



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO.

LUIZ AUGUSTO CARVALHO DA FONSECA

**Foundation Fieldbus: Estudo de viabilidade na utilização de emendas como
manutenção em segmentos danificados.**

Recife
2023

LUIZ AUGUSTO CARVALHO DA FONSECA

Foundation Fieldbus: Estudo de viabilidade na utilização de emendas como manutenção em segmentos danificados.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Fonseca, Luiz Augusto Carvalho da.

Foundation Fieldbus: Estudo de viabilidade na utilização de emendas como manutenção em segmentos danificados. / Luiz Augusto Carvalho da Fonseca. - Recife, 2023.

64 : il., tab.

Orientador(a): Douglas Contente Pimentel Barbosa

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Controle e Automação - Bacharelado, 2023.

1. Foundation Fieldbus. 2. Certificação de rede. 3. Manutenção. I. Barbosa, Douglas Contente Pimentel. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

LUIZ AUGUSTO CARVALHO DA FONSECA

Foundation Fieldbus: Estudo de viabilidade na utilização de emendas como manutenção em segmentos danificados.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 03/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Herbert Alberico de Sá Leitão (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. M.Sc. Geraldo Leite Maia Junior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Este trabalho é dedicado a todos que me apoiaram e estiveram presentes em minha formação acadêmica diante de todas as barreiras e dificuldades, tornando o alcance deste feito algo conjunto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, tios e avó por estarem presentes desde o início, apoiando-me da forma que se foi possível em cada momento de dificuldade e incerteza. Agradeço a minha noiva Cauane Oliveira de Assunção por ter encarado comigo estes difíceis anos de estudo e trabalho, me acolhendo sempre da melhor forma, demonstrando o que há de melhor nos sentimentos humanos, e sempre acreditando e me fazendo acreditar que seria possível. Agradecer calorosamente aos meus grandes amigos Everton, Mabelle, Letácio, Rodrigo, Henrique, Denis, Arthur, Filipe e Demetrius, herdados da universidade, e Lucas, Nicolas, Carlos e Bruno, herdados durante minha experiência na automação, os quais fizeram desta jornada algo muito mais leve e cômico, sendo, de fato, um dos grandes pilares para conseguir manter o bom humor e a cabeça erguida. Agradecer a todos os excelentes professores os quais tive o prazer de conhecer durante esta longa estrada, por toda paciência e compreensão, sempre buscando oferecer o máximo, dentro dos limites existentes, para que cada um dos discentes pudesse se tornar um profissional qualificado.

É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem a vitória, nem a derrota. (ROOSEVELT, THEODORE, 1924, p. 4)

RESUMO

Diante de um sinistro em unidade de produção de Coque em uma refinaria, 142 (cento e quarenta e dois) segmentos de rede H1 Foundation Fieldbus sofreram danos nos cabos de forma a necessitar de corte parcial. Por exigência de retorno rápido da operação da linha, a ideia de repassagem de todos os cabos troncos como medida de solução se tornou inviável, surgindo preferência pela tentativa de implementação de emendas nos trechos recortados. A manobra sugerida como solução não é assegurada explicitamente pela norma IEC 61158-2. Este trabalho demonstra as etapas e testes realizados para análise de parâmetros elétricos, como resistência e capacitância, e de comunicação, como apresentação de *jitter* e ruído, que confirmam ou não a possibilidade de utilização de emendas como solução a curto prazo. Como produto final deste estudo, obtiveram-se valores aprovados em comparação com a referência, tornando possível o retorno do funcionamento das malhas de controle da unidade afetada.

Palavras-chave: Foundation Fieldbus; Certificação de rede; Manutenção.

ABSTRACT

After an accident at a refinery, 142 (one hundred and forty-two) segments of the H1 Foundation Fieldbus network suffered cable damage in such a way as to require partial cutting. Due to the requirement for a quick return to the operation of the industrial line, the idea of changing all trunk cables as a solution became impracticable, with a preference for the attempt to implement splices in the cut sections. The maneuver suggested as a solution hasn't any indicated assurance by the IEC 61158-2 standard and by specialists of the protocol involved. This document demonstrates the steps and tests made for the analysis of electrical parameters, such as resistance and capacitance, and communication parameters, such as jitter and noise, which confirm or not the possibility of using splices as a short-term solution, providing stability and full operation of the repaired segments. As a final product of this study, it was possible to obtain the certification, compared to reference values and empirical tests. It was possible to experience the full operation of the spliced segments with the industrial line returning in full production.

Keywords: Foundation Fieldbus; Industrial Network Certification; Maintenance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Conceito básico de um SDCCD, visualizando a coexistência de diversos controladores em uma mesma rede.....	16
Figura 2 - Camadas do modelo OSI.....	18
Figura 3 - Representativo das camadas de comunicação.....	18
Figura 4 - Comparação de distribuição de camadas no modelo OSI com o modelo Fieldbus.....	19
Figura 5 - Código Manchester.....	20
Figura 6 - Topologia utilizada em uma rede Foundation Fieldbus na refinaria em estudo.	21
Figura 7 - Fonte simétrica para rede H1 Foundation Fieldbus, da <i>Pepperl+Fuchs</i> . Datasheet do produto.....	22
Figura 8 - O conjunto dos elementos forma o segmento. As linhas em laranja representam os cabos troncos. As linhas em azul representam os cabos <i>spurs</i>	23
Figura 9 - Distribuição de equipamentos entre os ambientes de sala e campo.	23
Figura 10 - Conversão dos níveis de corrente e tensão, realizada por barreira de campo.	24
Figura 11 - Aterramento em uma rede FF.....	25
Figura 12 - Conexão de cabo <i>spur</i>	25
Figura 13 - Representação elétrica de um terminador de rede FF.....	26
Figura 14 - Representação das tensões e correntes possíveis para modelo NIS.....	27
Figura 15 - Exemplo de modelo FISCO com repetidores.....	28
Figura 16 - Ilustração de modelo FISCO existente no caso estudado.	28
Figura 17 - Modelo de Tronco de Alta Potência.	29
Figura 18 - Ilustração da resistência de isolamento dos cabos.....	30
Figura 19 - Exemplo de sinal de comunicação FF.	31
Figura 20 - Ruído em um sinal de comunicação FF.....	32
Figura 21 - Comparação entre o sinal referência e um sinal sobre influência de <i>jitter</i>	33
Figura 22 - Exemplo de <i>Live List</i> em sistema FOXBORO.....	35
Figura 23 - Vista aérea da unidade contida no sinistro. Em vermelho, o CCL (área da conexão inicial dos cabos) e o <i>Air Cooler</i> (área de distribuição individual dos cabos).	36
Figura 24 - Vista aérea da unidade contida no sinistro. Novo trecho adicionado para que seja possível o alcance da parcela dos cabos seccionados que estão conectados no CCL com a parcela que se encontra conectada em campo.....	37
Figura 25 - Exemplo de TAG utilizada no trecho inicial do cabo tronco nos painéis FF.....	37
Figura 26 - Formato de TAG para identificação de painéis de força e de comando..	38
Figura 27 - Conector utilizado para contato do cabo tronco com <i>baseplate</i>	39
Figura 28 - Padrão de cabos contidos no cabo tronco.	40
Figura 29 - Medição de continuidade com multímetro modelo Minipa ET-2507B	40
Figura 30 - Megômetro Minipa MI-2552.	40
Figura 31 - Exemplo de garra de medição do tipo Jacaré.....	41
Figura 32 - Exemplo de conexão em megômetro para teste de isolamento utilizando o par (+) e (-).	42
Figura 33 - Caixa de junção utilizada para emenda de cabos, categoria EX.	43

Figura 34 - Organização interna de bornes internamente nas caixas de junção de emendas. Representação em 2D do interior da caixa de junção. Cada TB representa um trilho de bornes.....	43
Figura 35 - Representação da conexão das emendas. Os cabos, na prática, foram conectados utilizando terminais adequados.....	43
Figura 36 - O conector necessita estar desconectado do <i>baseplate</i> para realização de testes estáticos.....	44
Figura 37 - Medição de resistência utilizando LCR.	45
Figura 38 - Ilustração da medição de capacitância com LCR.	45
Figura 39 - Identificação de segmento via diagrama.....	46
Figura 40 - Sequenciamento de identificação de FBM.....	47
Figura 41 - Identificação de conector do FBM.....	48
Figura 42 - Identificação dos FBMs e dos segmentos no <i>Pactware</i>	48
Figura 43 - Aba de System & Segments Measurements.....	49
Figura 44 - Aba de Field Device Signal Level.....	50
Figura 45 - Aba de Field Device Measurements.	51
Figura 46 - Aba de estatísticas da rede Fieldbus.	51
Figura 47 - Opção para análise de diagnósticos.	52
Figura 48 - Opção de diagnóstico na aba de histórico de alarmes.....	52
Figura 49 - Descrição de simbologia de alarmes.	53
Figura 50 - Opção de comissionamento com opção de reajuste de níveis dos sinais de comunicação dos instrumentos.	53
Figura 51 - Opção para geração de documento de aprovação ou reprovação de segmento, sem alterações nos parâmetros de comunicação.	54
Figura 52 - Resultados obtidos pelo teste de integridade de cabo nos segmentos críticos.....	56
Figura 53 - Resultados obtidos pelos testes estáticos. Todos os segmentos envolvidos na emenda foram analisados.	57
Figura 54 - Resultados obtidos pela realização dos testes dinâmicos em todos os segmentos da emenda.....	58
Figura 55 - Comparação percentual entre segmentos aprovados e reprovados considerando toda a emenda.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de referência para cabos FF de 18AWG.....	30
Tabela 2 - Tabela de referência dos valores de resistência e capacitância. Valores baseados na IEC61158-2 e Manuais Pepperl+Fuchs. *O valor de referência, neste caso, dependerá da construção do segmento, levando em consideração informações como o número de CFFs e instrumentos envolvidos.	31
Tabela 3 - Segmentos FF Críticos.....	38
Tabela 5 - Sequência para medições de isolamento do cabo.....	41
Tabela 6 - Medições de isolamento obtidas pela etapa de Integridade de Cabo referente ao trecho CCL - Emenda Leste.....	55
Tabela 7 - Medições de isolamento obtidas pela etapa de Integridade de Cabo referente ao trecho Emenda Oeste – Campo. *Segmentos que não possuem cabeamento Emenda Oeste – Campo.	55
Tabela 8 - Segmentos reprovados em teste estático. Medições de Resistência.....	56
Tabela 9 - Valores de capacitância dos segmentos reprovados em teste estático. Todas as capacitâncias estão em valores aceitáveis de acordo com as referências.	57
Tabela 10 - Segmentos reprovados no Teste Dinâmico.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCL	Centro de Controle Lógico
CFF	Caixa Foundation Fieldbus
FF	Foundation Fieldbus
FISCO	<i>Fieldbus Intrinsically Safe Concept</i>
ID	Identificador
NIS	<i>Non-Intrinsically Safe</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
TB	Trilho de Bornes

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
F	Faraday
H	Henry
Hz	Hertz
s	Segundos
VCC	Tensão em Corrente Continua
Ω	Resistência Elétrica (Ohms)
μ	Micro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	SDCD (SISTEMA DE CONTROLE DISTRIBUÍDO).....	16
2.2	PROTOCOLO FOUNDATION FIELDBUS.....	17
2.2.1	Topologia H1 Foundation Fieldbus	21
2.2.2	Fonte simétrica	21
2.2.3	Cabos tronco e spur	22
2.2.4	Caixa de junção	23
2.2.5	Barreiras de campo	24
2.2.6	Aterramento do Sistema	24
2.2.7	Terminador	26
2.2.8	NIS (Non-Intrinsically Safe).....	26
2.2.9	FISCO (Fieldbus Intrinsically Safe Concept).....	27
2.2.10	Tronco de Alta potência	28
2.3	CERTIFICAÇÃO DE REDE	29
2.3.1	Teste de integridade de cabo	29
2.3.2	Teste estático	30
2.3.3	Teste dinâmico	31
2.3.4	Ruído	32
2.3.5	Jitter	33
2.3.6	Live List	34
3.	METODOLOGIA.....	35
3.1	DIVISÃO DE TRECHOS.....	35
3.2	IDENTIFICAÇÃO DE SEGMENTOS	37
3.3	EMENDA DOS CABOS	42
3.4	TESTE ESTÁTICO	44
3.5	TESTES DINÂMICOS	46
4.	RESULTADOS	54
5.	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	61

INTRODUÇÃO

A sociedade, em sua história, presenciou um acelerado avanço do setor industrial. Devido à imensa demanda por produtos, altos investimentos foram aplicados, gerando uma grande quantidade de inovações tecnológicas, dentre elas a utilização da Automação, considerada de grande importância para os mais diversos meios de produção [1] [2].

Como forma de substituição considerável da utilização de trabalho braçal, é possível considerar o moinho hidráulico para fabricação de farinha como uma das primeiras invenções humanas para automatizar um processo fabril [3]. Em meados de 1947, com o surgimento dos transistores, houve uma notável aceleração do processo de desenvolvimento da automação pela capacidade de controle da corrente elétrica. Na atualidade, o termo se consolida pela utilização dos mais diversos controladores programáveis, sensores e atuadores, que assimilados, por meio de protocolos de rede, circuitos elétricos e *softwares*, tornam possível o inteligente funcionamento de uma linha de produção, possuindo participação direta no maior rendimento e lucratividade industriais [3]. Porém, para que ocorra a automação dos processos de produção no ambiente industrial, é necessária a existência de uma forma de comunicação entre os dispositivos de campo e os controladores, sendo esta competência denominada como redes industriais.

Dentro da indústria, é de suma importância manter todas as variáveis do processo sob controle, sendo isso possível pela utilização de instrumentos de medição e atuadores, garantindo uma precisão consideravelmente superior quando comparado à utilização de mão de obra humana [4]. As redes industriais possuem importante papel, sendo elas responsáveis pelo transporte dos dados, possibilitando a geração de informação de acordo com o protocolo escolhido. Assim, pode-se afirmar que todos os modelos de indústria, tanto de manufatura quanto de processo, tornam-se dependentes da utilização dessa ferramenta [5].

Indústrias de processo, por sua vez, são caracterizadas pela adição de valor aos materiais por meio de processos físicos e químicos, requerendo um rígido controle na linha de produção [6]. A atenção minuciosa no acompanhamento dos indicadores do processo faz com que seja crucial a escolha de uma rede industrial confiável, assim como o estabelecimento de manutenções preventivas para que seja

possível disponibilizar o maior número de instrumentos em plena comunicação. Um expressivo exemplo de indústria de processo, com grande número de dispositivos meio a um sistema de automação, e que depende veemente de uma rede industrial estável, são as refinarias de petróleo.

Nesse contexto, este trabalho registra ações de manutenção tomadas em situação de sinistro em refinaria, mediante incêndio que acarretou a degradação de 142 (cento e quarenta e dois) cabos troncos da rede H1 Foundation Fieldbus (FF) operante. O acidente causou a perda de comunicação entre mais de 900 (novecentos) instrumentos de medição e atuação com o SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído), tornando inoperável a linha de produção.

Pela necessidade da retomada de operação em um curto período de parada, utilizou-se a técnica de emenda dos cabos, por meio dos processos de recorte do trecho danificado, utilizando caixas de junção para as novas emendas. Esta manobra não é assegurada pela norma IEC 61158-2, mediante provável alteração na impedância dos segmentos e adição de pontos de falha.

1.1 Objetivo

Avaliar a viabilidade da utilização de emendas em redes de campo H1 Foundation Fieldbus em casos extremos como medida de curto prazo para retorno de operação de linha de produção em uma planta industrial.

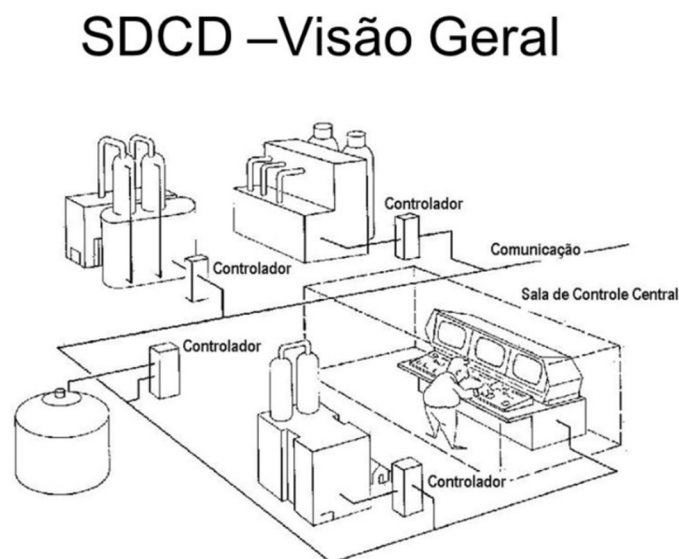
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão apresentados os fundamentos básicos para a compreensão do funcionamento e topologia de rede analisada neste estudo. Os tópicos abordados se iniciam no entendimento da composição de um sistema SDCC, descrevendo os equipamentos e modelos de comunicação contidos no protocolo FF, finalizando com os testes necessários para se realizar uma certificação da rede.

