topologia de rede em árvore.



Fonte: Adaptado de [10].

Topologias mais elaboradas podem ser usadas para aumentar a área de cobertura de um sistema de cabo *Leaky Feeder*. Por exemplo, a Figura 2.14 ilustra a cobertura de rádio estendida pelas entradas paralelas.

Figura 2.14 – Expansão da cobertura de um sistema.



Fonte: Adaptado de [11].

Observe que foi emendado um cabo de custo inferior e de baixo desempenho ao cabo principal. Ainda ao cabo principal foi emendada uma antena para estender a área de cobertura do rádio para outras áreas estratégicas.

A natureza linear torna o sistema vulnerável a certas falhas. Por isso, é usual a construção de uma redundância. Se existir um cabo independente e redundante em uma entrada paralela, ele permanecerá operacional caso ocorra um rompimento do cabo principal. Assim, qualquer mineiro que tenha a sua comunicação cortada poderá passar para outra entrada para restabelecer a sua comunicação com a superfície.

2.4 SISTEMA SCADA

Os sistemas SCADA são amplamente utilizados para controlar sistemas de processo em plantas industriais. Eles contam com sensores para a coleta de dados e atuadores para realizar ações de controle. No sistema são reunidas informações do Controlador Lógico Programável (PLC - *Programmable Logic Controller*) e de outros controladores em uma rede usando protocolos de camada de aplicação dedicados. Esse sistema normalmente envolve os seguintes atuadores/componentes [14]:

- **Operador:** um operador humano monitora o sistema SCADA e executa funções de controle de supervisão sobre as operações da planta.
- **Interface Homem-Máquina (IHM):** esse sistema apresenta os dados do processo ao operador humano e permite que o operador controle o processo. Uma IHM também pode ser conectada a um banco de dados, que registra tendências, dados de diagnóstico e informações de gerenciamento (procedimentos de manutenção programada, informações logísticas etc.).
- **Unidade Terminal Mestre (MTU - *Master Terminal Unit*):** dispositivo mestre que reúne dados dos PLCs e atuadores remotos. Ele apresenta os dados ao operador via IHM e transmite sinais de controle. Além disso, contém a lógica de controle de alto nível para o sistema [14].
- **Unidade Terminal Remota (RTU – *Remote Terminal Unit*):** atua como escravo na arquitetura mestre/escravo. Essa unidade envia sinais para o dispositivo sob controle, adquire dados dos dispositivos, recebe comandos da MTU e transmite os dados coletados para a MTU. Uma RTU pode ser um PLC.
- **System 800xA:** oferece a produtividade consolidando processo, energia, segurança e telecomunicações em um único sistema. Além disso, proporciona um ambiente de sala de controle de alta performance para o operador, com a estação de operação avançada com recursos mais avançados de ergonomia (EOW - *Extended Operator Workplace*).

A sexta geração, 800xA v6, não é apenas para novos projetos, pois foi desenvolvida para suportar atualizações de sistemas DCS antigos que funcionam em sistemas operacionais não suportados, como o Microsoft XP. Essa geração oferece um ambiente de automação mais seguro que reduz o custo total de propriedade, oferecendo inúmeras oportunidades para melhorar a produtividade [18].

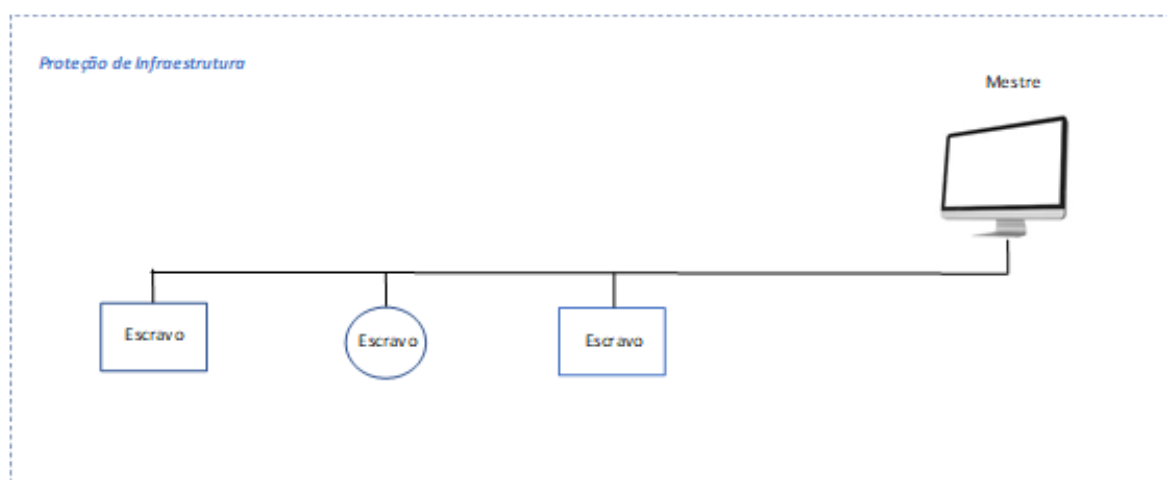
2.5 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

Durante os testes em bancada e o desenvolvimento do projeto, alguns protocolos de comunicação são utilizados, Modbus TCP/IP, Modbus RTU, RS485 e Ethernet. Cada um deles será apresentado nas subseções a seguir.

2.5.1 Modbus TCP/IP

Modbus é um protocolo de camada de aplicação do modelo OSI que fornece comunicação serial entre dispositivos conectados em diferentes barramentos ou redes como ilustrado na Figura 2.15. Ele é aplicado em controladores lógico programáveis permitindo controlar máquinas e processos em várias aplicações.

Figura 2.15 – Arquitetura Modbus.



Fonte: O autor.

As comunicações Modbus são consulta/resposta (comunicação entre um mestre e um escravo) ou difusão (um mestre envia um comando para todos os escravos). A mensagem contém as seguintes informações: endereço do receptor pretendido, comando a ser executado e os dados necessários para o receptor executar o comando [14].

O Modbus TCP (*Transmission Control Protocol*) embute a mensagem Modbus no segmento TCP, camada de transporte, e atribui um número de porta específico 502. O quadro da camada de enlace inclui os cabeçalhos das camadas superiores IP (*Internet Protocol*), TCP, o específico do Modbus e a carga útil limitada a 253 bytes para manter a compatibilidade com o protocolo serial Modbus. Vários campos no cabeçalho Modbus TCP também são herdados de protocolos serial [15].

A arquitetura mestre-escravo apresentada na Figura 2.15 é implementada com dispositivos simples porque a maioria dos controles de protocolo e funcionalidades são incorporados no dispositivo mestre. Já no Modbus TCP, a situação é invertida porque o mestre é um “cliente TCP” e os dispositivos escravos são “servidores TCP” [15].

Em relação à rede, os dispositivos que suportam Modbus TCP devem implementar todos (ou um subconjunto significativo) das características de um servidor TCP/IP. A semântica cliente/servidor TCP também é mais geral do que o modelo mestre-escravo simples. Por exemplo, várias transações Modbus podem ser enviadas simultaneamente para um único dispositivo e um dispositivo pode aceitar conexões de diferentes clientes [15].

2.5.2 Modbus RTU

O Modbus RTU é uma regra aplicada à forma como os dados são enviados/recebidos. Ele define uma forma de interpretação dos dados que são enviados e recebidos, no meio físico, por um dispositivo [22].