2.1 SDCC (Sistema de Controle Distribuído)

Sistemas Digitais de Controle Distribuído (SDCC) são utilizados para controlar processos contínuos com uma vasta quantidade de malhas de controle PID, que se localizam em diferentes posições na planta industrial [7]. Este tipo de sistema pode ser caracterizado por robustez, redundância e funções de controles integradas em uma única plataforma. São normalmente utilizados em indústrias de processo, com alto valor agregado, ou em locais perigosos para trabalho humano [8]. A Figura 1 ilustra a distribuição dos controladores em uma linha fabril.

Figura 1 - Conceito básico de um SDCC, visualizando a coexistência de diversos controladores em uma mesma rede.



Fonte: retirado de [9].

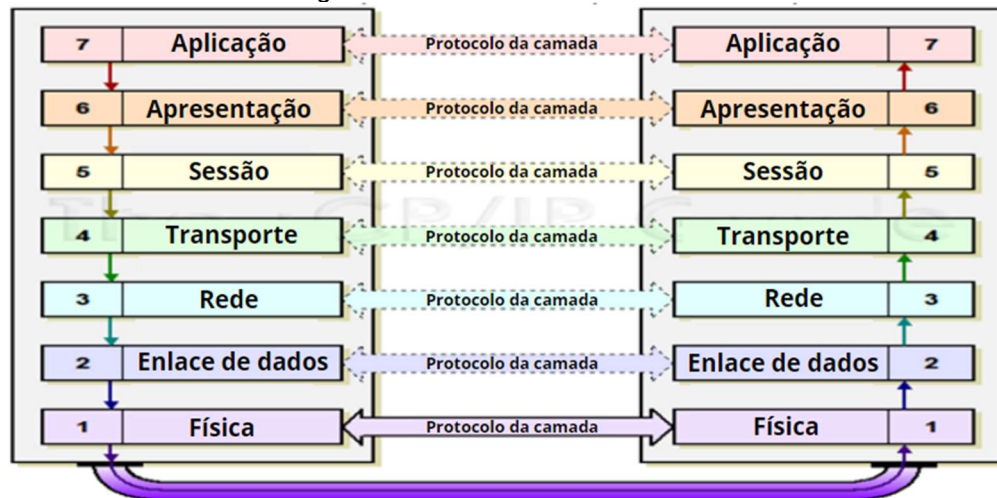
2.2 Protocolo Foundation Fieldbus

O interesse na utilização do SDCD tornou visível a dificuldade na comunicação entre os diferentes dispositivos pela falta de um protocolo padrão e universal. A comunicação entre os instrumentos se manteve de forma analógica, porém os controladores passaram a se comunicar de forma digital, incentivando para que na década de 90 emergisse o que se chamaria de “*The Fieldbus War*” [9]. Dentre a larga quantidade de redes e protocolos de comunicação desenvolvidos na corrida pela padronização durante este evento histórico, a opção que será abordado neste trabalho é o protocolo Foundation Fieldbus (FF).

Redes industriais que possuem comunicação de forma digital e bidirecional, com capacidade de integrar estações de operação com a instrumentação de campo (medidores e atuadores), podem ser denominadas como *Fieldbus* [10]. Para explicar o funcionamento de uma rede de comunicação, são utilizados modelos de construção lógica do fluxo e do tratamento da informação de interesse. Um modelo bastante difundido que também é utilizado para explicar o protocolo FF é o OSI.

O Modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), representado na Figura 2, define as convenções e solicitações necessárias para comunicação entre diferentes sistemas de rede. Possui como propósito auxiliar desenvolvedores na produção de sistemas interoperáveis, sendo visto como uma ferramenta que obteve êxito na utilização da técnica de separação das funções de comunicação em camadas. Cada uma das sete camadas possui suas funções estabelecidas, utilizando, de forma vinculada, aplicações e tratamento de dados, em relação as funções exercidas pela camada mais abaixo [11].

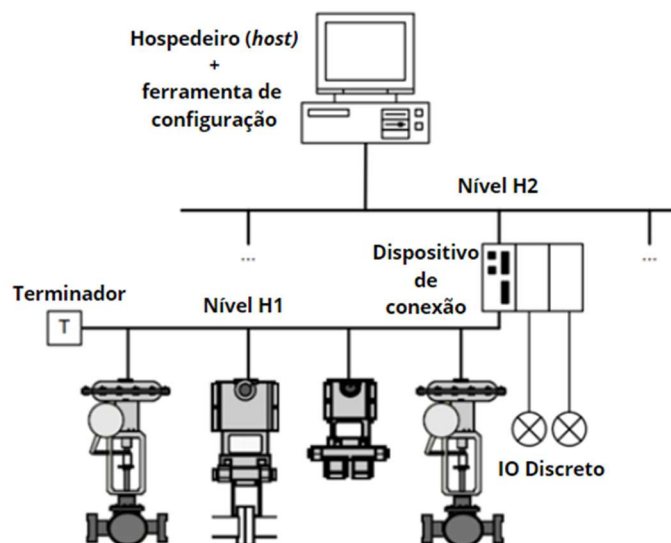
Figura 2 - Camadas do modelo OSI.



Fonte: adaptado de [11].

O funcionamento de uma rede H1 FF se divide em duas partes (que podem ser visualizadas na Figura 3): A comunicação de baixa velocidade, sendo considerada como nível H1; A comunicação de alta velocidade, considerada como nível H2. O nível H1, sendo ele o campo, substitui a comunicação 4-20mA, normalmente utilizado em plantas industriais. O nível H2 trata os dados obtidos pelo nível H1, prestando incrementos de suporte para o controle discreto. A junção destes dois níveis consegue suprir a necessidade de quase todos os sistemas industriais contínuos ou discretos [12].

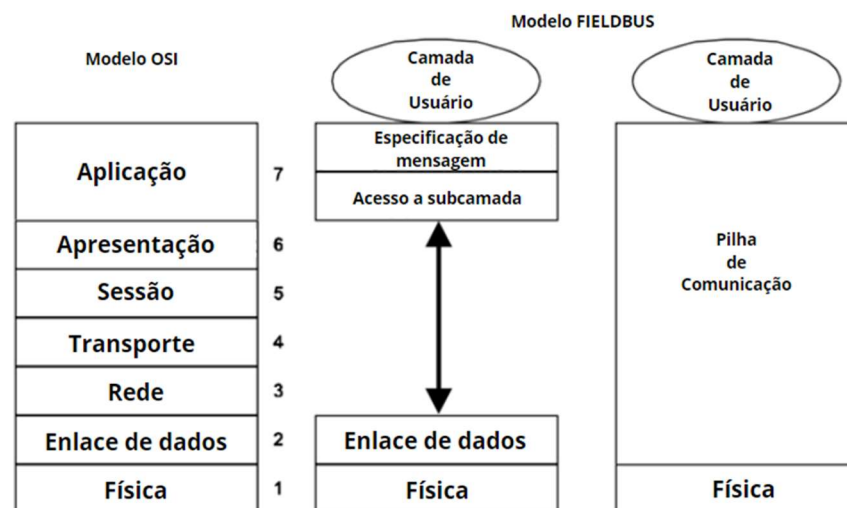
Figura 3 - Representativo das camadas de comunicação.



Fonte: retirado de [14].

Com o entendimento da distribuição do modelo OSI, pode-se definir que o H1 FF é um protocolo baseado em apenas duas camadas, sendo a Camada Física (*Physical Layer*), responsável pelo transporte dos dados, e a Pilha de Comunicação (*Communication Stack*) que envolve uma compressão da segunda até a sétima camada do modelo OSI, que lida com a comunicação digital entre os dispositivos. Existe mais uma camada no protocolo FF que não está incluída no modelo OSI, que é a Camada de Usuário (*User Layer*), a qual define a forma de acesso aos dispositivos da rede, auxiliando na distribuição das informações obtidas com os demais equipamentos [10]. A Figura 4 mostra a distribuição e equivalência das camadas.

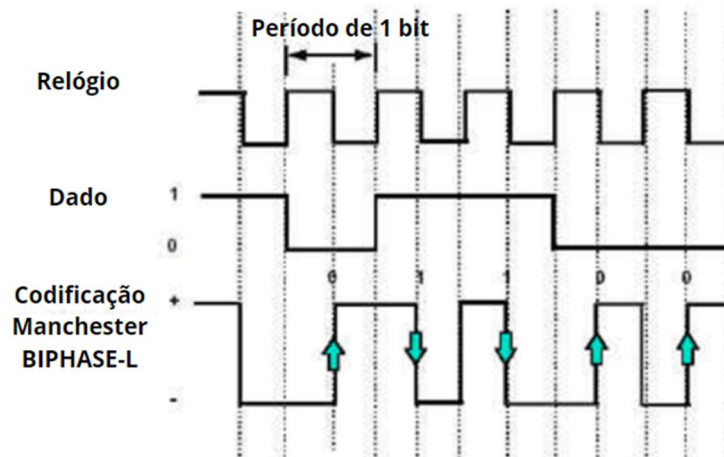
Figura 4 - Comparação de distribuição de camadas no modelo OSI com o modelo Fieldbus.



Fonte: adaptado de [10].

Neste protocolo, a codificação dos dados acontece pela utilização do método Manchester Biphase-L, representado na Figura 5, que é uma comunicação síncrona que registra os sinais de acordo com o relógio (*clock*), não sendo de leitura acionada por nível de tensão [13]. A utilização de um relógio como gatilho para a leitura aumenta o nível de imunidade ao ruído, quando comparado com outros modelos de comunicação. Este método verifica se existe alteração do estado lógico a cada $32 \pm 10\% \mu s$, fazendo com que a taxa de comunicação para todas as configurações de FF sejam de 31,25 kHz [10].

Figura 5 - Código Manchester.



Fonte: adaptado de [12].

De forma padronizada, para a comunicação entre os instrumentos de campo e o controlador, utilizam-se os endereços individuais (ID) variando de 16 a 247 (em que 16 e 17 normalmente são reservados para os gateways H1 FF para Serial). Para auxiliar no reconhecimento dos dispositivos e referenciá-los, nos *softwares* de controle e supervisão, também são atribuídas *tags* [14].

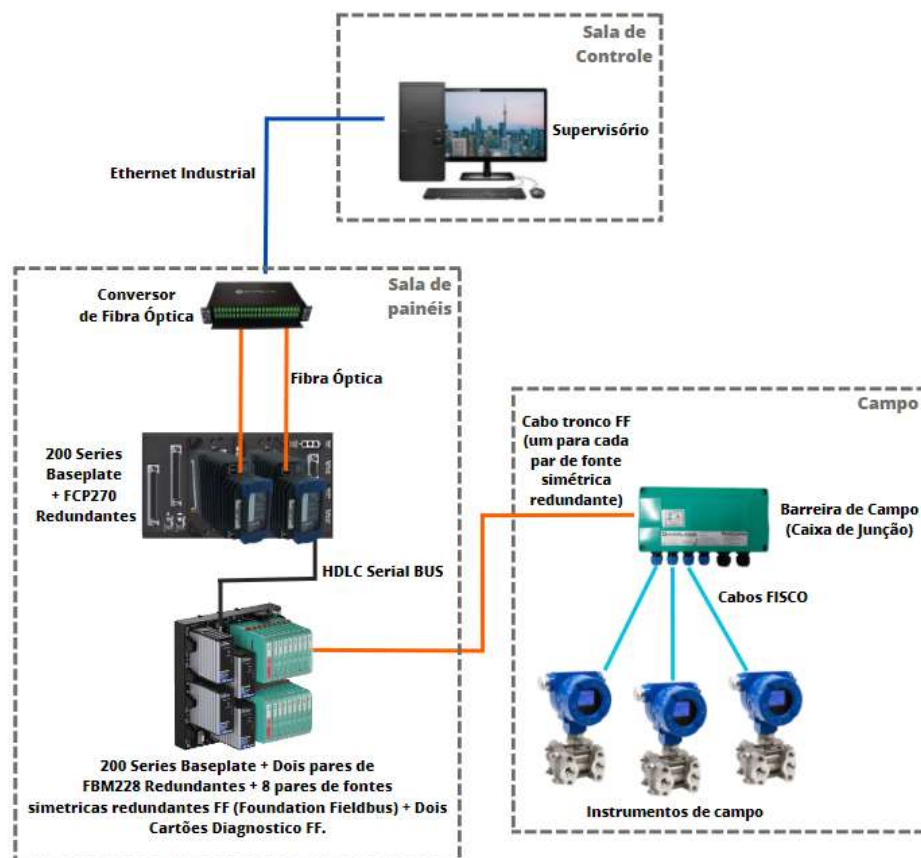
O método utilizado para acesso ao canal, possibilitando a comunicação de um dispositivo com o controlador, em uma rede H1 FF, é a passagem de *token*. Utiliza-se da passagem de um pequeno pacote de dados, chamado de *token*, pelos dispositivos da rede, um por um, e apenas o dispositivo portador do *token* irá transmitir informações, passando o *token* para o próximo dispositivo assim que finalizar sua mensagem. Após a passagem do *token* por todos os dispositivos, ele irá retornar para o dispositivo de menor ID. Este método traz o benefício da igualdade entre os elementos da rede, trazendo a mesma oportunidade de comunicação para todos os instrumentos envolvidos, evitando congestionamento por excessiva utilização da banda de rede por dispositivos de maior prioridade em momento inoportuno [15] [16].

Camadas físicas de sub redes de baixa velocidade são projetadas baseadas no padrão IEC61158-2. A confiabilidade das interconexões possui alta dependência na qualidade das ligações de rede e da camada física dos dispositivos, que normalmente não são redundantes [17].

2.2.1 Topologia H1 Foundation Fieldbus

De forma geral, o nível H1, tratando da camada física, é composto por fontes de potência simétricas, cabo tronco, *spurs*, caixas de junção e instrumentos, como mostrado na Figura 6. Pode ser construído baseado em diferentes especificações, de acordo com a necessidade de cada planta industrial, sendo os modelos de maior destaque o NIS (*Non-Intrinsically Safe*), FISCO (*Fieldbus Intrinsically Safe Concept*) e o Tronco de Alta Potência.

Figura 6: Topologia utilizada em uma rede Foundation Fieldbus na refinaria em estudo.



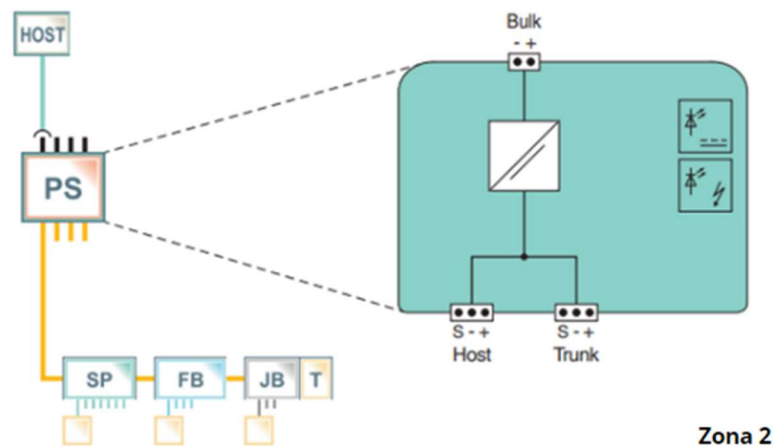
Fonte: Própria

2.2.2 Fonte simétrica

A fonte simétrica de potência possui energização via fonte *bulk*, servindo para alimentação dos segmentos FF. Sua simetria se dá pelo fornecimento de mesmo módulo de tensão entre referência e polo positivo e referência e polo negativo,

fazendo com que o sinal de comunicação possua sua leitura relativa a uma referência 0V [18]. A Figura 7 mostra o esquema simplificado de uma fonte simétrica.

Figura 7 - Fonte simétrica para rede H1 Foundation Fieldbus, da *Pepperl+Fuchs*. Datasheet do produto.



Fonte: retirado de [13].

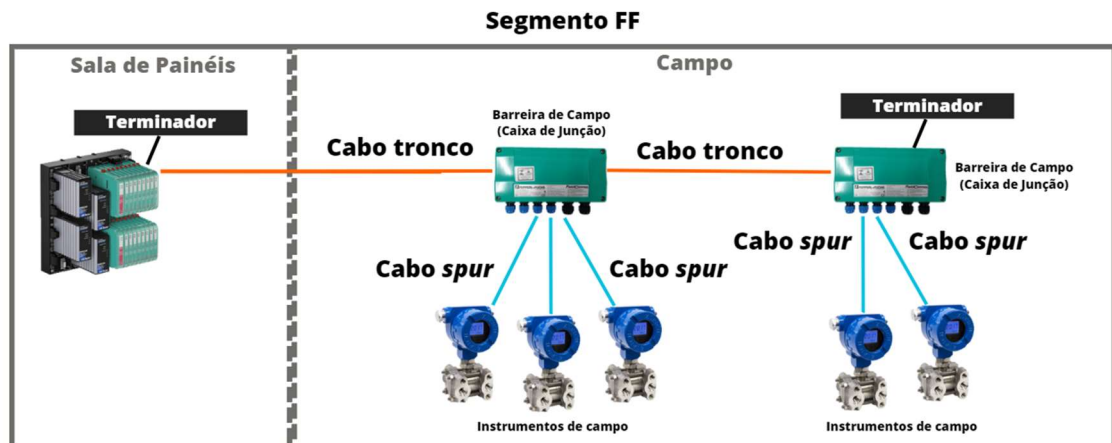
2.2.3 Cabos tronco e spur

É denominado como tronco o cabo que conecta as caixas de junção entre si, também ligando a primeira caixa da sequência às fontes simétricas do segmento. O cabo *spur* é responsável pela conexão entre os equipamentos com a caixa de junção. Na Figura 8, é possível observar os locais de utilização dos cabos tronco e *spur*.

Para utilização como cabo tronco ou *spur*, segue-se o padrão de acordo com a IEC 61158-2, utilizando par trançado de 18 AWG, equivalente a 0,75 mm², com blindagem eletrostática. A cor de sua capa externa pode ser laranja ou azul, dependendo da configuração utilizada, sendo laranja para trechos de alta potência (FF NIS ou Tronco de Alta Potência), e azul para trechos de baixa potência (FISCO).

Existe a obrigatória característica de que o cabo utilizado em FF possua impedância de 100 Ω em uma frequência de 31,25 kHz, observando que sua resistência, em geral, é esperada como 44 Ω /km.

Figura 8 – O conjunto dos elementos forma o segmento. As linhas em laranja representam os cabos troncos. As linhas em azul representam os cabos *spurs*.

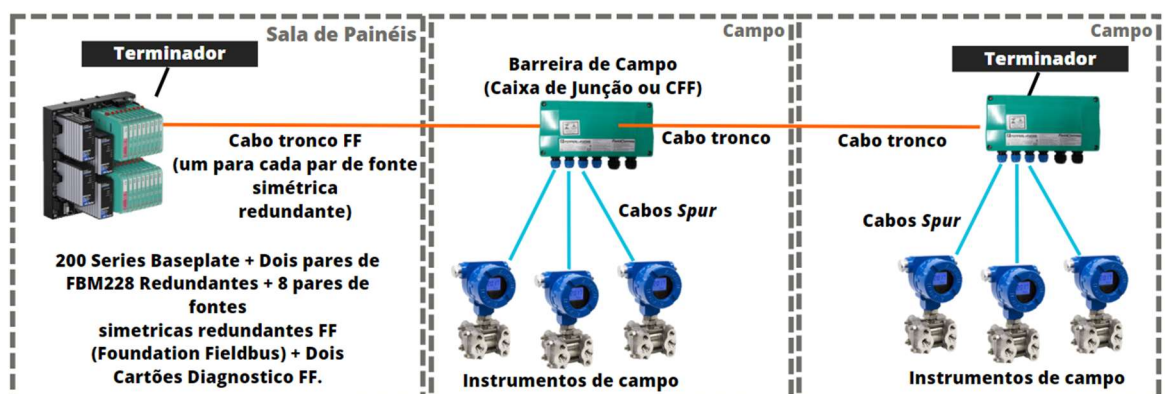


Fonte: Própria.

2.2.4 Caixa de junção

As caixas de junção possuem finalidade de conexão dos instrumentos de campo, convertendo os sinais de corrente em tensão, também possuindo as utilidades de proteção contra curto-circuito e atuando como barreira de campo (em alguns modelos). A utilização deste equipamento representa redução de custos em cabos, e facilitação na manutenção do sistema, por concentrar instrumentos em pontos de junções específicos [19]. Também pode ser atribuído o nome de Caixa Foundation Fieldbus (CFF). A Figura 9 mostra os setores de localização dos equipamentos, incluindo as caixas de junção.

Figura 9 - Distribuição de equipamentos entre os ambientes de sala e campo.

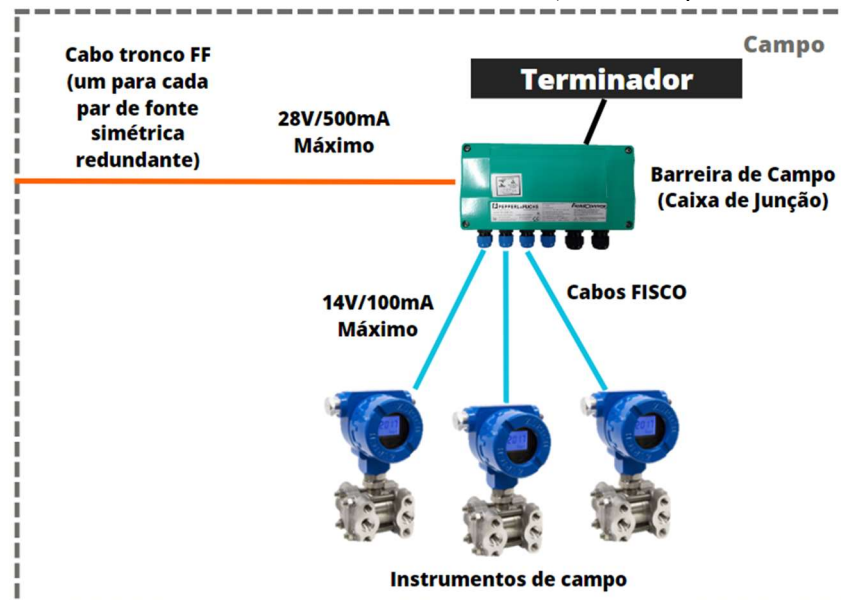


Fonte: Própria.

2.2.5 Barreiras de campo

Possuindo atribuições similares às caixas de junção FF tradicionais, as barreiras de campo são predominantemente utilizadas no modelo de Tronco de Alta Potência, como é possível observar na Figura 10. Esta configuração permite realizar a redução das margens de tensão e corrente para concentrar instrumentos que se situam em zonas perigosas, evitando risco de explosão que existiria caso seja utilizada a CFF padrão [19].

Figura 10 - Conversão dos níveis de corrente e tensão, realizada por barreira de campo.

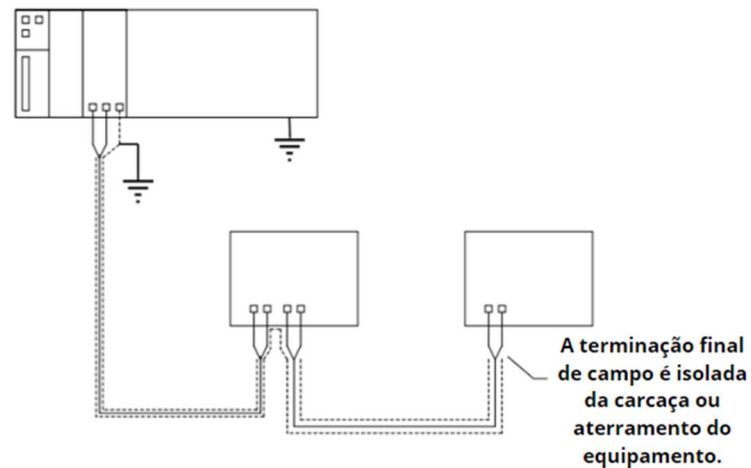


Fonte: Própria

2.2.6 Aterramento do Sistema

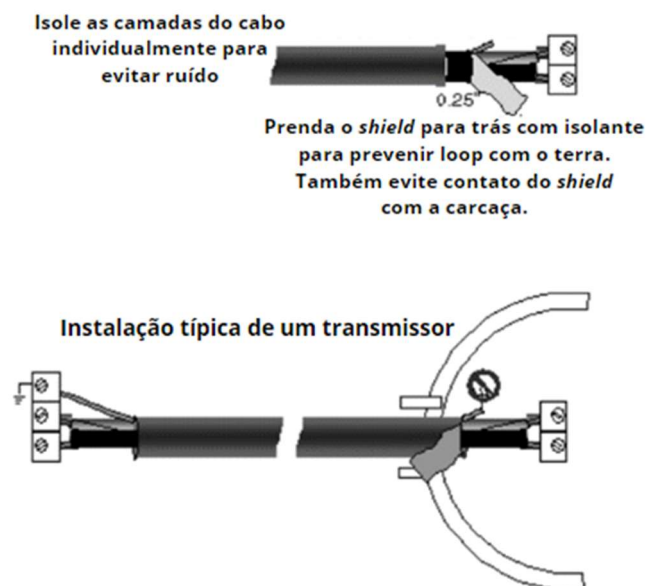
O Aterramento dos elementos de rede deve acontecer em um barramento separado ao aterramento de instrumentos e carcaças. Pode-se situar em um mesmo painel, seguindo para uma mesma haste, realizando a conexão com a malha central de aterramento da planta industrial [20]. A Figura 11 mostra o esquema do aterramento adequado.

Figura 11 - Aterramento em uma rede FF.



Fonte: adaptado de [10].

Como exemplo da Figura 12, ao realizar a passagem do cabo *spur* até o instrumento, isola-se o cabo *shield*, não interligando o aterramento do cabo de rede ao aterramento do instrumento (aterramento de carcaças). A conexão incorreta do *Shield* no instrumento pode gerar ruídos nos sinais de comunicação.

Figura 12 - Conexão de cabo *spur*.

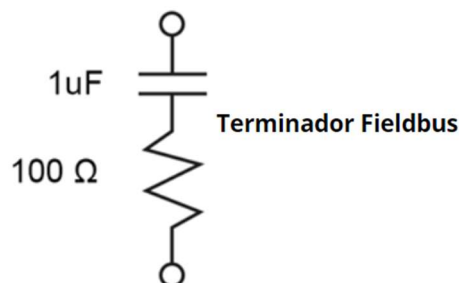
Fonte: adaptado de [11].

2.2.7 Terminador

Devido à alta frequência dos sinais que trafegam na rede FF, um circuito aberto no fim da linha irá causar reflexões. Essas ondas refletidas causam interferência nos sinais que estão sendo transmitidos, levando a erros de comunicação. Para evitar esse fenômeno, utilizam-se terminadores.

O terminador em uma rede FF é composto por um resistor de $100\ \Omega$ e um capacitor de $1\ \mu\text{F}$ em série, representados na Figura 13, utilizando um terminador em cada extremidade da rede, representando paralelismo, compondo uma equivalência de $50\ \Omega$ e $2\ \mu\text{F}$. O resistor representa a carga nominal para os sinais de comunicação, considerando uma corrente máxima de 20 mA pico a pico, obtém-se sinais de tensão de no máximo 1 V pico a pico. O capacitor impede a queda de tensão DC, assimilada a resistência, fornecida pela fonte [21]. A Figura 9 mostra as posições de instalação dos terminadores.

Figura 13 - Representação elétrica de um terminador de rede FF.

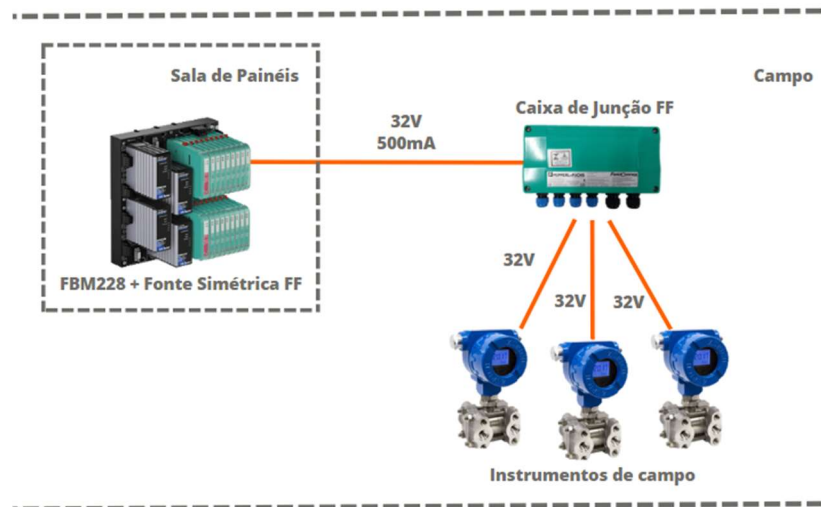


Fonte: retirado de [20].

2.2.8 NIS (Non-Intrinsically Safe)

O modelo NIS (Non-Intrinsically Safe ou Não Intrinsecamente Seguro) não limita as tensões e correntes em campo, não sendo recomendado para áreas explosivas. Possui, em suas fontes de potência simétricas, tensões de até 32V, podendo oferecer ao barramento uma corrente de 500mA sem a necessidade de repetidores, possibilitando a utilização de um maior número de instrumentos simultâneos com possibilidade de maior comprimento de cabo [10]. A Figura 14 mostra os valores de tensão e corrente desse modelo de instalação.

Figura 14 - Representação das tensões e correntes possíveis para modelo NIS

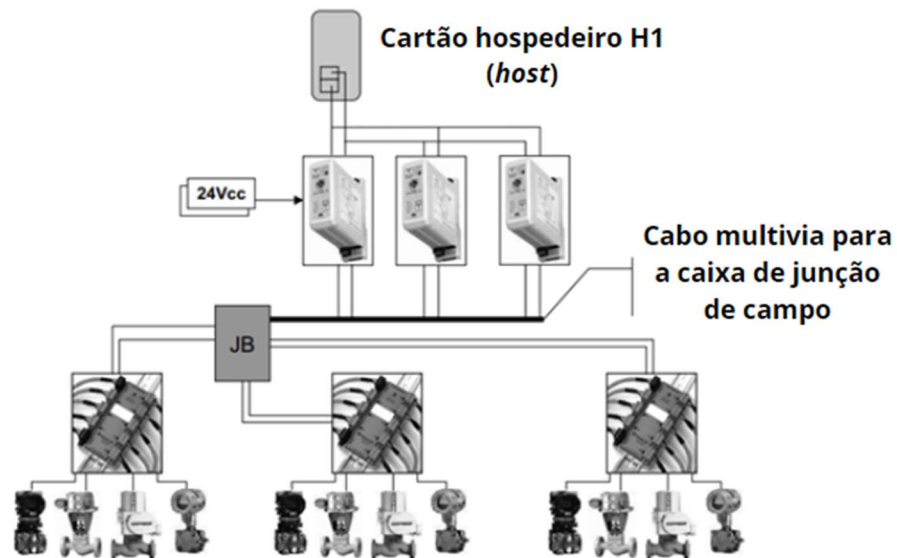


Fonte: Própria.

2.2.9 FISCO (Fieldbus Intrinsically Safe Concept)

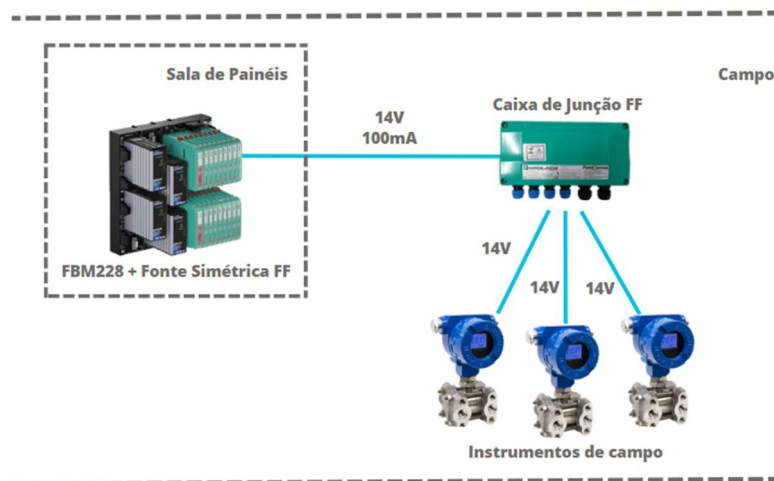
O *Fieldbus Intrinsically Safe Concept* (Conceito do Barramento de Campo Intrinsecamente Seguro), mostrado na Figura 15, oferece uma configuração que limita a tensão e corrente de campo a níveis suficientemente baixos, tornando possível a utilização em ambientes explosivos. Baseado no padrão de camadas físicas IEC 61158-2, esta configuração acarreta, pela baixa relação entre tensão e corrente, limites quanto à quantidade de instrumentos conectados, e comprimento máximo do cabeamento. A tensão permitida para alimentação do barramento se limita entre 14 VCC a 24 VCC, possuindo no nível mais elevado uma corrente máxima de 100 mA, que podem ser observados na Figura 16. Para que seja possível a extensão dos limites, utilizam-se de repetidores condicionadores de potência [10], [14].

Figura 15 - Exemplo de modelo FISCO com repetidores.



Fonte: Fonte: adaptado de [10].

Figura 16 - Ilustração de modelo FISCO existente no caso estudado.