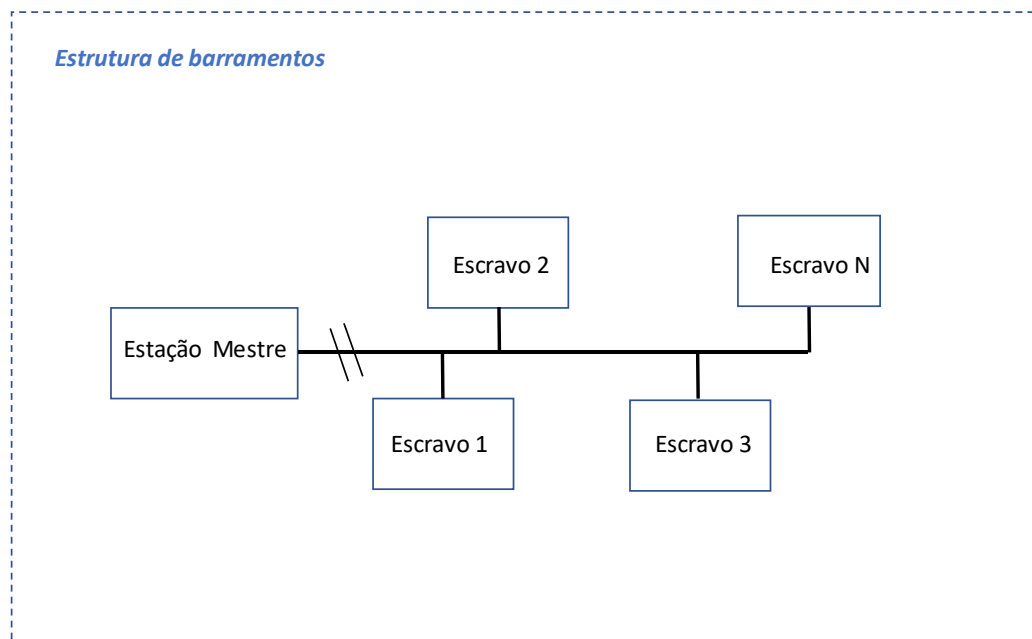
No caso dos PLCs, a regra que define como os dados são enviados fisicamente é normalmente definida pela comunicação/padrão RS-485. Essa comunicação permite a conexão de diversos dispositivos ao mesmo tempo, sendo um deles o mestre (quem coordena a comunicação) e, o restante, são os escravos [22].

O Modbus é encontrado em três formas diferentes: RTU, ASCII e TCP. Os três não são a mesma coisa, existindo semelhança apenas entre o RTU e o ASCII. No padrão RS-485, o envio e recebimento dos dados é serial assíncrono. Ou seja, os dois dispositivos têm que operar à mesma velocidade e cada mensagem é formada por 8 bits de dados (1 byte), possuindo também bit de parada e, em alguns casos, 1 bit de paridade [22]. Além disso, cada byte recebido é interpretado como um número inteiro sem sinal. Isto é, os 8 bits de dados formarão números de 0 a 255 (0000000 a 11111111 em binário) [22].

2.5.3 RS485

RS485 é um padrão baseado nos padrões RS422 e RS232 definidos pela EIA. Na transmissão de dados multiponto e bidirecional padrão, a capacidade é aumentada, vários transmissores podem ser conectados, a capacidade de controle e as características de proteção contra conflitos do transmissor são simultaneamente aprimoradas e a área de espaço comum do barramento é expandida. Ele usa transmissão balanceada e recepção diferencial para completar a comunicação, com forte capacidade de interferência de modo comum. A velocidade de transmissão de dados e a distância de transmissão são uma relação funcional. Funciona em modo *half duplex*, suporta comunicação multiponto, mas não suporta rede em anel ou estrela. Sua topologia é geralmente uma estrutura de barramento de terminais combinada com menos cabos para facilitar a transmissão de dados, ilustrada na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Estrutura de barramentos RS485.



Fonte: O autor

O modo é dividido em modo mestre-escravo e modo mestre-escravo alternativo da seguinte forma [16]:

- **Mestre-Escravo:** o sistema de comunicação consiste em um nó principal e vários sub nós. O nó mestre verifica constantemente se o nó de armazenamento precisa se comunicar, se necessário, dá aos nós escravos o direito de controlar o barramento até que os dados sejam

enviados completamente. Isso significa que o mestre pode iniciar a transmissão, o escravo dará uma determinada resposta de acordo com as informações transmitidas pela solicitação do mestre. O mestre pode não apenas se comunicar com o escravo individualmente, mas também enviar dados. Caso os dispositivos escravos desejem se comunicar entre si, isso deve ser feito através do dispositivo mestre [16].

- **Mestre-Escravo Alternativo:** o nó que obtém o controle se torna o nó mestre, os outros nós são nós escravos. Um nó passa o controle do barramento para os nós vizinhos quando para de enviar dados, e esses nós vizinhos passam o controle logo após o processamento das solicitações de comunicação. Assim, cada ponto de controle pode iniciar a comunicação com outro controlador [16].

2.5.4 Ethernet

A *Ethernet* industrial tornou-se uma força crescente nas redes industriais devido ao endurecimento das camadas de *hardware* (incluindo conectores, cabos e switches) e camadas de *software*. Os protocolos de *software* podem ser protocolos TCP/IP ou incluir funcionalidades adicionais na camada de aplicação. Isso a torna útil para aplicações industriais, incluindo elementos de prioridade ou planejamento [17].

O padrão IEEE 802.3 era, inicialmente, o padrão para o uso em escritórios, mas vem expandindo para aplicações industriais. A *Ethernet* tornou-se rapidamente uma poderosa rede local (LAN – *Local Area Network*) de comunicação. Esse padrão refere-se à comunicação entre dispositivos. A maioria das soluções industriais requer *software OSI Layer 3* personalizado e, em seguida, modificações de *hardware* no controle de acesso ao meio (MAC - *Média Access Control*) para suportar padrões industriais de Ethernet e requisitos de desempenho em tempo real. O software pode ser portado para suportar diferentes soluções [17].

2.6 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados, nos testes e no desenvolvimento do trabalho são descritos nessa seção. São apresentados brevemente descritos dos: Controladores lógicos programáveis (PLC's), *Drive* (inversores de Frequência), Módulos de conversão de comunicação e Estação base geradora de sinal RF (*Head end*).

2.6.1 Controladores Lógico Programáveis

O AC 800M para *Compact Control Builder*, ilustrado na Figura 2.17, é uma família de PACs construídos como módulos montados em trilhos, contendo CPUs, módulos de comunicação, módulos de fonte de alimentação e vários acessórios. Vários módulos de CPU estão disponíveis, variando em termos de poder de processamento, tamanho de memória e suporte a redundância. Tarefas baseadas em tempo e controladas por prioridade permitem a maior estabilidade mesmo em tarefas de controle complexas [19].

Figura 2.17 – Controlador AC800M.



Fonte: [19].

Suportando linguagens de programação padrão IEC 61131-3, o *Compact Control Builder* é a ferramenta para projetar o código de controle e o *layout de hardware* do controlador. Ele cria soluções de automação de controle intensivo lógico, sequencial e analógico para todos os controladores existentes no sistema de automação a serem manipulados em um banco de dados. O cartão de memória flash permite carregar aplicativos sem a necessidade de utilizar a ferramenta de engenharia para dar suporte a soluções OEM e remotas [19].

2.6.2 Drives

De maneira genérica, o inversor de frequência é um dispositivo eletrônico capaz de variar a velocidade de giro de um motor de indução trifásico. É um dispositivo que transforma corrente elétrica alternada fixa (corrente e tensão) em corrente elétrica CA variável controlando

a potência consumida pela carga através da variação da frequência entregue pela rede. O seu nome relaciona com a maneira que ele faz essa variação de giro do motor trifásico [21].

A função do inversor é mudar a frequência na entrada do motor, caso a frequência seja maior, conseqüentemente a velocidade do motor será maior, e caso a frequência seja menor a velocidade também é menor. As vantagens do uso de um inversor de frequência são, por exemplo, explorar o funcionamento do motor e condições não descritas nas suas características construtivas [21]. Alguns inversores de frequência da fabricante Danfoss são ilustrados na Figura 2.18.

Figura 2.18 – Drive, inversores de frequência Danfoss.



Fonte: [20].

2.6.3 Head end

O *Head end* é a estação base de comunicação de rádio frequência. Ele é responsável por gerar os canais de voz e configurar as frequências de operação rádio móvel. Na função de gerador, ele é responsável pela geração do meu sinal RF, comunicando com os módulos de superfície VSDM e os módulos de linha VIDM montados *in loco*.

2.6.4 VSDM e VIDM

O Módulo de Dados de Superfície (VSDM), ilustrado na Figura 2.19, é responsável por interagir com o *Leaky Feeder* e a estação base alimentadora. Ele fornece comunicação com o VSDM e, para isso, são necessárias as unidades de módulo de dados em linha ao longo da rede *Leaky Feeder*. O VSDM é configurado para comunicar com o VIDM e as conexões são feitas

ao servidor via Ethernet e para o *Leaky Feeder* por meio da distribuição de RF já existente para a rede de voz.

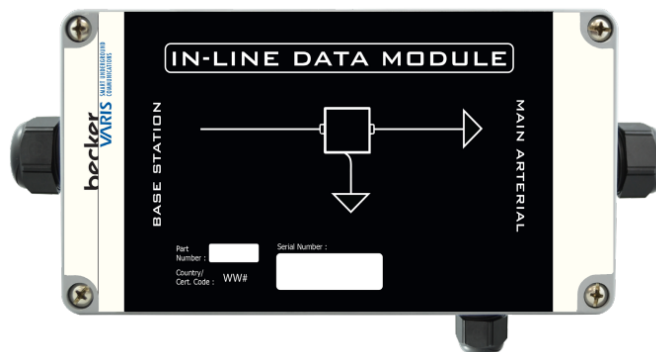
O Módulo de Dados em Linha (VIDM), ilustrado na Figura 2.20, conecta-se à rede *Leaky Feeder* com baixa perda para fornecer conexão serial a um dispositivo serial. O VIDM fornece conexão serial com taxa de dados de 2400-115200 a um dispositivo RS-485 conectado. O VIDM funciona em conjunto com o VSDM para fornecer uma conexão *ethernet* sem *head end*.

Figura 2.19 – Módulo VSDM



Fonte: [23].

Figura 2.20 – Módulo VIDM



Fonte: [24].

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

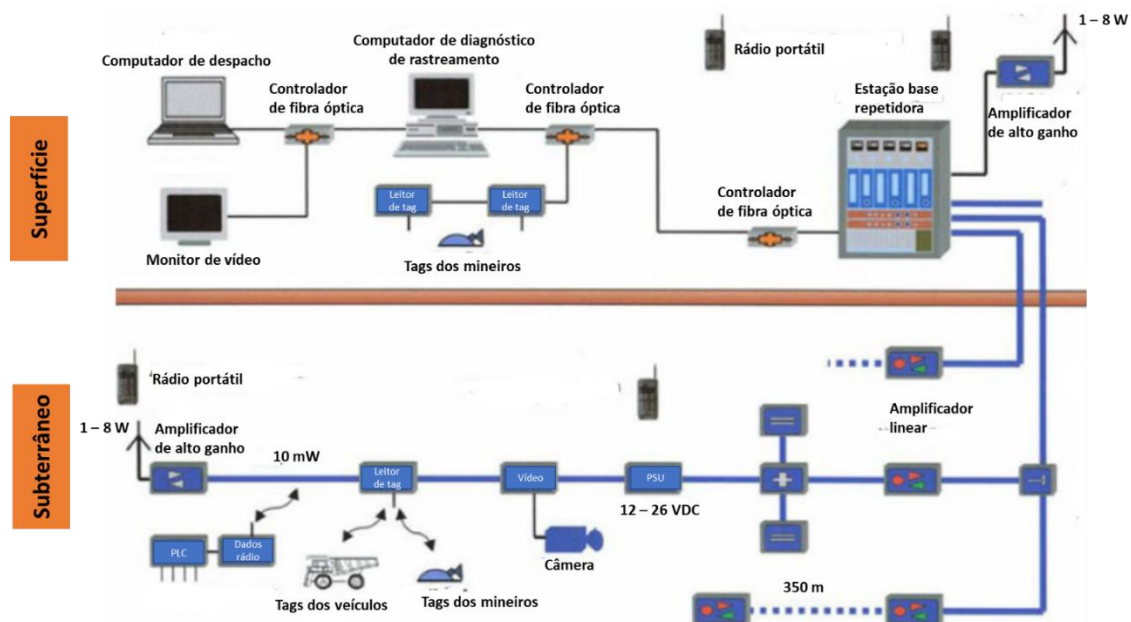
Nessa seção foram apresentados os principais conceitos, protocolos e equipamentos que são utilizados no desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso. Na próxima seção será apresentada a metodologia desenvolvida.

3. MATERIAS E MÉTODOS

Atualmente, o processo de comunicação de rádio nas minas subterrâneas, inicia-se na geração de um sinal transmitido por fibra óptica até o conversor de sinais. Nos módulos de conversão do *Leaky Feeder* ocorrem os processos de transformação do sinal de comunicação gerado para um sinal RF compatível com as especificações do cabo.

A Figura 3.1 ilustra, genericamente a comunicação superfície e subterrâneo, possibilitando a aplicação de outros sinais de comunicação, como sistemas supervisórios e automação, no cabo. Esses sinais chegariam aos equipamentos nas minas subterrâneas pela propagação no espaço livre. Assim, é possível explorar toda a capacidade do cabo e não seria preciso utilizar o outro canal, a fibra óptica. Na mina subterrânea, os dados transmitidos por um servidor são enviados pelo cabo até as áreas para as quais são designados. Nessas áreas encontram-se uma série de dispositivos que serão controlados.

Figura 3.1 – Extensão do sistema, superfície e subterrâneo.



Fonte: Adaptado de [13].

Na arquitetura estudada tem-se a estação base geradora do sinal RF conectada ao sistema de despacho. Esse sistema é responsável por fazer todo o controle de atividades executadas na parte subterrânea da mina como, TAG's de mineiros, equipamentos em operação, equipamentos em manutenção, frentes de serviço em atividade e monitoramento de deslocamento nas rampas e controle e comandos de equipamentos.

A arquitetura é dividida em duas partes: A **Superfície** é composta pelo supervisor interligado ao *Switch*. O drive faz a comunicação pelo protocolo Modbus e esse sinal é convertido em RF pelo módulo VSDM. O **Subsolo** é composto pelo módulo VIDM responsável pela conversão física de *leaky feeder* para outro cabo de controle. E o drive é responsável pelo acionamento do equipamento.

Então, os seguintes equipamentos *switch*, controlador, VSDM, VIDM, inversor são utilizados a montagem e realização dos testes de funcionamento que são divididos nas seguintes etapas:

1. Comunicação do controlador com o inversor Danfoss via ModBus-RTU;
2. Comunicação entre o ModBus e o RTU utilizando o *Leaky Feeder*;
3. Comunicação utilizando o *Leaky Feeder* e o Controlador.

A montagem, as configurações e os testes realizados são descritos a seguir no capítulo de desenvolvimento.

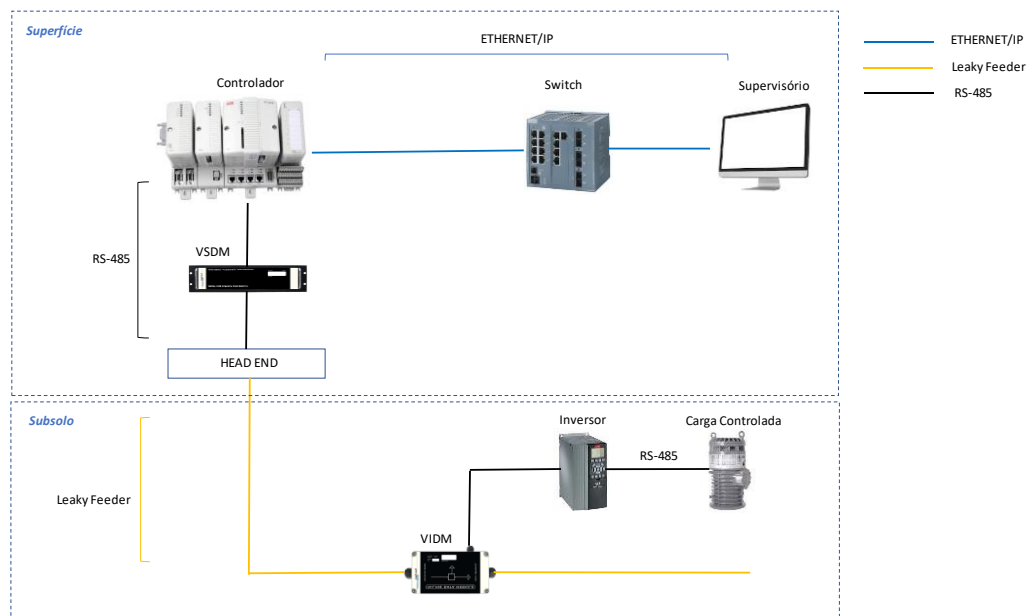
4. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são apresentadas as etapas de desenvolvimento e o relato dos problemas enfrentados na execução da proposta.

4.1 SISTEMA PROPOSTO

A topologia inicial do sistema proposto é ilustrada na Figura 4.1 (a) e as fotografias das partes, superfície e subsolo, correspondentes são apresentadas nas Figuras 4.1(b) e (c). Observe a utilização dos seguintes equipamentos: *switch*, controlador, VSDM, VIDM, inversor. Os protocolos de comunicação são ethernet e RS-485. O cabo *Leaky Feeder* é utilizado a partir do *head end* para a transmissão subterrânea.