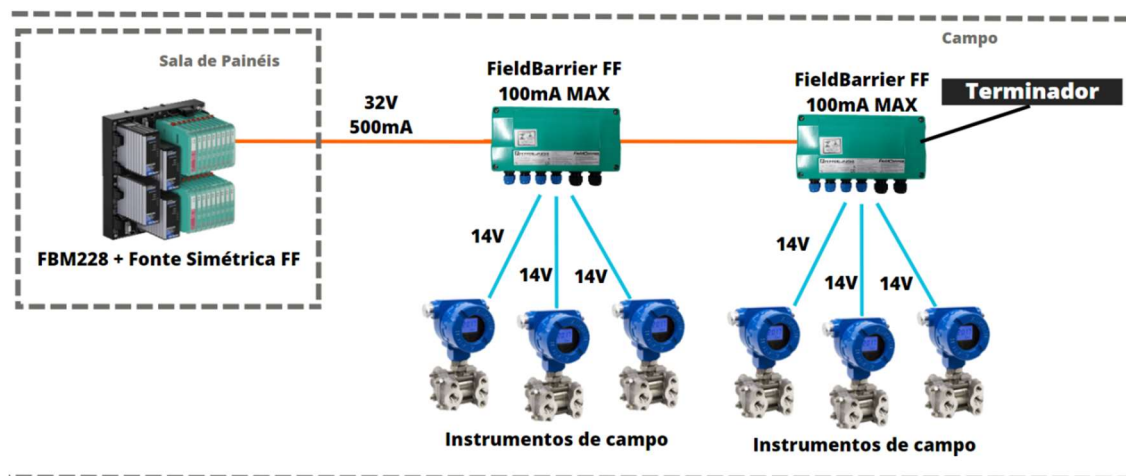
Fonte: Própria.

2.2.10 Tronco de Alta potência

O conceito de Tronco de Alta Potência (High Power Trunk), utiliza de um condicionador de potência (de 28 V a 32 V, com simetria, sendo máxima de 500 mA

no cabo tronco). Utiliza barreiras de campo (oferecendo tensões de 9 V a 14 V, com máximo de 100 mA por CFF), obtendo uma relação de tensão e corrente seguros para operação em zonas perigosas, como observado na Figura 17. Utiliza parcialmente o modelo NIS quando se trata do cabo tronco e dos níveis de tensão das fontes simétricas em painel até as CFFs, e FISCO, quando se trata dos níveis de tensão e corrente para equipamentos de campo. [22]

Figura 17 - Modelo de Tronco de Alta Potência.



Fonte: Própria.

2.3 Certificação de rede

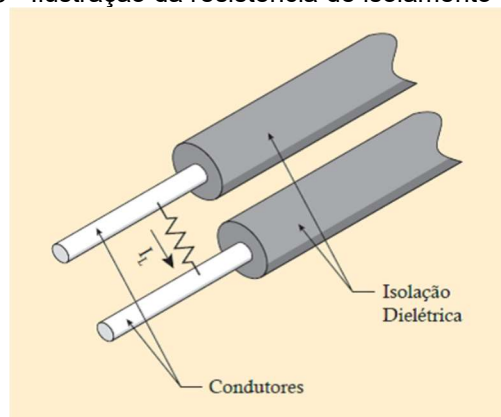
A confiabilidade dos resultados obtidos pela comunicação em uma rede industrial depende veemente de sua qualidade, tornando necessária a certificação por meio da realização de testes que comprovem um grau de incerteza extremamente reduzido [23]. Para a certificação de uma rede FF, são efetuados três testes, sendo o teste de integridade de cabo, o teste estático e o teste dinâmico.

2.3.1 Teste de integridade de cabo

Para analisar a integridade dos cabos, é realizada a medição da resistência de isolamento, representada pela simbologia de um resistor na Figura 18, entre um condutor e outro. Para valores medidos abaixo da referência (Tabela 1), indicam-se

perdas de características elétricas do isolante. Deve ser levado em consideração que a medição de isolamento do cabo deve ser realizada aos pares, formados entre os cabos dos polos, *shield* e aterramento, utilizando um megômetro [24].

Figura 18 - Ilustração da resistência de isolamento dos cabos.



Fonte: retirado de [25].

Tabela 1 – Valores de referência para cabos FF de 18AWG.

Resistência de Isolamento (MΩ/km)	Capacitância mútua (nF/km)	Indutância (mH/km)	Impedância a 31,25 kHz (Ω/km)
3612	78	0,45	100±20%

Fonte: retirado de [26].

2.3.2 Teste estático

O teste estático consiste na medição das grandezas elétricas do sistema, com todos os componentes conectados, sendo os cabos (tronco e *spurs*) as CFFs e os instrumentos de campo. Para a realização dos testes, utiliza-se um LCR. Os LCRs medem a magnitude da tensão e da corrente, assim como o ângulo entre essas grandezas, definindo o vetor impedância, fornecendo os componentes reativos, sendo eles a indutância e a capacitância [25].

As medições são realizadas nos cabos que compõem o cabo tronco (positivo, negativo e *shield*), e no aterramento. Como boa prática, mede-se a indutância para obtenção de valores que possam indicar a existência de enrolamento do cabo ao decorrer do percurso, gerando efeito de bobina.

Tabela 2 - Tabela de referência dos valores de resistência e capacitância. Valores baseados na IEC61158-2 e Manuais Pepperl+Fuchs. *O valor de referência, neste caso, dependerá da construção do segmento, levando em consideração informações como o número de CFFs e instrumentos envolvidos.

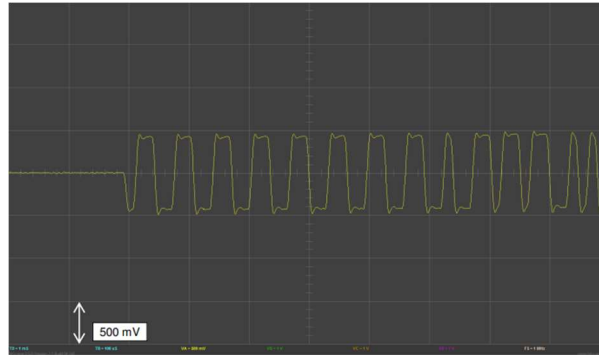
Medições de Referência – Tronco de Alta potência					
Resistências					
(+) e (-)	(+) e (s)	(-) e (s)	(+) e Terra	(-) e Terra	(s) e Terra
> 16 kΩ*	> 20 MΩ	> 20 MΩ	> 20 MΩ	> 20 MΩ	> 20 MΩ
Capacitâncias					
(+) e (-)	(+) e (s)	(-) e (s)	(+) e Terra	(-) e Terra	(s) e Terra
< 2,2 μF	< 300 nF	< 300 nF	< 300 nF	< 300 nF	< 300 nF

Fonte: retirado de [19] [20].

2.3.3 Teste dinâmico

Os principais parâmetros analisados no teste dinâmico são o *jitter*, o ruído, e a quantidade de entradas e saídas dos instrumentos na *live list*. O teste consiste na análise dos sinais de comunicação, que possuem o padrão da Figura 19, observando as ondas obtidas por meio de medições no cabo tronco. Alguns fabricantes (*Honeywell*, *Yokogawa* ou *Pepperl+Fuchs* p. ex) oferecem possibilidade de utilização de cartões diagnósticos, que fazem a leitura dos sinais de comunicação e exibem via *software* para o usuário, fornecendo informações importantes sobre as ondas obtidas, não havendo necessidade da utilização de osciloscópio. De acordo com referências pré-estabelecidas, torna-se possível confirmar a qualidade da comunicação, finalizando a certificação da rede FF [10] [26].

Figura 19 - Exemplo de sinal de comunicação FF.

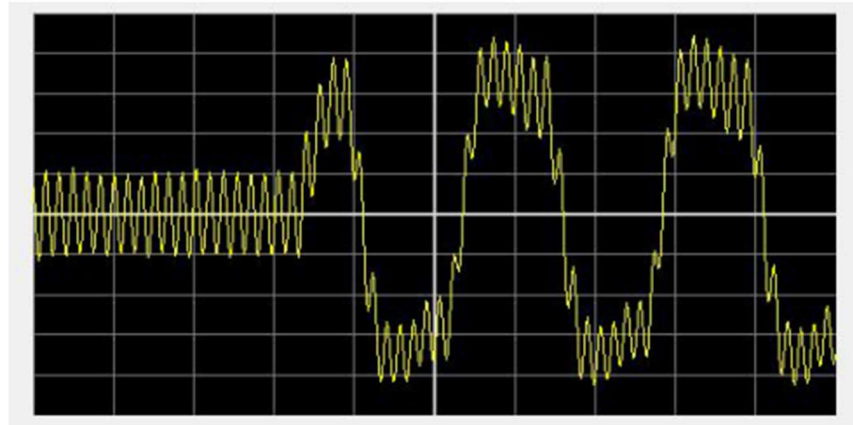


Fonte: retirado de [28].

2.3.4 Ruído

Pode ser considerado como ruído elétrico (ou interferência eletromagnética) qualquer sinal indesejado que ocasione alterações nos formatos de onda na comunicação ou alimentação de um sistema. Consegue influenciar nos resultados de diferentes maneiras, por suas alterações de amplitude e frequência, representados na Figura 20, sendo capaz de tornar inoperante a comunicação e funcionamento do dispositivo ou rede envolvidos, dependendo da intensidade de suas características e da sensibilidade do receptor [27].

Figura 20 - Ruído em um sinal de comunicação FF.

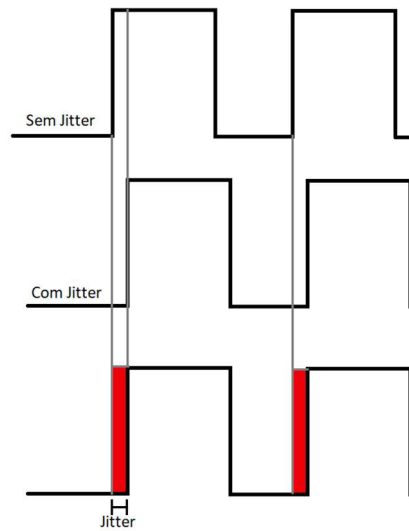


Fonte: retirado de [27].

2.3.5 Jitter

Assim como o ruído é o desvio de valores de amplitude de um sinal, o *jitter* representa o desvio temporal de um sinal em relação a posição ideal, a curto prazo, não possuindo um valor fixo. Pode ser considerado como um atraso, influenciando negativamente, levando à instabilidade de um controle em malha fechada [28]. A Figura 21 representa uma variação temporal do sinal, acarretando *jitter*.

Figura 21 - Comparação entre o sinal referência e um sinal sobre influência de *jitter*.



Fonte: Própria.

2.3.6 Live List

A *live list* é a lista de dispositivos ativos os quais possuem o mínimo de estabilidade de comunicação, tornando possível a troca de informações entre o controlador e o instrumento de campo. Possui funcionamento conjunto com o LAS (*Link Active Scheduler*), que é uma entidade lógica de um sistema FF responsável pelo gerenciamento de mensagens. O LAS mantém os dispositivos ativos na *live list* por enviar *tokens* para todos os possíveis endereços. O dispositivo da vez irá responder enviando dados como seu ID único (identificador) e sua *TAG*. Qualquer dispositivo inserido na rede Foundation Fieldbus é adicionado à *live list* ao receber o *Token*. Caso o dispositivo apresente três falhas seguidas (sem resposta) estando em sua vez na sequência do *token*, será removido da lista de dispositivos ativos [12]. A Figura 22 mostra um exemplo de *live list*.

Figura 22 - Exemplo de *Live List* em sistema FOXBORO

Fonte: Própria.

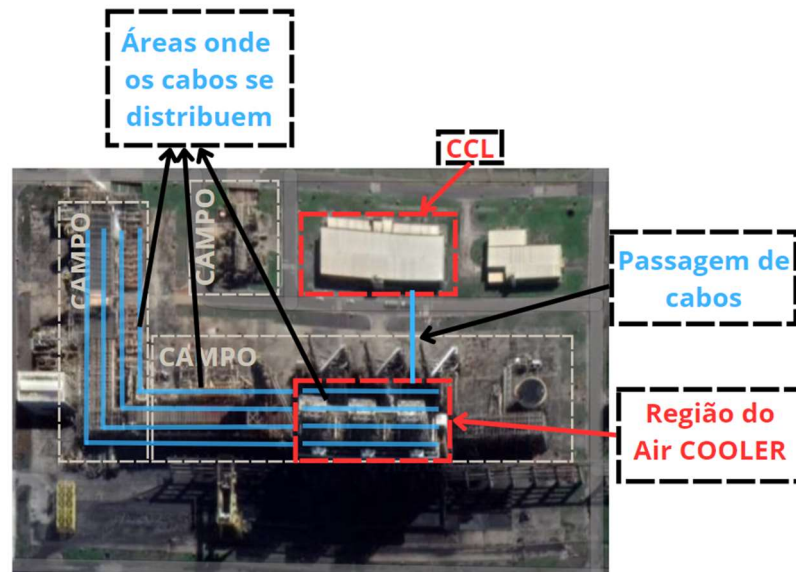
3. METODOLOGIA

Neste tópico serão abordados os principais pontos necessários para a certificação dos segmentos. As etapas iniciam com a divisão das áreas envolvidas nas emendas, englobando o passo a passo para a avaliação física dos cabos e verificação de qualidade da comunicação da rede FF.

3.1 Divisão de trechos

A unidade industrial analisada possui 290 (duzentos e noventa) segmentos FF, estando 142 (cento e quarenta e dois) envolvidos no sinistro, sofrendo danos por sobreaquecimento, ocasionando a necessidade de recortes nos trechos danificados. O percurso de passagem dos cabos troncos se inicia no CCL (Centro de Controle Lógico), estendendo-se para o *Air cooler*, seguindo orientações da Figura 23, que é a região acima dos fornos. Via leito principal, os cabos troncos são direcionados para descidas, por meio de calhas e eletrodutos que seguem para suas respectivas CFFs, originando a conexão sequencial dos segmentos.

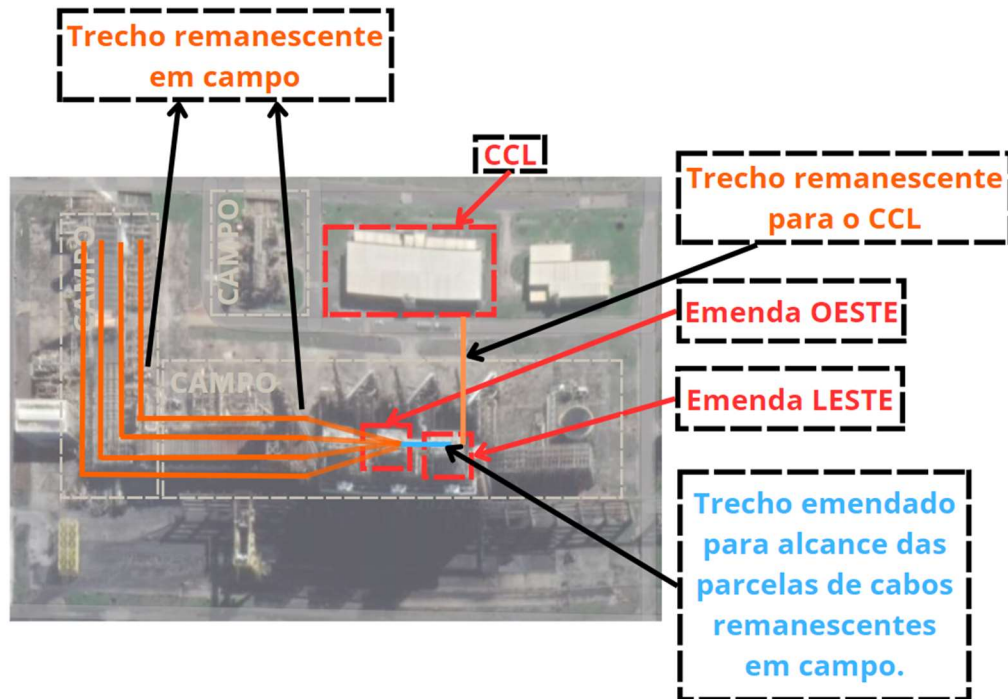
Figura 23 – Vista aérea da unidade contida no sinistro. Em vermelho, o CCL (área da conexão inicial dos cabos) e o *Air Cooler* (área de distribuição individual dos cabos).



Fonte: Própria.

Após a remoção dos trechos danificados, concentrados na região do *Air Cooler*, três zonas foram definidas para reconexão dos cabos remanescentes. O primeiro trecho parte do CCL até a primeira emenda, situada na extremidade leste do patamar do *Air Cooler*. O segundo trecho se inicia na emenda Leste até a emenda Oeste, que se situa ao Oeste da posição da primeira emenda. Como trecho final, tem-se a emenda Oeste até o campo, mostrada na Figura 24.

Figura 24 – Vista aérea da unidade contida no sinistro. Novo trecho adicionado para que seja possível o alcance da parcela dos cabos seccionados que estão conectados no CCL com a parcela que se encontra conectada em campo.

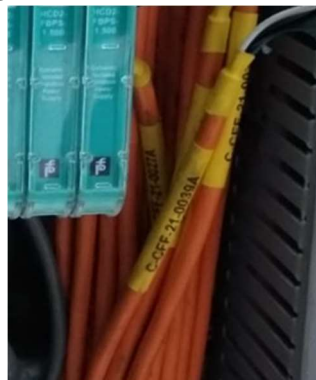


Fonte: Própria.