Figura 4.1 (a) – Topologia do sistema proposto.

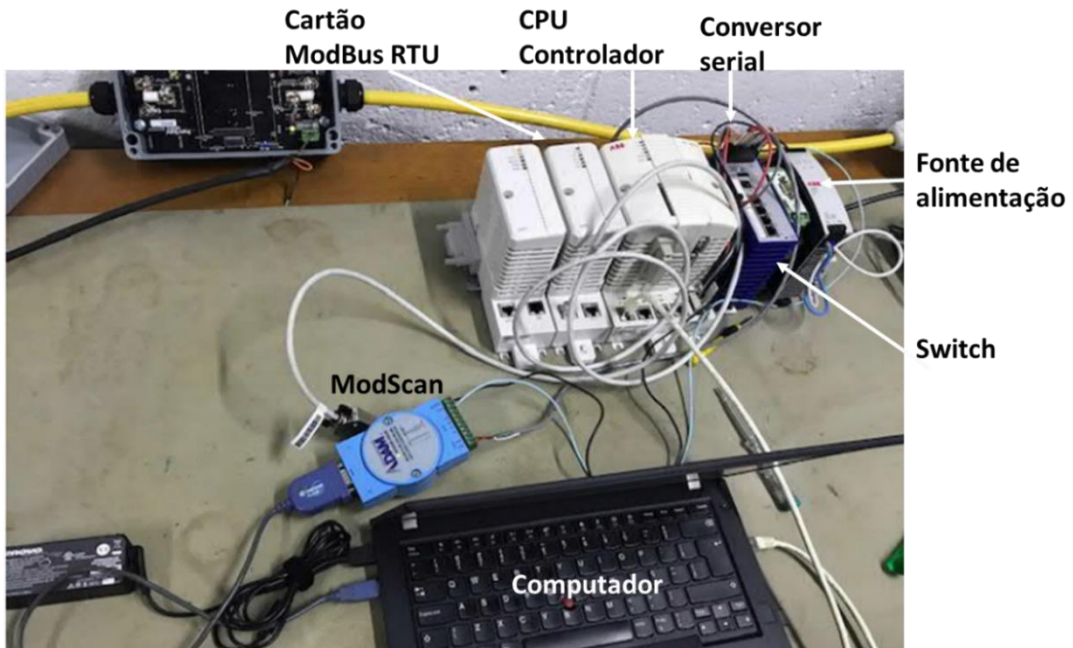


Fonte: O autor.

A arquitetura da superfície é iniciada com o supervisor que é responsável pelo monitoramento e, é onde se atribui os comandos. O supervisor interliga-se ao *Switch*, responsável pelo gerenciamento das redes de comunicação utilizadas no desenvolvimento desse trabalho. O drive utiliza o protocolo de comunicação Modbus RTU e, por isso, é necessário utilizar o módulo de comunicação Modbus acoplado ao *hack* do PLC. O PLC executa a lógica de comando e configura os parâmetros de leitura e escrita do equipamento. A conversão da comunicação Modbus para comunicação RF é feita pelo módulo VSDM, interligado com a

estação base geradora de sinal RF. O conjunto de equipamentos, da superfície, são instalados em uma sala elétrica. A arquitetura do subsolo é composta pelos seguintes equipamentos: módulos VIDM e drive. O módulo VIDM realiza a conversão física de *leaky feeder* para outro cabo de controle. E o drive é responsável pelo acionamento do equipamento.

Figura 4.1 (b) – Fotografia sistema proposto (superfície).



Fonte: O autor.

Figura 4.1 (c) – Fotografia sistema proposto (subsolo).



Fonte: O autor.

No desenvolvimento desse projeto, foi utilizado o protocolo de comunicação Modbus RTU e uma conexão serial RS-485 porque a aplicação final opera nesse protocolo. Essa comunicação é determinada pelo requisito da aplicação. Além disso, foi necessário utilizar os módulos VSDM e VIDM para realizar a conversão física entre RS-485 e *Leaky Feeder*.

Para eliminar possíveis interferências entre os equipamentos, os testes foram divididos em três etapas. A divisão tem como objetivo garantir primeiro o funcionamento de cada parte envolvida na solução proposta nesse trabalho de conclusão de curso.

1ª Etapa: Comunicação do controlador com o inversor Danfoss via ModBus-RTU

Na primeira etapa, o objetivo foi a integração da comunicação ModBus - RTU do inversor. E, além disso, proporcionar o desenvolvimento da biblioteca de acionamento típico do inversor dentro do sistema 800xA. Essa etapa foi iniciada pela configuração dos parâmetros da rede ModBus, ilustrado na Figura 4.2, no controlador, inversor e montagem da rede física.

Figura 4.2 – Recomendação de parâmetros no manual do drive Danfoss.

5.2 Parameter for Modbus RTU

5.2.1 Important Parameters for Modbus RTU

Set the following parameters to enable the Modbus RTU for the frequency converter.

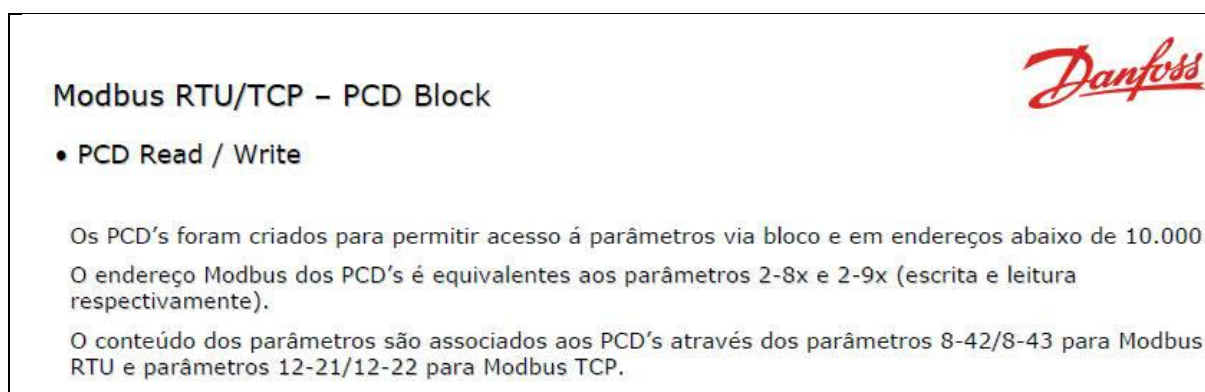
Parameter no.	Setting
8-30 Protocol	Modbus RTU [2]
8-31 Address	1-247
8-32 FC Port Baud Rate	2400-19200
8-33 Parity / Stop Bits	Even parity, 1 Stop Bit [0] default Odd Parity, 1 Stop Bit [1] No Parity, 1 Stop Bit [2] No Parity, 1 Stop Bits [3]

Fonte: O autor.

A seguir foi realizado o fechamento do enlace de comunicação, sem sucesso. Foram feitas várias tentativas e após a análise do manual do inversor, foi verificado que ele não possui o *code block* que é utilizado pelo mestre para certificar se a comunicação é válida ou não. Com essa informação, no mestre foi desabilitado o parâmetro “*Poll Time*” que é responsável por aguardar essa resposta válida da conexão e liberar a leitura e escrita dos registros. Então, foi iniciada a tentativa de leitura e escrita nos registros, porém sem sucesso. Foi verificado que os registros estavam muito altos, fora da faixa padrão permitida pelo ModBus. É sabido que alguns mestres têm faixa de endereços *Holding Register* 1 – 10.000. Na faixa disponibilizada pelo inversor não é possível acessar parâmetros a partir de registros 16.130 por exemplo porque no ModBus ficaria como 416.130. De acordo com o especialista Danfoss e manual consultado, ilustrado na Figura 4.3, a solução proposta foi utilizar a função PCD (Bloco de Leitura e escrita

do drive) para mover os registros para posições menores justamente para solucionar a questão de registros altos. Os PCD's foram criados para permitir acesso à parâmetros via bloco e em endereços abaixo de 10.000. Fazendo a leitura via PCD, a leitura e escrita de dados entre mestre e escravo teve sucesso.

Figura 4.3 – Sequência de bits informada no manual do drive Danfoss.



Fonte: O autor.

Foi realizada a construção da biblioteca de acionamento no 800xA, conforme as sequências de bits informadas pelo especialista Danfoss. Ao término da etapa 1 foi possível comandar o inversor e monitorar os seus *status*.

2ª Etapa: Comunicação entre o ModBus e o RTU utilizando o *Leaky Feeder*

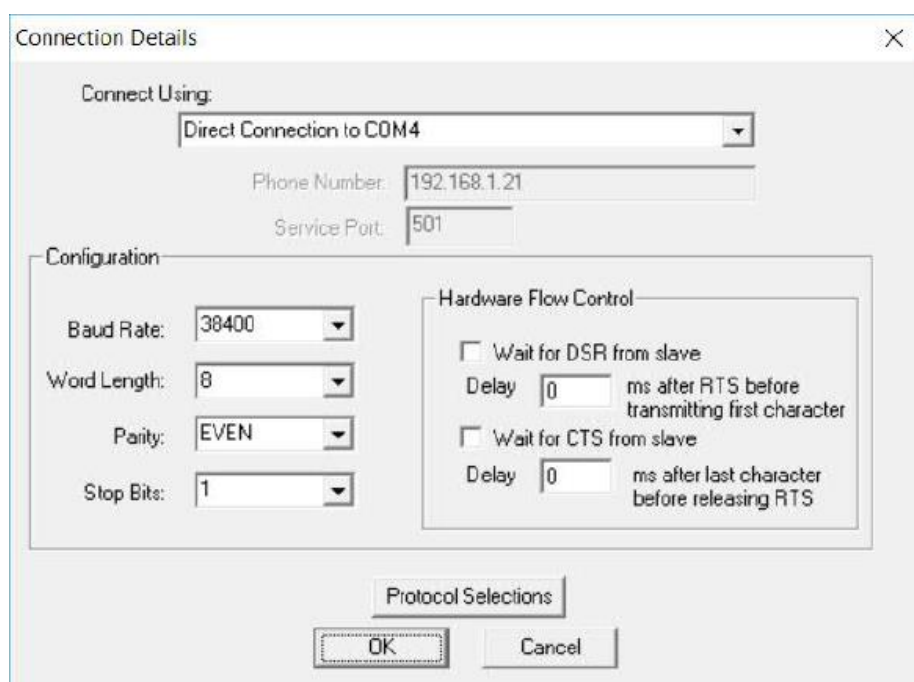
Nessa etapa, o objetivo era a compreensão das configurações e conexões físicas do *Leaky Feeder*. Inicialmente, foi feita a montagem física dos equipamentos e a configuração do inversor disponibilizado. Como a ABB (*ASEA Brown Boveri*) não é especialista no inversor Danfoss, foram configurados os parâmetros de comunicação conforme testados na própria fábrica. Após a configuração, foi realizado um teste de comunicação direto entre o controlador ABB (AC800M), sem utilizar o *Leaky Feeder*. Nesse ponto da etapa 2, foi estabelecido que a comunicação via meio físico convencional estava funcionando. Os testes foram expandidos com o relé ABB UMC100 e analisador de gases.

Em seguida, foi testada a interligação dos equipamentos no *Leaky Feeder* para prover a comunicação, porém sem sucesso. O equipamento de dados que comunica via cabo tem padrão de fábrica configurado em 38.400 *baud* por segundo e o cartão ABB com o limite de 19.200 *baud* por segundo, padrão convencional do ModBus-RTU. Após algumas tentativas, a comunicação com o inversor, analisador de gases e relé UMC100 (ABB) via *Leaky Feeder* foi conseguida, mas foi preciso utilizar o software ModScan ilustrado na Figura 3.4. Observe, na

configuração, taxa (*baud rate*) 38.400, comprimento da palavra (*word length*) de 8 bits, paridade par (*even*) e bit de parada (*stop bits*) de 1.

O cartão ModBus da ABB funciona com *baud rate* de 75 a 19.200 b/s, baseado no padrão original do protocolo ModBus-RTU. O manual do inversor também recomenda o uso na faixa 2.400 – 19.200. Então, para concluir o teste foi necessário adequar a velocidade do *Leaky Feeder* para 19.200 ou 9.600.

Figura 4.4 – Configuração no ModScan.



Fonte: O autor.

A fornecedora do sistema contactou com o suporte no Canadá para aprender como alterar o *baud rate*, mas de acordo com a informação isso é feito somente pelo fornecedor. Portanto, a fornecedora solicitou uma nova placa com *baud rate* de 9.600 para que os testes fossem concluídos. Após o estabelecimento da comunicação utilizando o ModScan, foi realizado o teste em paralelo para certificar a estabilização do enlace ModBus ao se utilizar rádio comunicador. Durante esses testes foi verificado que a utilização de 2 canais de rádio específicos ocasionava a perda do enlace de comunicação ModBus. Foi necessário que a empresa fornecedora realizasse diagnóstico com um analisador de sinais e o resultado foi que as frequências desses 2 canais estavam muito próximas. Então, foi feita uma outra configuração para evitar essa interferência na comunicação Modbus.

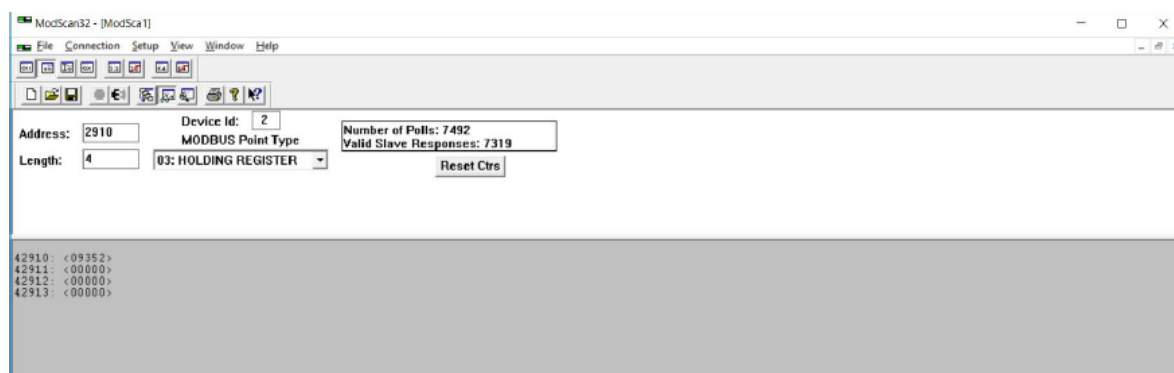
3ª Etapa: Comunicação utilizando o *Leaky Feeder* e o Controlador

Foram realizados, na fornecedora do sistema de comunicação via I em Belo Horizonte, os testes com a nova placa com *baud rate* de 9.600. Foi feita a montagem física dos equipamentos e a configuração do inversor disponibilizado. Verificada as configurações e certificada a velocidade de comunicação de todos os equipamentos, a comunicação teve sucesso no programa *Control Builder M*. O valor do pino de *status*, no bloco MBRead, apareceu 1 que significa que a conexão foi estabelecida com sucesso. Para garantir que a comunicação não apresentasse instabilidade, foi realizado o teste juntamente com 4 rádios de comunicação para simular o sistema com variações externas e não foi verificado problemas de interferência. A comunicação entre o controlador ABB e inversor Danfoss apresentou estabilidade. Em seguida, foi alterado na palavra de status o bit de local/ remoto no mesmo instante que os rádios estavam em trabalho, não houve interferência em nenhum momento.

A segunda parte da etapa 3 foi realizada na Nexa em Vazante/ MG. Foram preparados os equipamentos, dentro da mina subterrânea, e foi substituído o drive existente por um novo da empresa Danfoss para realizar os mesmos testes feitos em bancada no fornecedor. Os parâmetros de comunicação do drive foram configurados e, então, realizada as conexões com o *In Line - Data*. Na Sala elétrica, onde fica o equipamento de dados na superfície VSDM foram feitas as seguintes conexões: controlador ↔ conversor ↔ VSDM. A comunicação foi obtida com sucesso por meio do programa *Control Builder M*. Foram realizados os comandos liga, desliga e controle de velocidade, e, foram verificados o *status* do drive, corrente e velocidade.

A Figura 4.5 ilustra um print de tela do ModScan. Observe que a comunicação foi estabelecida e ainda nessa tela é feito o monitoramento do inversor.

Figura 4.5 – Comunicação estabelecida e monitoramento dos registros do inversor via ModScan.