3.2 Identificação de segmentos

Cada segmento FF possui uma TAG no início de sua conexão (próximo a fonte redundante), como observado na Figura 25, e no final (na CFF). Também se utilizam TAGs nos painéis, no mesmo padrão da Figura 26, facilitando a orientação das equipes de automação, elétrica e instrumentação.

Figura 25 - Exemplo de TAG utilizada no trecho inicial do cabo tronco nos painéis FF.



Fonte: Própria.

Figura 26 - Formato de TAG para identificação de painéis de força e de comando.



Fonte: retirado de [31].

Os segmentos envolvidos nas emendas são divididos em duas categorias, Segmentos Críticos e Segmentos Não Críticos. Os Segmentos Críticos correspondem a menor parcela, indicando o conjunto de CFFs e instrumentos em campo que representam criticidade na partida e operação da planta (Tabela 3). Os Segmentos Não Críticos representam os conjuntos FF que possuem funções mais simples como medições redundantes ou indicativos para informações obtidas de forma indireta, mas que conseguem ser manipulados com maior facilidade, não impactando de forma irreversível na partida da planta ou no funcionamento correto da linha, pela possibilidade da realização de *by pass*.

Tabela 3 - Segmentos FF Críticos.

SEGMENTOS CRÍTICOS – H1 FOUNDATION FIELDBUS	
PAINÉIS	SEGMENTOS
P-21-201-FRONTAL	H1-0008, 0009, 0010, 0011, 0013, 0021 E 0024
P-21-202-FONTRAL	H1-0102, 0103, 0104 E 0109
P-21-202-COSTAS	H1-0140, 0141, 0142, 0143 E 0144
P-21-203-FRONTAL	H1-0155

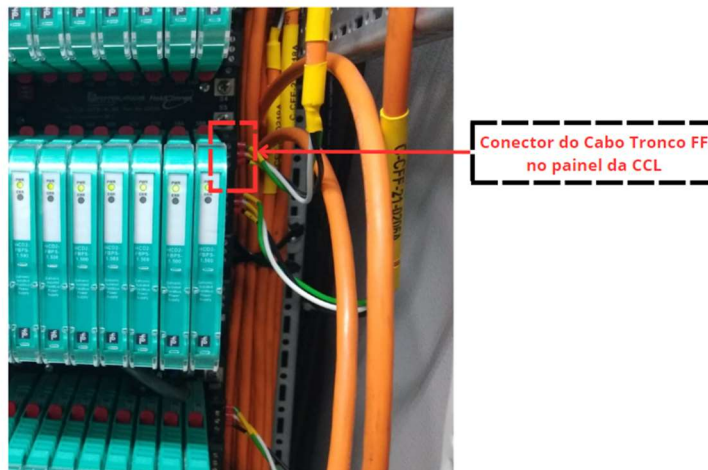
Fonte: Própria.

Levando em consideração o curto tempo de parada, foi preferível a testagem de uma amostra de cabos tronco, buscando estatisticamente atestar que os cortes realizados foram eficientes. Para que esta amostra possua o maior indicativo de representação possível, foram escolhidos os Segmentos Críticos para testagem via megômetro. Devido ao extenso comprimento, podendo chegar até um quilômetro, antes da utilização do megômetro, para os testes de isolamento, garante-se que o cabo

que está sendo analisado seja o mesmo nas duas pontas. O teste realizado para confirmação é o de continuidade. Foi utilizado um multímetro Minipa ET-2507B, com certificação válida.

Desconectam-se os cabos em ambas as extremidades no conector contido em painel no CCL, destacado em vermelho na Figura 27, e em campo. É realizado o curto de dois polos em uma das extremidades e na outra é utilizado o multímetro, seguindo os passos da Figura 29, na escala de resistência com sonoridade acionada para continuidade (baixa resistência). Caso o par de cabos apresente baixa resistência (acionando a sonoridade), trata-se do mesmo cabo que está sendo operado, caso a resistência vá ao infinito (não apresentando sonoridade) entende-se que o cabo não é o mesmo, e caso a medição demonstre resistência relativamente alta (também não apresentando sonoridade no multímetro) é alertada provável falha no cabo, sendo necessária análise para entendimento de qual dos condutores está defeituoso.

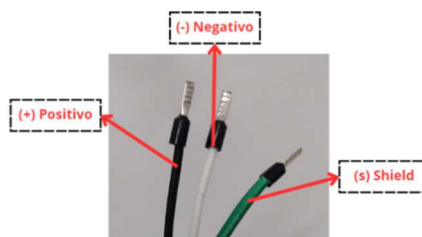
Figura 27 - Conector utilizado para contato do cabo tronco com *baseplate*.



Fonte: Própria.

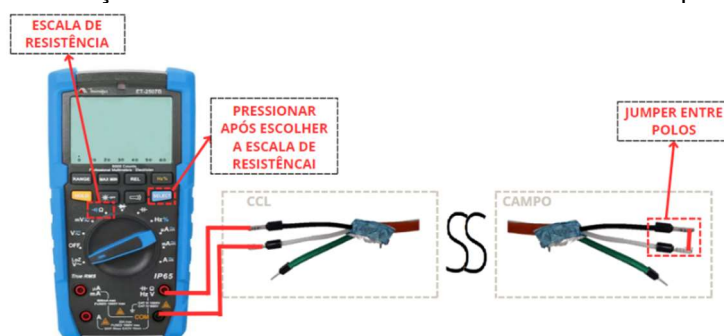
Assim que desconectados, os cabos apresentam a seguinte visualização em ambas as extremidades, conforme Figura 28:

Figura 28 - Padrão de cabos contidos no cabo tronco.



Fonte: Própria.

Figura 29 - Medição de continuidade com multímetro modelo Minipa ET-2507B



Fonte: Própria.

Confirmando que o cabo selecionado é o mesmo no CCL e no campo, pelo teste de continuidade, iniciam-se as testagens de isolamento (teste de integridade de cabo) dos cabos troncos. Para os testes, foi utilizado um Megômetro Digital Minipa MI-2552, com calibração válida, similar ao apresentando na Figura 30.

Figura 30 - Megômetro Minipa MI-2552.



Fonte: Minipa.

Para que não haja risco da avaria de qualquer equipamento pela injeção de alto nível de tensão no trecho, pelo megômetro, realiza-se a soltura dos cabos que serão megados em todas as extremidades de conexão, sendo para o trecho cortado entre lado Leste (ainda sem emenda) e CCL, e do trecho Oeste para o campo,

realizando a desconexão do cabo tronco na primeira CFF do segmento. Utilizam-se garras do tipo Jacaré para fixação nos cabos, como a garra mostrada na Figura 31.

Figura 31 - Exemplo de garra de medição do tipo Jacaré.



Fonte: Própria.

Em uma das extremidades, realiza-se a conexão de dois cabos no megômetro, e isolam-se os demais contatos, seguindo a Tabela 5:

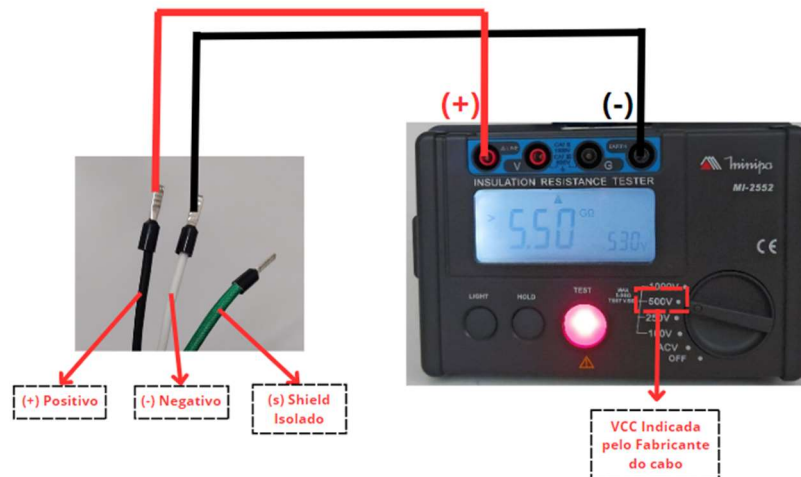
Tabela 4 - Sequência para medições de isolamento do cabo.

ORIENTAÇÕES PARA TESTES DE INTEGRIDADE DE CABO	
PAR UTILIZADO	CONTATOS ISOLADOS
(+) com (-)	(s) e Terra
(+) com (s)	(-) e Terra
(+) com Terra	(-) e (s)
(-) com (s)	(+) e Terra
(-) com Terra	(+) e (s)
(s) com Terra	(+) e (-)

Fonte: Própria.

Após realização dos dois passos anteriormente explicados, inicia-se o teste conforme Figura 32:

Figura 32 - Exemplo de conexão em megômetro para teste de isolamento utilizando o par (+) e (-).



Fonte: Própria.

Foi utilizada a tensão de 500 VCC durante o período de um minuto, seguindo recomendações do fabricante do cabo. Para iniciar o teste, basta clicar no botão representado na Figura 32 com led em vermelho aceso (que estará com led desligada antes de pressionar). Este mesmo teste deve ser realizado para todos os outros pares representados na Tabela 5.

3.3 Emenda dos cabos

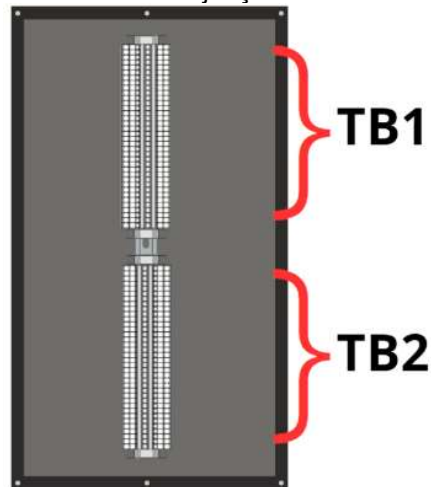
Finalizadas as testagens de integridade de cabo, são iniciadas as instalações das emendas, utilizando caixas de conexões de modelo mostrado na Figura 33. Foram utilizadas no total oito caixas para emenda, contando com duas reservas, de categoria EX devido à intempérie do ambiente. Cada caixa de emenda foi organizada em dois trilhos formados por trinta e seis bornes cada, sendo um conjunto de três bornes para cada segmento abrangendo os polos e o *shield*, chamados de TB (Trilho de Bornes) demonstrados nas Figuras 34 e 35.

Figura 33 - Caixa de junção utilizada para emenda de cabos, categoria EX.



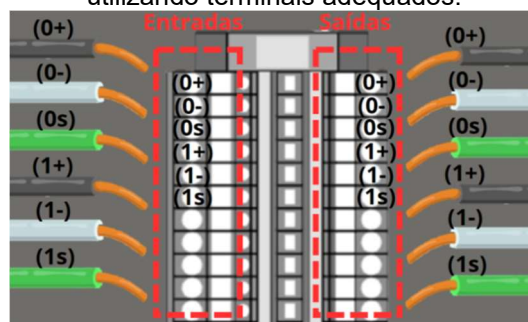
Fonte: retirado de [29].

Figura 34 - Organização interna de bornes internamente nas caixas de junção de emendas. Representação em 2D do interior da caixa de junção. Cada TB representa um trilho de bornes.



Fonte: Própria.

Figura 35 - Representação da conexão das emendas. Os cabos, na prática, foram conectados utilizando terminais adequados.



Fonte: Própria.

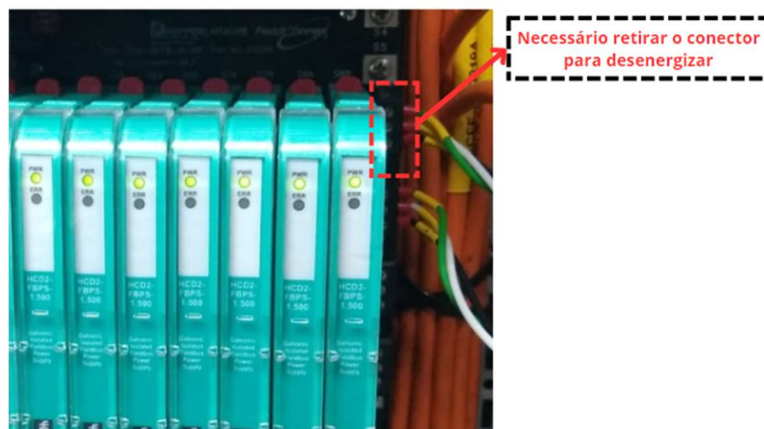
Todas as caixas de junção seguem o mesmo padrão de montagem, possuindo cabos tagueados nos pontos de entrada, saída, interna no borne de entrada, interna no borne de saída.

3.4 Teste estático

Finalizadas as conexões dos cabos troncos nas caixas, e entre caixas, inicia-se a verificação da qualidade da camada física da rede, sendo a realização dos testes estáticos. Como ferramenta principal, foi utilizado um LCR Minipa modelo MC-155 com certificação válida.

Por meio dos testes estáticos, foram medidas as resistências e capacitâncias de todos os segmentos envolvidos no sinistro, que fazem parte da emenda, utilizando a IEC61158-2 como documento referência para obtenção de valores para comparação, gerando a informação de segmento aprovado ou reprovado de acordo com os valores obtidos. Os segmentos passam pelas medições totalmente conectados (incluindo instrumentos), porém desenergizados (com os conectores representados na Figura 36 desconectados).

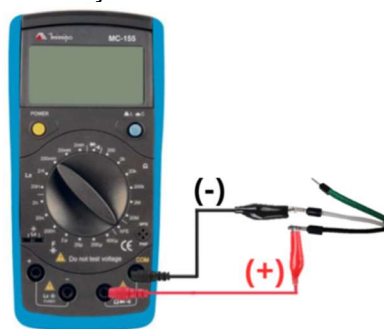
Figura 36 - O conector necessita estar desconectado do *baseplate* para realização de testes estáticos.



Fonte: Própria.

Após retirada do conector do *baseplate*, iniciam-se os testes estáticos começando pelas medições de resistência, seguindo o padrão da Figura 37:

Figura 37 - Medição de resistência utilizando LCR.

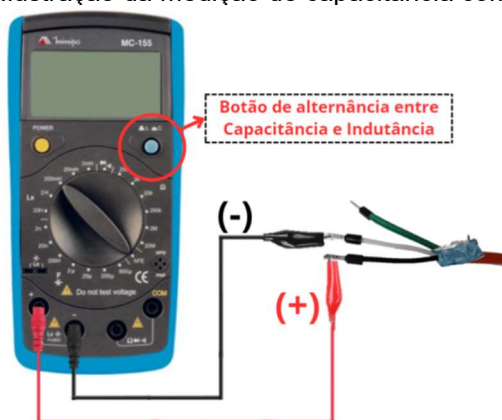


Fonte: Própria.

Para a medição da resistência entre polos positivo e negativo, preserva-se a correta conexão no LCR, em que o polo negativo (cabo branco) se conecta ao COM do LCR, e o cabo positivo (cabo preto) se conecta à ponteira com indicativos de medição, pois é necessário levar em consideração que o sistema no momento está totalmente conectado, incluindo circuitos eletrônicos os quais possuem componentes, como diodos, que apresentam diferentes medições de resistência de acordo com a posição de condução da corrente por características elétricas intrínsecas.

Para as demais medições de resistência, utiliza-se do mesmo padrão, apenas alterando a escala de medição, conforme Tabela 2. Para medição dos valores de capacitância, é utilizado o mesmo LCR, porém com ponteiras em posições diferentes como mostrado abaixo na Figura 38.

Figura 38 - Ilustração da medição de capacitância com LCR.



Fonte: Própria.

Após o encaixe das ponteiras na região inferior esquerda do LCR, pressiona-se o botão azul indicado na Figura 38, que alterna o modo de medição entre

capacitância e indutância, sendo que para capacitância o botão necessita estar retido pressionado, e para indutância ele necessita estar solto (ou não retido).

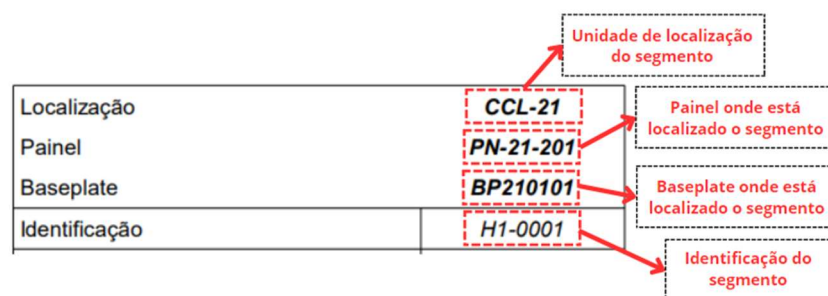
3.5 Testes dinâmicos

São acoplados os conectores de todos os segmentos FF de volta em seus respectivos encaixes, no *baseplate*, energizando o sistema. Para que seja realizada a análise, utiliza-se do *software Pactware*, da *Pepperl+Fuchs*. O *Pactware* consiste em um *software* que abrange a comunicação entre um transdutor, um adaptador de sinal ou outro tipo de equipamento industrial com um sistema de cálculos, sendo totalmente independente ao dispositivo ao qual se comunica [29].