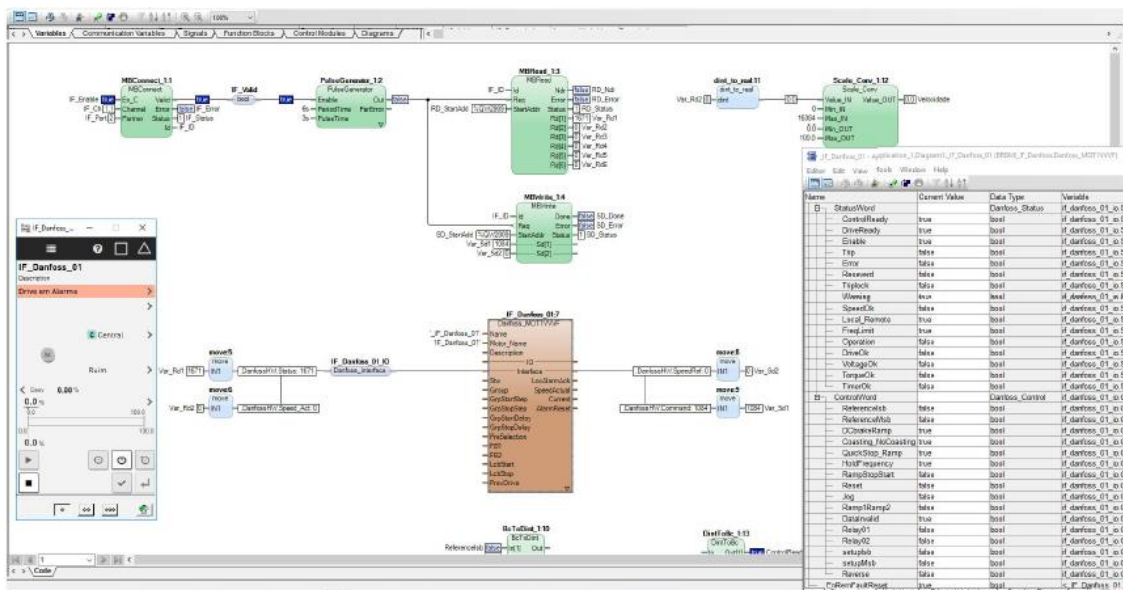


Fonte: O autor.

Essa sequência de testes foi supervisionada pelo responsável da equipe da Nexa. Ele acompanhou, em campo, o funcionamento do drive e o ventilador rodando e parando e, assim, confirmando na prática todos os *status* enviados e recebidos pelo sistema de automação ABB 800xA.

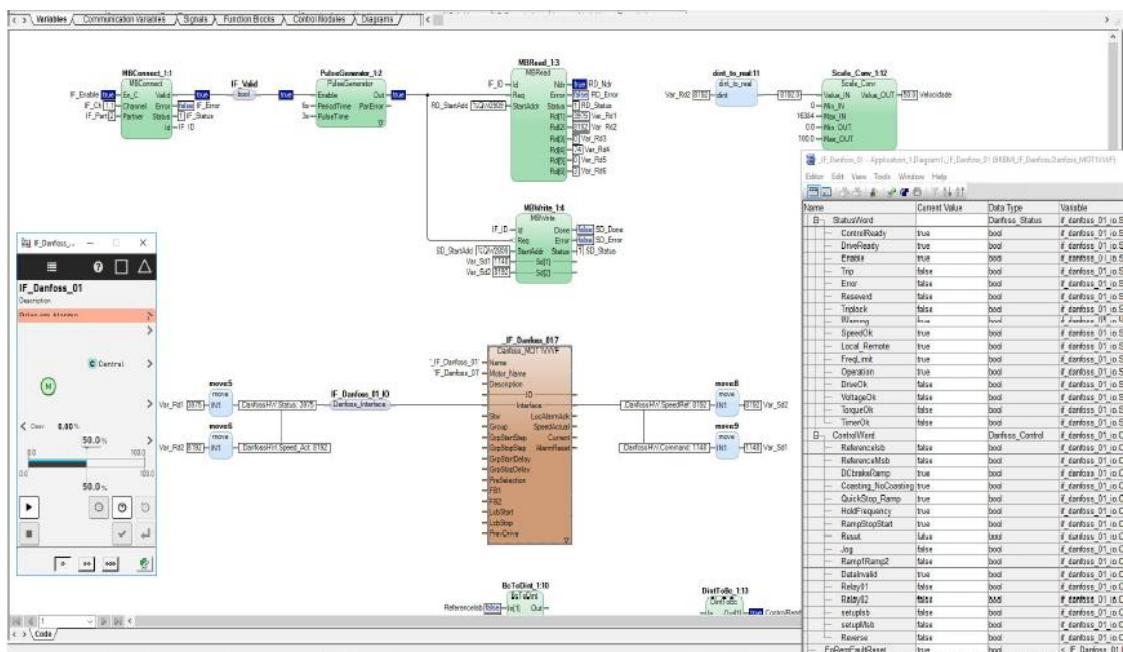
As Figuras 4.6 (a) e (b) ilustram as telas de configuração no sistema 800xA, drive parado e rodando, respectivamente.

Figura 4.6 (a) – Configuração no sistema 800xA, drive parado.



Fonte: O autor

Figura 4.6 (b) – Configuração no sistema 800xA, drive rodando



Fonte: O autor.

Essas ilustrações foram utilizadas para comprovar e demonstrar o funcionamento da terceira etapa.

4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nessa seção foram apresentadas as etapas de montagem e testes, em bancada, realizados para o desenvolvimento da proposta de comunicação superfície e subterrâneo. A seguir, são apresentados e discutidos os resultados do funcionamento dessa proposta.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Nesse Capítulo são apresentados os resultados obtidos das três etapas descritas na metodologia. Além disso, esses resultados são interpretados e discutidos para o entendimento desse trabalho de conclusão de curso.

5.1 RESULTADO DA ETAPA 1

Ao término da etapa 1 foi possível comandar o inversor e monitorar os seus *status* de acordo com o mapa de memória ilustrado na Figura 5.1.

O mapa de memória apresentado na Figura 5.1 é utilizado para determinar a entrada que irá ler a palavra do meu sinal, desta forma posso configurar o meu controlador para utilizar a posição PCD2911 para ler a velocidade que o motor está operando.

Figura 5.1 – Mapa de memória.

Direção da comunicação	Tipo	Nome	Descrição
Entrada do Controlador	Holding Register (PCD 2910)	Status Word	Palavra principal de estado.
	Holding Register (PCD 2911)	Velocidade do motor	Velocidade Atual. (representação em 13 bits)
	Holding Register (PCD 2912)	Corrente do motor	Corrente são 32Bits, portanto ocupa 2 registros
	Holding Register (PCD 2914)	Potência em KW	Potência são 32Bits, portanto ocupa 2 registros
Saída do Controlador	Holding Register (PCD 2810)	Control Word	Palavra principal de controle.
	Holding Register (PCD 2811)	Referência de velocidade	Referência de Velocidade.

Fonte: O autor.

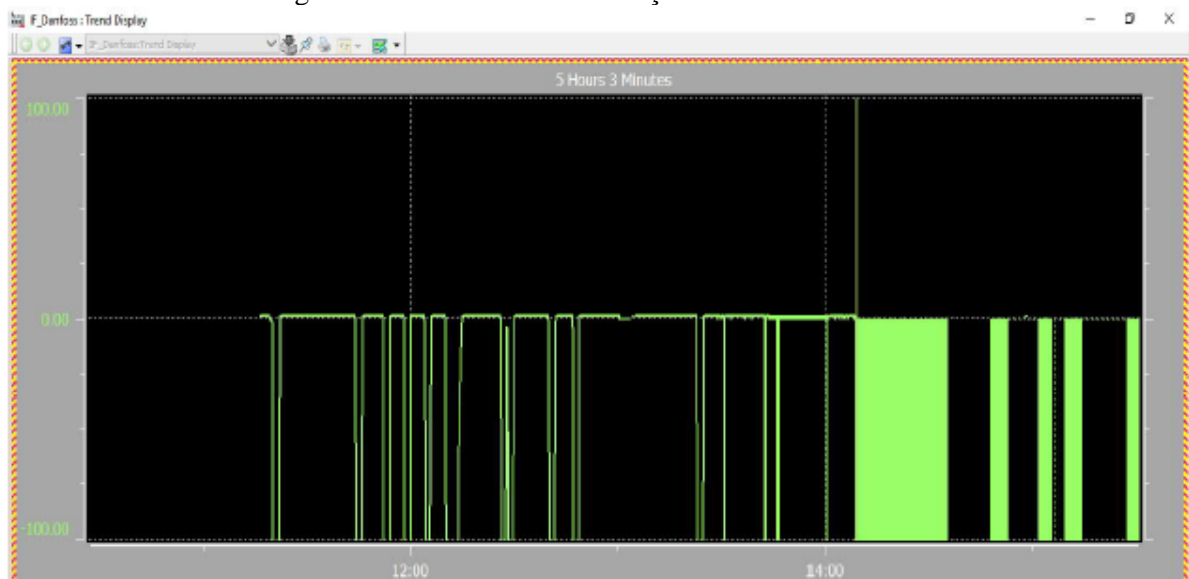
É sabido que no 800xA, a leitura de registros é feita a partir do 0. Portanto, a configuração do registro é a informada no manual do inversor -1, por exemplo, para ler o PCD 2910 do inversor, no 800xA configura-se o 2909. Observe que a palavra de corrente e potência possuem 32bits, portanto ocupam 2 registros. E a palavra de velocidade é escalonada, ou seja, o 100% de velocidade significa o valor inteiro 16.384 para o inversor, tanto leitura quanto escrita.

5.2 RESULTADO DA ETAPA 2

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam o status da comunicação do sistema proposto, onde o eixo x apresenta o tempo no decorrer do dia, e o eixo y apresenta o parâmetro de comunicação. Quando a forma de onda atinge o pico máximo expresso no eixo y tem-se falha na comunicação do sistema.

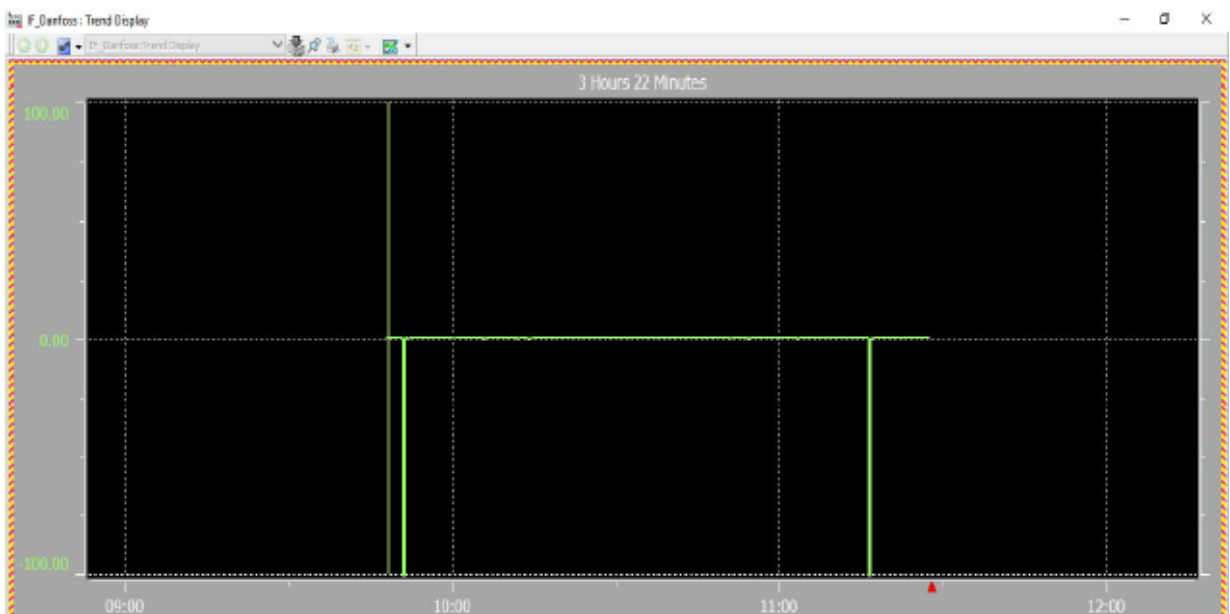
A Figura 5.2 ilustra a tela de status de comunicação do ModBus no sistema 800xA. Observe que houve uma falha de comunicação pela manhã e, por isso, foi necessário resetar a Giga da ABB para normalizar a comunicação. Uma nova falha de comunicação ocorreu às 14h08min, após uma forte chuva com raios. A sala elétrica onde fica a parte de comunicação na superfície foi verificada, mas a possível falha não foi encontrada. Naquele momento, não foi possível acessar o subterrâneo para verificar a comunicação devido à ausência de plataforma, ficando para o próximo dia a investigação da falha.

Figura 5.2 – Status da comunicação ModBus no sistema 800xA.



Fonte: O autor.

Figura 5.3 – Status da comunicação Modbus no sistema 800xA após *reset* na fonte de alimentação do *Leaky Feeder*.



Fonte: O autor

Observe que o drive apresenta os seguintes botões de comando: liga, desliga, acionamento através da frequência da rede em 60 Hz e informações do equipamento em tempo real, como a porcentagem de trabalho em relação a corrente nominal.

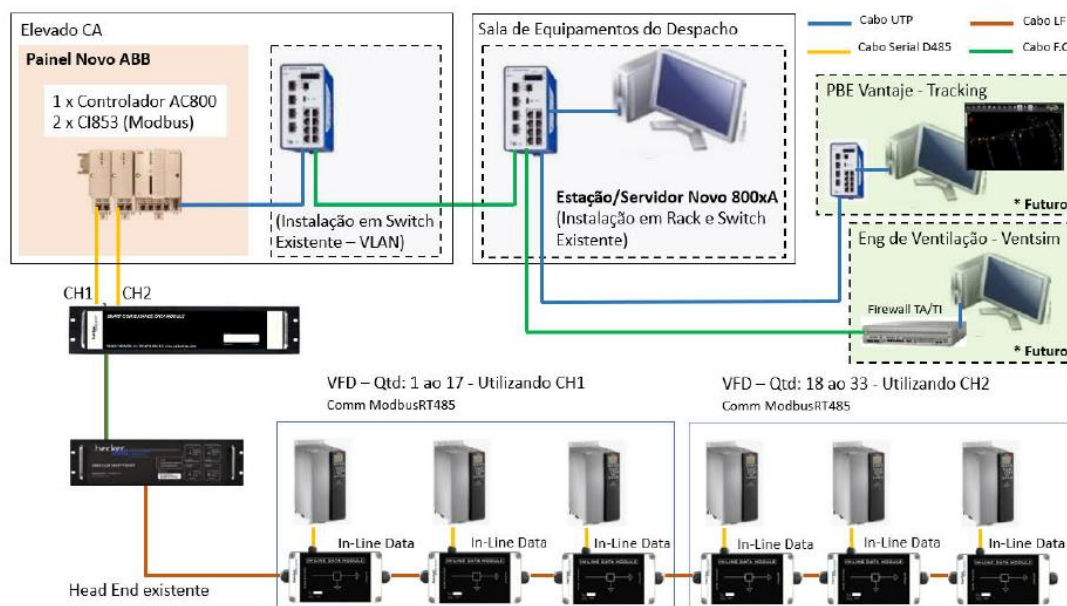
5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante os testes realizados foi observado um gargalo na taxa de comunicação do sistema. Esse fato mostra que o meio físico *Leaky Feeder* não comporta uma arquitetura muito robusta com diversas funções. Na alimentação, do meio físico *Leaky Feeder*, com um nível de tensão muito baixo causou falha na comunicação. Isso foi notado pela diferença do sinal de qualidade da comunicação quando foi restabelecida o nível de tensão. Os comandos de liga e desliga, variação de velocidade e *status* obtiveram comportamentos esperados, sendo assim, conclui-se que a comunicação foi bem-sucedida.

Outro ponto de observação e análise é o limite de equipamentos da rede proposta. Não existe limite no número de VIDM para conexão no VSDM sobre o *Leaky Feeder*. Assim, o número total de inversores, 33 equipamentos, foi dividido 02 (dois) canais de dados separados no VSDM para que a comunicação dos equipamentos entre o controlador na superfície e os inversores no subsolo aconteça da maneira mais eficiente possível.

Conforme os resultados obtidos e as observações feitas, ficou definida que a arquitetura de rede ilustrada na Figura 5.6 apresentou o melhor desempenho durante os testes realizados.

Figura 5.6 – Arquitetura final.



Fonte: O autor.