Algumas identificações devem ser obtidas para utilização do *Pactware*, começando pelo painel no qual o segmento está contido. Essa identificação pode ocorrer de forma visual ou por meio da utilização do diagrama de segmentos. Para entendimento visual, basta encontrar o painel o qual o segmento está contido, e observar o TAG em sua porta, como mostrado na Figura 26.

Para identificação via diagrama de segmentos, basta observa a tabela de informações no canto superior esquerdo da folha do segmento, como mostra a Figura 39.

Figura 39 - Identificação de segmento via diagrama.

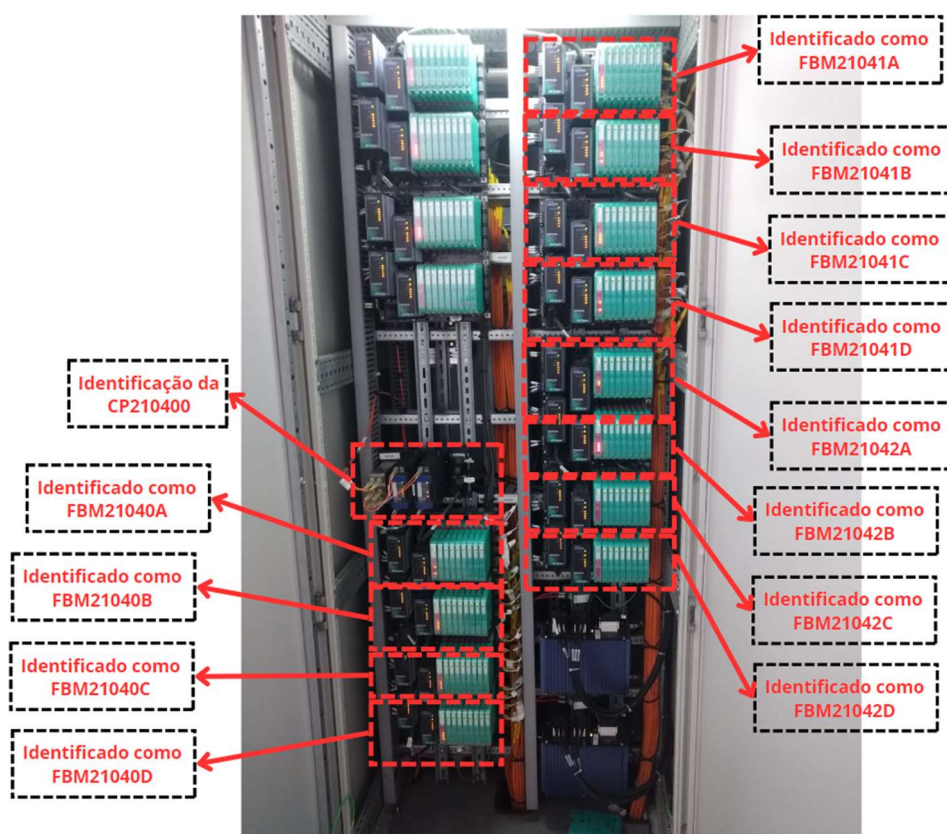


Fonte: Própria.

Com esta identificação, é possível encontrar, via *software*, a nível de *baseplate*, em qual agrupamento está configurado o segmento, porém ainda torna-se necessário o conhecimento sobre qual FBM o segmento está assimilado. Por padrão, sabe-se que a cada identificador de FBM tem-se quatro segmentos, ou seja,

no primeiro FBM do P-21-201 estão contidos os segmentos H1-0001, 0002, 0003 e 0004. Porém, devido a atos de manutenção e alterações na linha sem a atualização do *as built* geral, é de maior confiança a identificação visual sobre a real localização do segmento. Para isso, utiliza-se da identificação de FBM por sequenciamento, como indicado na Figura 40.

Figura 40 - Sequenciamento de identificação de FBM.



Fonte: Própria.

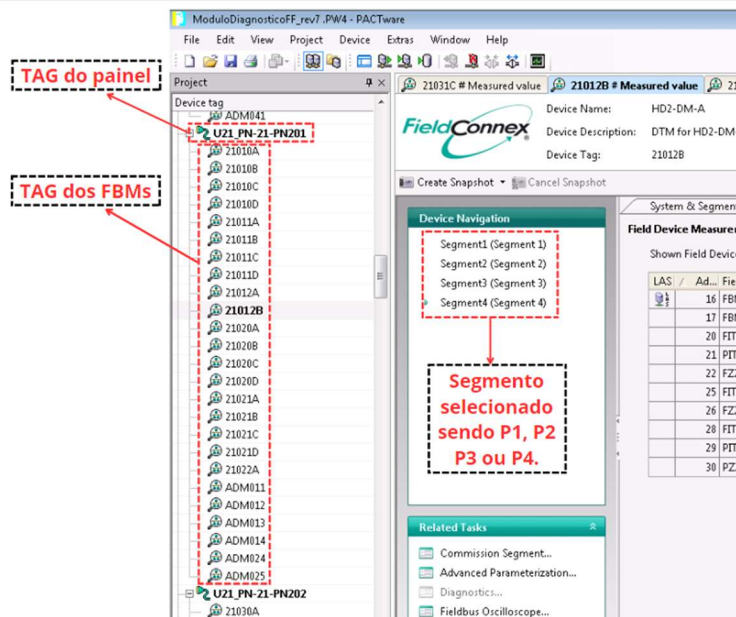
Após identificação do FBM, como último passo para identificação do segmento, basta analisar em qual conector do *baseplate* ele está. O número do conector pode variar entre um, dois, três ou quatro, por padrão chamados de P1, P2, P3 e P4, indicados na Figura 41.

Figura 41 - Identificação de conector do FBM.



Fonte: Própria.

Com toda identificação, é possível encontrar o segmento via *Pactware*, assimilando o TAG do painel, o TAG do FBM e o conector. A Figura 42 mostra como estão identificados os itens durante utilização do *software*.

Figura 42 - Identificação dos FBMs e dos segmentos no *Pactware*.

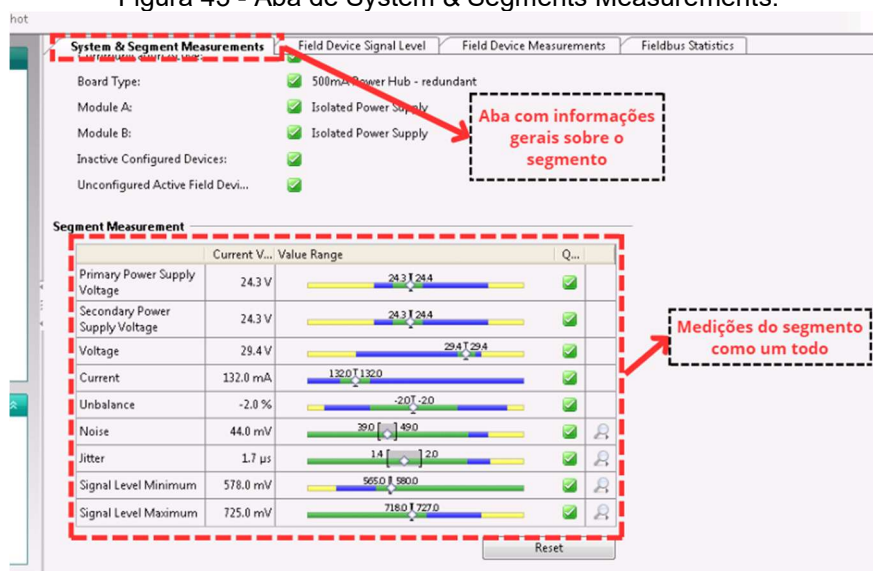
Fonte: Própria.

Após a seleção do FBM de interesse por meio da listagem de cartões do *Pactware*, segue-se para o processo de análise da estabilidade da comunicação com os equipamentos de campo. Esta análise é feita em duas principais etapas, sendo elas a análise manual dos indicativos oferecidos pelo *software* (sendo possível obter níveis de detalhes mais elevados) seguido da geração de documento

de certificação via *Pactware* por meio de comissionamento (em caso de necessidade de ajuste do sinal de comunicação dos instrumentos) ou *snapshot* (caso não exista a situação anteriormente citada).

Durante análise manual, foram avaliadas as informações das medições do segmento como um todo, os níveis dos sinais de comunicação de cada instrumento, a quantidade de entradas na *live list*, a quantidade de *tokens* perdidos na comunicação de cada instrumento, e estatísticas de rede (análise da quantidade de pacotes com erro). Para a visualização das medições do segmento como um todo, utiliza-se a aba de *System & Segment Measurements*, indicada na Figura 43.

Figura 43 - Aba de System & Segments Measurements.

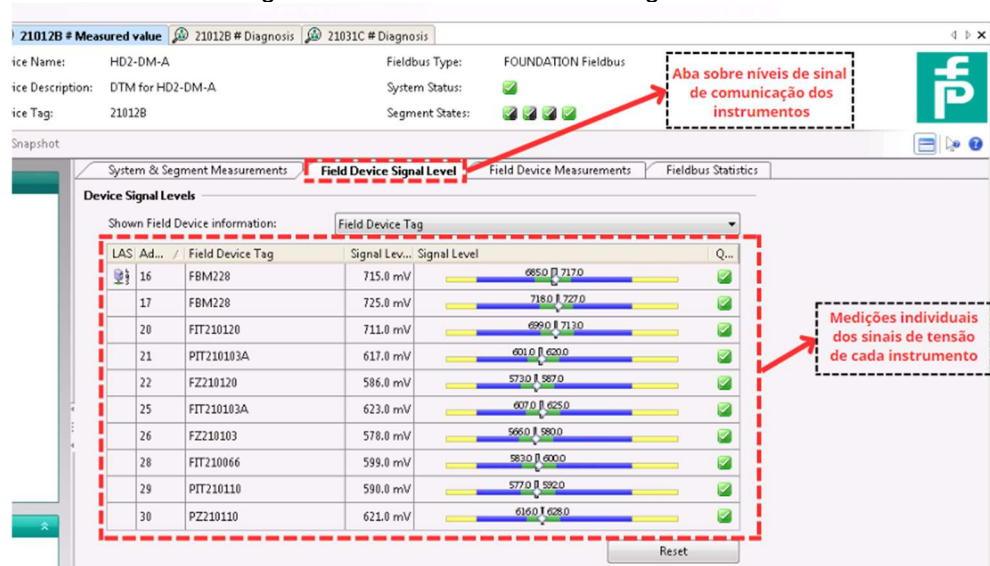


Fonte: Própria.

Os indicadores de *Primary Power Supply Voltage* e *Secondary Power Supply Voltage* se referem aos níveis de tensão medidos em *baseplate* das fontes redundantes, assim como para a fonte de alimentação do sistema do segmento FF escolhido para análise (sendo o último indicativo citado). *Current* se refere à corrente de operação atual no segmento. *Noise* indica o nível de ruído. *Jitter* indicado o atraso temporal da emissão do sinal de comunicação. *Signal Level Minimum* e *Maximum* representam, respectivamente, o nível de sinal de comunicação mais baixo e mais alto obtido dentre os instrumentos do segmento escolhido. Todos os indicativos possuem referências configuradas para que seja possível entender, por meio das cores verde, azul e amarelo, a qualidade da grandeza observada, sendo, respectivamente, excelente, bom e fora de especificação.

O próximo passo consiste na visualização das informações oferecidas na aba *Field Device Signal Level*, selecionando o setor indicado na Figura 44, exibindo o sinal de comunicação de cada instrumento individualmente. Nesta aba, é feita a análise, por meio dos indicativos de valores e cores, se os sinais de comunicação estão em margens excelentes, boas ou fora de especificação, também observando os retângulos de variação para entender se existe oscilação entre os valores observados momentaneamente.

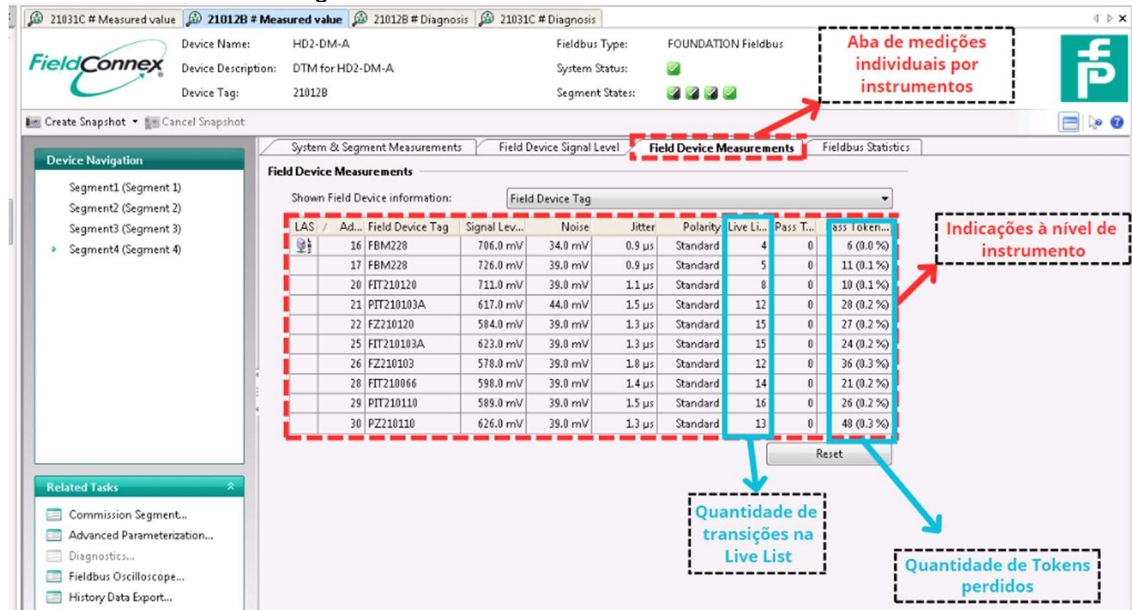
Figura 44 - Aba de Field Device Signal Level.



Fonte: Própria.

Na aba de *Field Device Measurements*, são analisadas as transições em *live list* dos instrumentos, mostrando como complemento o percentual de *tokens* perdidos durante a tentativa de comunicação dentro de um espaço predefinido de tempo. Agregando aos dados de *Jitter* e *Ruído* geral do segmento vistos em “*System & Segment Measurements*”, também são exibidas informações sobre os mesmos parâmetros nível de instrumento, tornando possível, em muitos casos, o entendimento da origem do problema. A Figura 45 destaca a aba citada anteriormente.

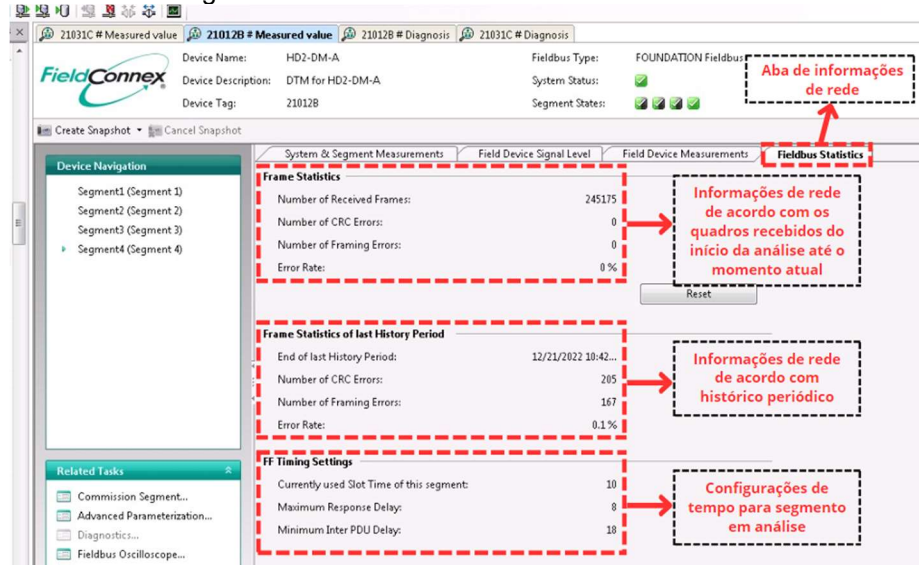
Figura 45 - Aba de Field Device Measurements.



Fonte: Própria.

Em última aba encontra-se a “*Fieldbus Statistics*” na qual é possível analisar dados sobre a estabilidade de comunicação e valores de perda de pacote de dados (Figura 46). Esta aba auxilia na definição se o problema, de fato, está ocorrendo nos elementos e configurações de rede, ou se a investigação deve prosseguir para análise individual dos instrumentos.

Figura 46 - Aba de estatísticas da rede Fieldbus.