Ela apresenta a mesma arquitetura proposta na Figura 4.2 (a) com o acréscimo de mais alguns drives com a função de somente leitura de dados (corrente, potência, on/off). Observe que o fluxo parte do controlador conectado ao *head end* que se conecta ao meio físico *Leaky Feeder* presente na mina subterrânea. Na superfície, tem-se a conexão com o supervisor utilizando os switch's.

Nessa seção foram apresentados alguns resultados que demonstram o funcionamento do sistema de comunicação superfície e subterrâneo montado e testado em bancada. A seguir, são apresentadas as conclusões gerais desse trabalho.

6. CONCLUSÃO

A mineração é realizada em ambientes remotos, e por isso, requer uma enorme infraestrutura para operar com produtividade e eficiência. As tecnologias digitais inovadoras e automatizadas têm papel fundamental em relação a agilidade e segurança para as operações em minas. Elas auxiliam em soluções para problemas existentes, e, podem transformar os processos de mineração e, assim, aumenta a eficiência, a lucratividade e a capacidade de cumprir regulamentações mais rígidas [24].

No capítulo 2 foram definidos os tipos de mineração e propagação de sinais no ambiente das minas. Foi caracterizado o cabo *Leaky Feeder* utilizado na comunicação nas minas subterrâneas. Ainda nesse capítulo, foram apresentados os conceitos do sistema SCADA, dos protocolos de comunicação e alguns equipamentos.

No capítulo 3 foi desenvolvida a metodologia adotada para a montagem e teste da proposta. A metodologia foi dividida em três etapas de comunicação: do controlador com o inversor Danfoss via ModBus-RTU, do ModBus com o RTU utilizando o *Leaky Feeder* e dele com o controlador.

Os resultados foram apresentados e discutidos para cada etapa no Capítulo 4. Com a implantação do sistema proposto foi possível verificar e confirmar a possibilidade de utilização do cabo *Leaky Feeder* para automação dos processos na mina subterrânea. A implantação do sistema proposto permite o monitoramento e a leitura dos dados de equipamentos de forma a reduzir custos em equipamentos de automação. A forma simplificada de construção do sistema minimiza a necessidade de lançamento de fibra óptica ao longo das galerias subterrâneas da mina.

Proposta de Trabalho Futuro

Durante a montagem e testes observou-se a necessidade de comunicação do sistema via servidor com uma estação de controle remota. Esse cenário foi proposto, também, na arquitetura final ilustrada no capítulo anterior.

Além da aplicação para sistemas de ventilação secundária, o *Leaky Feeder* pode ser utilizado em outras aplicações, tais como, monitoramento de parâmetros de relés de proteção em subestações móveis dentro da mina, controle de nível de bombas de drenagem, automação em cascata de estações de bombeamento provisório compactas.

Essas aplicações proporcionam economia de energia elétrica reduzindo o tempo de operação necessário desses equipamentos. Além disso, contribui para a análise de falhas em cubículos, quadros de distribuição de média tensão e centro de comando de motores, e outras aplicações de uma mina.

REFERÊNCIAS

- [1] 50 Maiores mineradoras do mundo atingem US\$ 1 trilhão em valor de mercado pela primeira vez. Observatório da Mineração. Disponível em: <<https://observatoriodamineracao.com.br/50-maiores-mineradoras-do-mundo-atingem-us-1-trilhao-em-valor-de-mercado-pela-primeira-vez/>>. Acesso em: julho de 2022.
- [2] Carreño, Josua & Aguayo, Leonardo & Barreto, André Noll & Neves, Sávio & Sousa, Lucas & Braga, Adoniran & Uzeda Garcia, Luis Guilherme. (2015). Comunicações em Minas Subterrâneas. 10.14209/sbrt.2015.131.
- [3] SOUSA, Rafaela. "Mineração"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/mineracao.htm>. Acesso em: junho de 2022.
- [4] O que são depósitos de minério de Placer. SCIENCE. Disponível em: <<http://pt.scienceaq.com/Geology/100418271.html>>. Acesso em: julho de 2022.
- [5] Processo de Lixiviação: O que é, Métodos, e o seu Uso no Solo. ENGQUIMICASANTOSSP. Disponível em: <<https://www.engquimicasantosspp.com.br/2014/10/processo-de-lixiviacao.html>>. Acesso em: 20 de julho de 2022.
- [6] Mineração. Brasil ESCOLA. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/mineracao.htm>>. Acesso em: julho de 2022.
- [7] Lavra subterrânea: O que é, Quais são os métodos e sua Regulamentação. CRISTAL. Disponível em: <<https://cristaljr.com/lavra-subterranea/>>. Acesso em: julho de 2022.
- [8] KOCSIS, Charles K. New ventilation design criteria for underground metal mines based upon the life - cycle airflow demand schedule. Faculdade de Estudos de Pós-Graduação em Engenharia de Minas - The University of British Columbia. Vancouver, 2009
- [9] Josua Peña Carreño, J. P. et. al. Through-The-Earth (TTE) Communications for Underground Mines. Journal of Communications and Information Systems. Vol. 31, No.1, 2016. Disponível em: <<https://jcis.sbrt.org.br/jcis/article/view/386/291>>. Acesso em: julho de 2022.
- [10] Carreno, J. D. P. Through-The-Earth (TTE) Communication Systems: Channel characterization and system evaluation. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica. Brasília, 2020.
- [11] Tutorial on Wireless Communications and Electronic Tracking Part 2: Advanced. National for Occupational Safety and Health. Disponível: <<https://arlweb.msha.gov/TECHSUPP/pedlocating/wirelesscommandtrack2009pt2.pdf>>. Acesso em: julho de 2022.
- [12] Dudley, Sandra & Quinlan, T. & Walker, Stuart. Ultrabroadband Wireless–Optical Transmission Links Using Axial Slot Leaky Feeders and Optical Fiber for Underground Transport Topologies. Vehicular Technology, IEEE Transactions on. 57. 3471 - 3476. 10.1109/TVT.2008.920055.
- [13] Monteiro, W. B. A. Front-end de recepção para comunicação TTE. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB. Faculdade UnB Gama - FGA, 2015.

- [14] Fovino, IN, Carcano, A., Maserà, M., Trombetta, A. (2009). Desenho e Implementação de um Protocolo Modbus Seguro. In: Palmer, C., Shenoì, S. (eds) Proteção de Infraestrutura Crítica III. ICCIP 2009. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 311. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04798-5_6.
- [15] Dutertre, B. (2008). Formal Modeling and Analysis of the Modbus Protocol. In: Goetz, E., Shenoì, S. (eds) Critical Infrastructure Protection. ICCIP 2007. IFIP International Federation for Information Processing, vol 253. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-75462-8_14.
- [16] H.-j. Jia e Z. -h. Guo, "Research on the Technology of RS485 over Ethernet," *2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment*, 2010, pp. 1-3, doi: 10.1109/IEEE.2010.5660255.
- [17] JC Warren, "Ethernet/IP Applications for Electrical Industrial Systems", *2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2009, pp. 1-5, doi: 10.1109/IAS.2009.5325173.
- [18] Portal Brasil Engenharia | Sistema 800xA da ABB atinge novos níveis de produtividade, otimização e segurança. Disponível em: <<http://www.brasilengenharia.com/portal/industriatecnologia/8461-sistema-800xa-da-abb-atinge-novos-niveis-de-produtividade-otimizacao-e-seguranca>>. Acesso em: dez. 2022.
- [19] AC 800M Controller. Disponível em: <<https://new.abb.com/control-systems/essential-automation/compact-product-suite/essential-controller-suite/ac-800m-controller>>.
- [20] Guia Rápido VLT ® Micro Drive FC 51. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://files.danfoss.com/download/Drives/MG02BC28.pdf>>. Acesso em: dez. 2022.
- [21] Como funciona o inversor de frequência - Mundo da Elétrica. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/como-funciona-o-inversor-de-frequencia/>>. Acesso em: maio de 2023.
- [22] Modbus RTU - O que é e como funciona - Mundo Projetado. Disponível em: <<https://mundoprojetado.com.br/modbus-rtu-o-que-e-e-como-funciona/>>. Acesso em: junho de 2023.
- [23] Becker Varis, Datasheet, VS DM-151WW# VHF SURFACE DATA MODULE, Disponível em: <<https://www.becker-mining.com/>>. Acesso em: junho de 2023.
- [24] Automação na mineração: os desafios do setor. Disponível em: <<https://diariodocomercio.com.br/opiniao/automacao-na-mineracao-os-desafios-do-setor/#gref>>. Acesso em: julho de 2023.