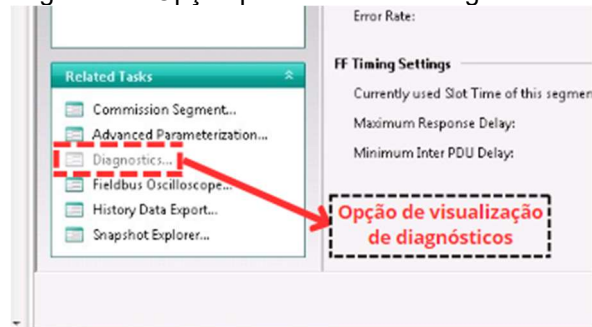


Fonte: Própria.

Após o recolhimento de informações por todas as abas anteriormente citadas, busca-se o conhecimento sobre a periodicidade dos erros encontrados, como

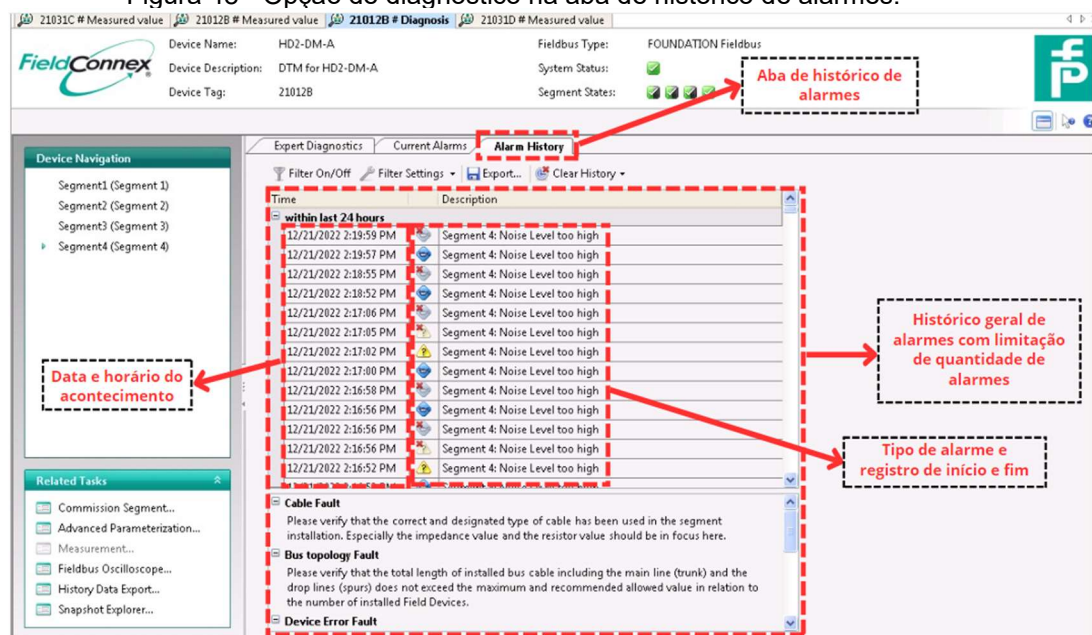
mostrado na Figura 48. Essa informação possibilita o entendimento sobre a recorrência ou se o problema já foi sanado. Para que isto seja possível, utiliza-se da opção de “*Diagnostics*”, seguindo seleção da Figura 47.

Figura 47 - Opção para análise de diagnósticos.



Fonte: própria.

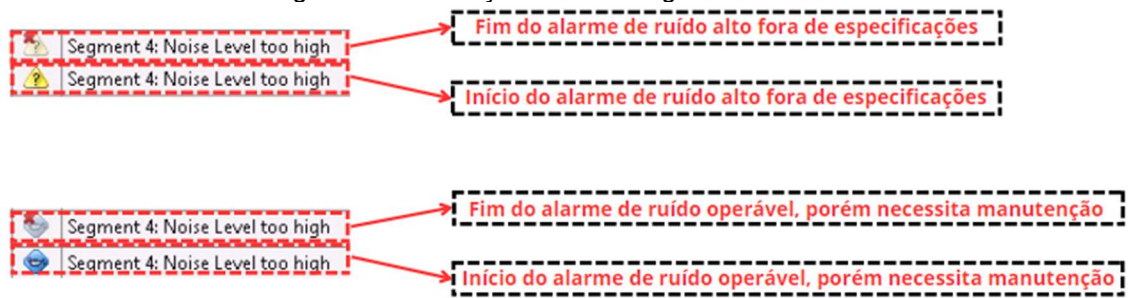
Figura 48 - Opção de diagnóstico na aba de histórico de alarmes.



Fonte: Própria.

Sempre que um novo alarme surge, o ícone irá possuir cor em alto contraste, sendo antagônico à simbologia do fim do alarme, em que o ícone passa a ser marcado por forte transparência e baixo contraste. Cada símbolo indica uma intensidade do problema, sendo o dosador de óleo a marcação de “necessita de manutenção” e o símbolo de alerta com interrogação “fora de especificação”. A simbologia pode ser observada na Figura 49.

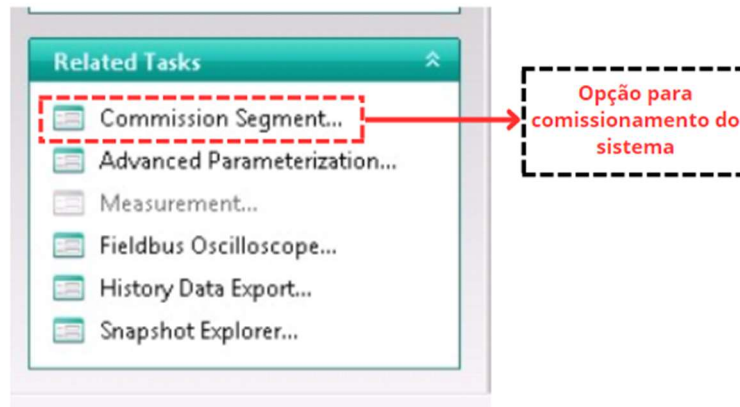
Figura 49 - Descrição de simbologia de alarmes.



Fonte: Própria.

Finalizando a análise manual de indicativos e parâmetros, executa-se o comissionamento ou o *snapshot* da atual situação do segmento para obtenção da documentação oficial *Pepperl+Fuchs* de aprovação ou reprovação. É importante reiterar que a aprovação de teste dinâmico não pode ser realizada sem passar por ambas as análises, manuais e de comissionamento ou *snapshot*, pois, sem a primeira opção de análise, é possível a certificação incorreta automática, por falsa aprovação gerada em momento de estabilidade de um segmento intermitente. Para que seja possível comissionar, utiliza-se a opção exibida na Figura 50.

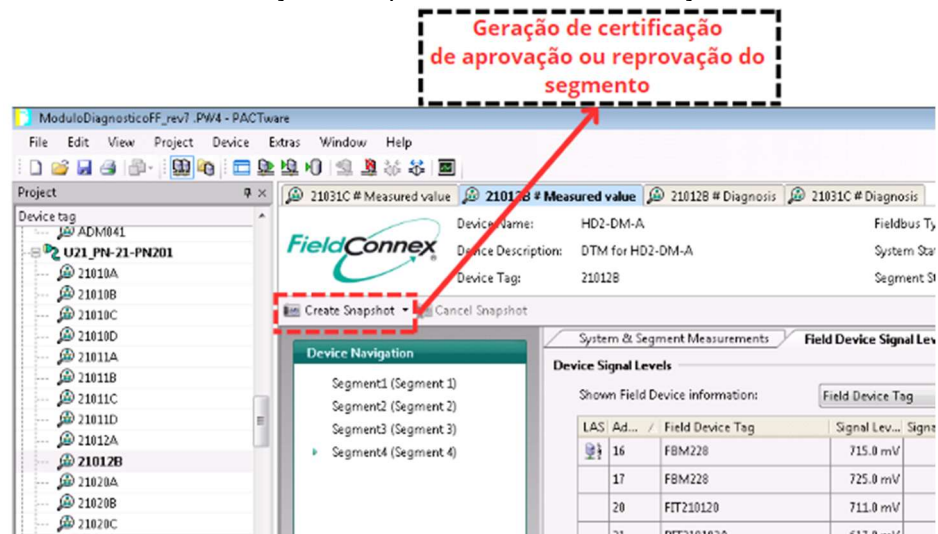
Figura 50 - Opção de comissionamento com opção de reajuste de níveis dos sinais de comunicação dos instrumentos.



Fonte: Própria.

Caso o sistema não tenha apresentado qualquer parâmetro incorreto, considerando os níveis de sinal de comunicação de cada instrumento individualmente, o documento de certificação pode ser gerado pela utilização de *Snapshot*, utilizando da função representada na Figura 51.

Figura 51 - Opção para geração de documento de aprovação ou reprovação de segmento, sem alterações nos parâmetros de comunicação.



Fonte: Própria.

Independente da opção escolhida para gerar documentação *Pepperl+Fuchs*, durante o processo, existe a possibilidade de incluir as medições de osciloscópio individual de cada instrumento conectado. É possível observar alterações nos sinais por meio de picos e dinâmica anômala, agregando diagnóstico apurado em relação a possíveis problemas na rede por más práticas de instalação.

4. RESULTADOS

Realizando a etapa de medição de integridade de cabo (medição de isolamento), apenas para os segmentos críticos, separando as medições em dois trechos, sendo eles CCL para Emenda Leste e Emenda Oeste para Campo, foram geradas as seguintes tabelas:

Tabela 5 - Medições de isolamento obtidas pela etapa de Integridade de Cabo referente ao trecho CCL - Emenda Leste.

Resistência de Isolamento (GΩ/km) – Trecho CCL – Emenda LESTE							
Tag	Distância(km)	(+)(-)	(+)Shield	(-)Shield	(+)Terra	(-)Terra	Shield e Terra
H1 - 0008	0,25 (Estimada)	> 22	15,6	14	> 22	> 22	1,5
H1 - 0009	0,25 (Estimada)	> 22	21,6	20,8	> 22	> 22	3,1
H1 - 0010	0,25 (Estimada)	> 22	22	> 22	> 22	> 22	2,7
H1 - 0011	0,25 (Estimada)	> 22	16,1	> 22	> 22	> 22	2,7
H1 - 0013	0,25 (Estimada)	> 22	> 22	> 22	> 22	> 22	2,6
H1 - 0021	0,25 (Estimada)	> 22	> 22	> 22	> 22	> 22	2,6
H1 - 0024	0,25 (Estimada)	> 22	> 22	> 22	> 22	20,2	2,5
H1 - 0102	0,25 (Estimada)	> 22	> 22	> 22	> 22	> 22	2,5
H1 - 0103	0,25 (Estimada)	> 22	> 22	> 22	> 22	> 22	3,8
H1 - 0104	0,25 (Estimada)	> 22	> 22	> 22	> 22	> 22	4,2
H1 - 0109	0,25 (Estimada)	> 22	> 22	> 22	> 22	> 22	4,2
H1 - 0140	0,25 (Estimada)	> 22	16,5	> 22	> 22	> 22	3,4
H1 - 0141	0,25 (Estimada)	> 22	20,5	13,1	> 22	> 22	2,3
H1 - 0142	0,25 (Estimada)	> 22	16,4	16,5	> 22	17,24	3,07
H1 - 0143	0,25 (Estimada)	> 22	> 22	> 22	> 22	> 22	3,5
H1 - 0144	0,25 (Estimada)	> 22	16,1	> 22	> 22	> 22	3,3
H1 - 0155	0,25 (Estimada)	> 22	19,5	20,1	> 22	> 22	3,3

Fonte: Própria.

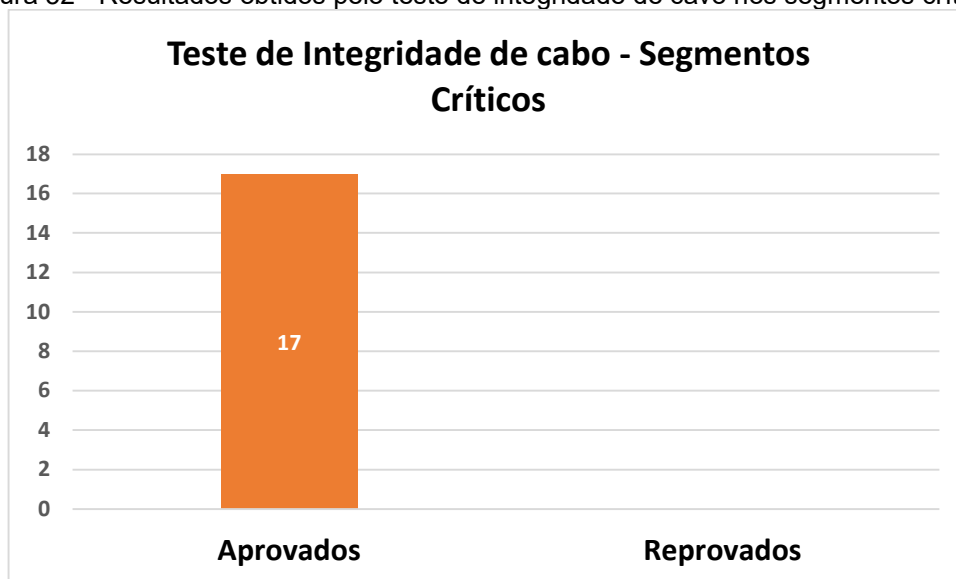
Tabela 6 - Medições de isolamento obtidas pela etapa de Integridade de Cabo referente ao trecho Emenda Oeste – Campo. *Segmentos que não possuem cabeamento Emenda Oeste – Campo.

Resistência de Isolamento (GΩ/km) - Trecho Emenda OESTE - Campo							
Tag	Distância(km)	(+)(-)	(+)Shield	(-)Shield	(+)Terra	(-)Terra	Shield e Terra
H1 - 0008A	0,095	24,5	19,2	29,2	30,7	36,9	13,0
H1 - 0009A	0,081	> 67,9	> 67,9	> 67,9	> 67,9	> 67,9	23,9
H1 - 0010A	0,120	15,0	14,6	16,0	12,5	12,5	9,0
H1 - 0011A*	-	-	-	-	-	-	-
H1 - 0013A	0,150	> 36,6	> 36,6	> 36,6	> 36,6	27,1	5,7
H1 - 0021A	0,162	>34,3	29,8	27,7	19,0	16,6	3,5
H1 - 0024A	0,159	>34,5	19,3	23,5	23,6	24,0	3,8
H1 - 0102A	0,157	19,2	17,5	21,4	19,3	23,5	3,4
H1 - 0103A*	-	-	-	-	-	-	-
H1 - 0104A*	-	-	-	-	-	-	-
H1 - 0109A*	-	-	-	-	-	-	-
H1 - 0140A	0,206	> 26,6	> 26,6	> 26,6	> 26,6	> 26,6	1,9
H1 - 0141A	0,164	> 33,5	> 33,5	> 33,5	> 33,5	> 33,5	3,7
H1 - 0142A	0,192	> 28,6	> 28,6	> 28,6	> 28,6	> 28,6	0,1
H1 - 0143A	0,18	> 30,5	> 30,5	> 30,5	> 30,5	> 30,5	3,6
H1 - 0144A	0,183	> 30,0	> 30,0	> 30,0	22,4	20,6	3,4
H1 - 0155A	0,193	> 28,5	> 28,5	> 28,5	> 28,5	> 28,5	0,1

Fonte: Própria.

A Figura 49 expressa os resultados das Tabelas 6 e 7:

Figura 52 - Resultados obtidos pelo teste de integridade de cabo nos segmentos críticos.



Fonte: Própria

Como segundo passo, realizaram-se os Testes Estáticos em todos os segmentos envolvidos nas emendas. Os valores obtidos são de resistência e capacitância. Pela elevada quantidade de segmentos e medições, as tabelas a seguir mostram apenas os segmentos que apresentaram valores fora de referência. Os resultados são obtidos graficamente na Figura 53.

Tabela 7 - Segmentos reprovados em teste estático. Medições de Resistência.

Teste Estático – Segmentos Reprovados – Valores de Resistência						
Segmento	(+) e (-)	(+) e Shield	(-) e Shield	(+) e Terra	(-) e Terra	Shield e Terra
	(kΩ)	(MΩ)	(MΩ)	(MΩ)	(MΩ)	(MΩ)
H1 - 0004	24,4	∞	∞	∞	∞	0,11
H1 - 0010	28,4	∞	∞	∞	∞	0,11
H1 - 0033	38,1	∞	∞	∞	∞	0,11
H1 - 0101	35,4	∞	∞	∞	∞	0,11
H1 - 0119	32,2	∞	∞	∞	∞	0,25
H1 - 0135	24,5	∞	∞	∞	∞	0,35
H1 - 0137	32	∞	∞	∞	∞	0,11
H1 - 0142	22	∞	∞	∞	∞	0,11
H1 - 0152	60,1	∞	∞	∞	∞	0,11
H1 - 0272	28,6	0,3	∞	∞	∞	∞
H1 - 0280	21,8	∞	∞	∞	∞	0,11
H1 - 0282	27	∞	∞	∞	∞	0,11
H1 - 0104	37,4	∞	∞	∞	∞	0,11
H1 - 0109	54,7	∞	∞	∞	∞	0,11
H1 - 0268	28,2	∞	∞	∞	∞	1,12
Valores Referência	> 16* kΩ	> 20 MΩ	> 20 MΩ	> 20 MΩ	> 20 MΩ	> 20 MΩ

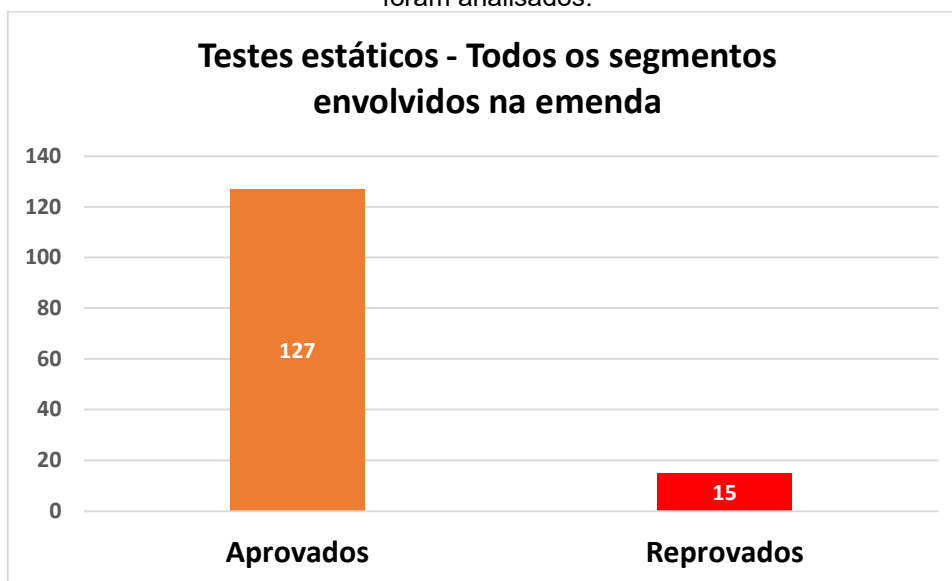
Fonte: Própria.

Tabela 8 - Valores de capacitância dos segmentos reprovados em teste estático. Todas as capacitâncias estão em valores aceitáveis de acordo com as referências.

Teste Estático – Segmentos Reprovados – Valores de Capacitância						
Segmento	(+) e (-)	(+) e Shield	(-) e Shield	(+) e Terra	(-) e Terra	Shield e Terra
	(μ F)	(nF)	(nF)	(nF)	(nF)	(nF)
H1 - 0004	1,37	131,2	130,9	64,5	64,4	124,3
H1 - 0010	0,94	161,1	163,4	161,6	163,7	126,7
H1 - 0033	0,95	77,8	77,8	40,7	40,7	83,1
H1 - 0101	0,98	139,7	140	59	59	100,8
H1 - 0119	1,4	160	160	90	90	190
H1 - 0135	1,4	156	156,2	75,8	75,8	144,6
H1 - 0137	1,41	157,6	157,7	81,7	81,8	166,3
H1 - 0142	1,38	170,5	170,6	78	78,1	141,5
H1 - 0152	0,81	170	171	171	172	151
H1 - 0272	1,38	108,1	108,1	51,8	51,9	97,1
H1 - 0280	1,5	125,4	125,4	60,8	60,9	115,6
H1 - 0282	1,48	149,1	149,3	68,8	68,8	124,9
H1 - 0104	1,01	117,1	117,1	112,1	117,2	190
H1 - 0109	0,52	90	90	50	50	110
H1 - 0268	1,49	97	97	49,1	49,2	96,6
Valores referencia	< 2,2 μ F	< 300 nF	< 300 nF	< 300 nF	< 300 nF	< 300 nF

Fonte: Própria.

Figura 53 - Resultados obtidos pelos testes estáticos. Todos os segmentos envolvidos na emenda foram analisados.



Fonte: Própria.

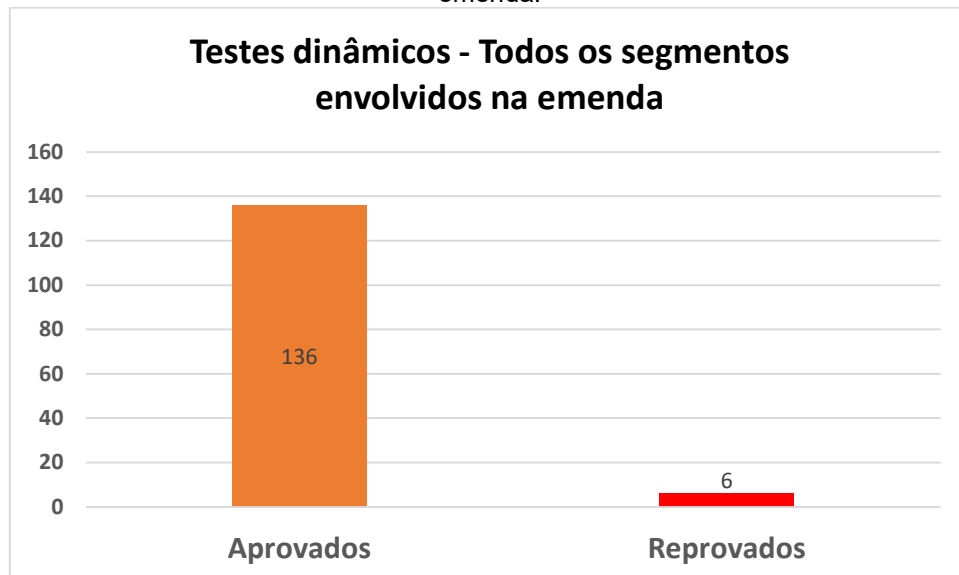
Como terceiro passo, realizam-se os testes dinâmicos, com ênfase na análise de indicadores da rede. Gera-se a Tabela 10 que indica os segmentos com falhas encontradas em *jitter* ou ruído (nenhum dos reprovados remanescentes no teste dinâmico foi reprovado no teste estático). A Figura 54 representa graficamente os resultados obtidos.

Tabela 9 - Segmentos reprovados no Teste Dinâmico.

Teste Dinâmico - Segmentos Reprovados		
Segmento	Jitter	Ruído
	(μ s)	(mV)
H1 - 0024	0,8	54
H1 - 0099	2,9	29
H1 - 0111	2,6	1,6
H1 - 0286	2,6	49
H1 - 7000	2,8	29
H1 - 7002	1,5	54
Valores referencia	< 2,4 μ s	< 50mV

Fonte: Própria.

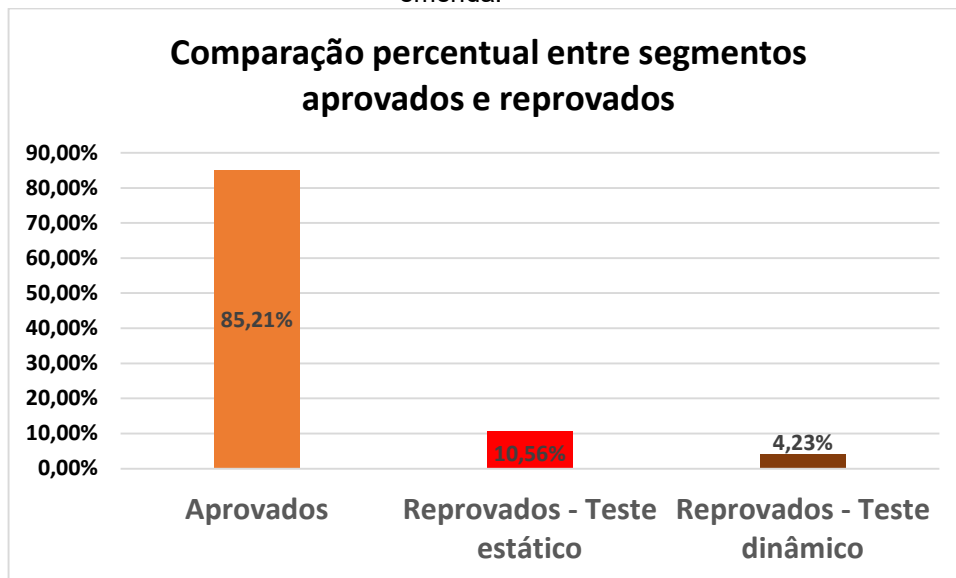
Figura 54 - Resultados obtidos pela realização dos testes dinâmicos em todos os segmentos da emenda.



Fonte: Própria.

Considerando o segmento reprovado quando qualquer um dos testes for obtido como fora das especificações, a Figura 55 expressa o percentual de segmentos reprovados e aprovados em relação a todos os segmentos da emenda.

Figura 55 - Comparação percentual entre segmentos aprovados e reprovados considerando toda a emenda.



Fonte: Própria.

Observa-se que apenas 14,79% dos segmentos apresentaram algum tipo de falha causadora de reprovação, das quais 10,56% foram detectadas via teste estático, e 4,23% foram detectadas por teste dinâmico. Sendo assim, 121 (cento e vinte e um) segmentos conseguiram se comunicar corretamente e de forma estável.

5. CONCLUSÕES

Obtidos os valores de integridade do cabo, testes estáticos e dinâmicos, torna-se possível analisar a qualidade da rede após implementação de emendas em cabos troncos. A importância da realização de cada passo é visualizada quando se compara a reprovação dos segmentos pelas diferentes etapas do processo. Alguns segmentos reprovados durante teste estático nada apresentam quando realizados os testes de integridade de cabo (nenhum segmento foi reprovado neste teste), implicando diretamente no reconhecimento de inconsistência das grandezas elétricas nos dispositivos eletrônicos conectados para realização do teste estático (CFFs e instrumentos).

Algumas falhas também são apenas percebidas pela realização do teste dinâmico. Torna-se possível analisar que a distorção dos sinais de comunicação, apresentados por níveis elevados de *jitter* e ruído, nem sempre são relacionadas a fortes alterações dos parâmetros elétricos medidos no sistema, visto que nenhum dos segmentos reprovados no teste dinâmico possuiu reprovação no teste estático.

Como principal motivação, também é evidenciado o funcionamento da aplicação de emendas como medida de reparo a curto prazo para sistemas que utilizam de FF como principal protocolo de comunicação. A correção tornou possível a retomada da operação de forma mais rápida que o método tradicional de substituição geral de cabos, apresentando uma economia aproximada de 60% no valor do serviço.

Diante das conclusões citadas, é notória a necessidade da investigação sobre quais os motivos dos resultados negativos obtidos por ambos os testes, buscando entender se existem padrões nas alterações das impedâncias e na qualidade da comunicação. Entender os valores fora de referência gera informações que facilitam a obtenção de êxito pela equipe de manutenção em problemas posteriores.

REFERÊNCIAS

1. DATHEIN, R. Inovações e Revoluções Industriais: uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos XVIII e XIX. **Publicações DECON Textos Didáticos 2.**, 2003.
2. SILVEIRA, L.; LIMA, W. Q. Um breve histórico conceitual da Automação Industrial e Redes para Automação Industrial. **Redes para Automação Industrial. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.**, 2003.
3. GOEKING, W. Da máquina a vapor aos softwares de automação. **Portal O setor elétrico**, 2010.
4. JESUS FILHO, F. L. D. Aplicabilidade do Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) no Processo Eletrolítico com Células de Mercúrio (SDCD) no Processo Eletrolítico com Células de Mercúrio., 2017.
5. CORDEIRO, J. A. F. Estudo dos principais protocolos de redes industriais utilizadas no Brasil: AS-I MODBUS e PROFIBUS, 2019.
6. BORGES, F. H.; DALCOL, P. R. Indústrias de Processo: Comparações e Caracterizações. **Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção 22.**, 2002.
7. STOUFFER, K.; FALCO, J.; KENT, K. Guide to supervisory control and data acquisition (SCADA) and industrial control systems security. **NIST Special Publication SP800-82**, 2006. p.800-82.
8. LANDRYOVA, L.; KULHANEK, J.; PRIKRYL, J. The Operator Roles in Industrial Automation: Process Automation Since Distributed Control Systems Got Virtualized. **2021 22nd. International Carpathian Control Conference (ICCC). IEEE.**, 2021.
9. Topologia de um SDCD. UFRN. [S.l.].
10. SEGOVIA, V. R.; THEORIN, A. History of Control History of PLC and DCS. **University of Lund**, 2012.
11. VERHAPPEN, I.; PEREIRA, A. **Foundation Fieldbus**. [S.l.]: [s.n.], 2008.
12. KUMAR, S.; DALAL, S.; DIXIT, V. The OSI model: Overview on the seven layers of computer networks. **International Journal of Computer Science and Information Technology Research**, p. 461-466, 2014.
13. VIEGAS, V.; PEREIRA, J. M. C. D. Foundation Fieldbus: From theory to practice. **International Journal of Computing**, 2000. 1-10.
14. MOTAMED, S. A.; ZIAEI, A. Foundation Fieldbus H1 physical layers diagnosis improvement. **AFRICON 2009**, 2009.
15. SEIXAS FILHO, C. Foundation Fieldbus. **Programação Concorrente em Ambiente Windows - Uma visão de Automação**, p. 1-42, 2003.
16. VIEGAS, V.; PEREIRA, J. M. C. D. Foundation Fieldbus: Exemplo de Aplicação. **Revista 'robótica'**, 2014.
17. HONG, S. H.; JANG, B. D. Time-Critical data transmission in the Foundation Fieldbus. **International Symposium on Industrial Electronics Proceedings. Vol 1. IEEE.**, 2001.

18. LIN, T.; AL, E. A Variable Priority Token-passing Fieldbus based on Quality of Service. **2007 IEEE International Conference on Integration Technology**, 2007.
19. PEPPERL+FUCHS. Pepperl+Fuchs Compact Power Hub. **Pepperl+Fuchs**. Disponível em: <https://www.pepperl-fuchs.com/global/en/classid_2815.htm>.
20. PEPPERL+FUCHS. Pepperl+Fuchs Fieldbarriers. **Pepperl+Fuchs**. Disponível em: <https://www.pepperl-fuchs.com/global/en/classid_439.htm>.
21. SILVA, A. P. S.; JÚNIOR, L. S. Aterramento de Instalações Industriais Eletroeletrônicas de Instrumentação e Redes de Campo. **X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação**.
22. O'NEILL, M. Pratical aspects of Fieldbus installation. **Measurement and Control 35.9**, 2002. 271-278.
23. ZAKI, M. S. M.; SYAZWAN, M. Foundation Fieldbus Interoperability Teste, System Development and Configuration-Foxboro. **Universiti Teknologi Petronas**, 2009.
24. CARVALHO, J. A. Avaliação do desempenho de redes PROFIBUS-DP suportada em técnicas de injeção de faltas, 2008.
25. CHARANTOLA, R. B. Estudo do impacto dos ensaios em cablagem aeronáutica na aeronavegabilidade, 2015.
26. ALAM, M. J. Physical Layer Fault Tolerance for Foundation Fieldbus Network, 2014.
27. DJERMANOVA, N. J.; KISS'OVSKI, J. G.; VATCHKOV, V. A. Portable Arduino-Based LCR-Meter. **Annual Journal of Electronics**, 2014. 170-173.
28. HENNECKE, A.; AL, E. Methods for Planning, Installation, Comissioning and Diagnosis of Fieldbus Installations. **PCIC Europe**, 2004.
29. DINIZ, F. B.; ZANNIN, P. H. T. Noise impact caused by electrical energy substations in the city of Curitiba, Brazil. **Science of the total environment 328.1-3**, 2004. 23-31.
30. MAHALIK, N. P. Fieldbus Technology: Industrial Network Standards for real-time distributed control. **Springer Science & Business Media**, 2013.
31. **Aplick Adesivos**. Disponível em: <<https://www.aplickadesivos.com.br/produtos/adesivos/etiqueta-acrilica-para-painel-eletrico-industrial>>. Acesso em: Agosto 2023.
32. CRISTIAN, P.; GRIGORE, S. Monitoring pH with Hart communication, Bucharest, Romania, 2017.
33. LUGLI, A. B.; SANTOS., M. M. D. Redes Industriais para Automação Industrial-AS-I, Profibus e Profinet. **Saraiva Educação SA**, 2010.
34. RIOS, B. M.; ALMEIDA, J. J.; ARAÚJO, G. A. D. Instalações Elétricas Industriais, 2016.
35. ORTUNHO, T. V.; EPITÁCIO, P. Práticas em instalações elétricas-PIEE1, 2015.
36. SCHMERSAL. Schmersal the DNA of Safety. Disponível em: <<https://www.schmersal.com.br/areas-classificadas-ex/caixa-de-juncao-ex-pex-cj>>.
37. FAW-7. Resistência de Isolação. Disponível em: <<https://faw7.com.br/artigos-tecnicos/resistencia-de-isolacao/>>.

38. CONDUFERES. Conduferes. **Conduferes Cabos Especiais.** Disponível em:
<<https://conduferes.com.br/produto/fieldbus-100/>>.