

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO TRIÂNGULO MINEIRO – CAMPUS PARACATU**

MARCOS VINICIUS DA SILVA

**ESTUDO DE CASO: ANÁLISE E MITIGAÇÃO DOS EFEITOS
CAUSADOS POR FALHAS EM CÉLULAS DE CARGAS EM
BALANÇAS INTEGRADORAS**

PARACATU - MG

2025

MARCOS VINICIUS DA SILVA

**ESTUDO DE CASO: ANÁLISE E MITIGAÇÃO DOS EFEITOS
CAUSADOS POR FALHAS EM CÉLULAS DE CARGAS EM
BALANÇAS INTEGRADORAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro, Campus Paracatu, como parte dos requisitos para conclusão do Curso de Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Silas Martins Sousa

PARACATU - MG

2025

TERMO DE APROVAÇÃO

MARCOS VINICIUS DA SILVA

ESTUDO DE CASO: ANÁLISE E MITIGAÇÃO DOS EFEITOS CAUSADOS POR FALHAS EM CÉLULAS DE CARGAS EM BALANÇAS INTEGRADORAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro, Campus Paracatu, como requisito parcial para conclusão do Curso de Engenharia Elétrica.

Aprovado em 11 de fevereiro de 2025.

Prof. Me Silas Martins Sousa (Prof. Orientador)

Prof. Me. Getúlio Albernaz Lobo

Prof. Me. Klériston Silva Santos

PARACATU - MG

2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, primeiramente a Deus, por me conceder sabedoria, perseverança e graça ao longo desta jornada.

À minha esposa, Diana, pelo incentivo constante, pelo apoio incondicional e por sempre acreditar na minha capacidade.

Aos profissionais do IFTM, cuja dedicação e suporte foram fundamentais para minha formação e crescimento profissional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde e força de vontade para superar todas as adversidades encontradas durante essa trajetória.

À minha esposa pelo apoio e incentivo que serviram de alicerce para a conclusão dessa jornada.

Ao meu orientador Prof. Silas Martins Sousa pelo apoio, paciência e compreensão ao longo da elaboração do meu trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

Correias transportadoras são amplamente utilizadas em sistemas produtivos industriais, sobretudo no setor de mineração. Essas correias possuem balanças integradoras para medir a quantidade de material transportado, as quais possuem células de carga para medir o peso instantâneo. Com esse peso e também a informação de velocidade, é possível mensurar a taxa de material. Este trabalho de conclusão de curso analisou os efeitos da quebra de uma célula de carga em uma balança integradora industrial, visando propor estratégias para mitigar e prevenir falhas, minimizando impactos na produção. O estudo de caso, realizado em ambiente industrial, investigou as causas da quebra e coletou dados sobre medidas de mitigação e prevenção. Dentre as estratégias, destacou-se a implementação de um sensor virtual (balança virtual), que utiliza informações de correias transportadoras interligadas para obter parâmetros comportamentais e funcionais da balança real, auxiliando na detecção de anomalias. A análise quantitativa e qualitativa dos dados coletados comprovou a eficácia das medidas de mitigação. Concluiu-se que a concentração de umidade no local foi um fator crucial na quebra da célula de carga. Recomendou-se a instalação de um sensor de umidade para monitorar as condições ambientais e prevenir falhas futuras, garantindo a confiabilidade do sistema e a eficiência da produção. Além disso, o sensor virtual demonstrou-se eficiente na detecção de anomalias e na identificação da falha na célula de carga da balança integradora. A importância da confiabilidade desses sistemas pode ser exemplificada pelo impacto econômico gerado por falhas na produção. Dados apontam que em 2023, a Kinross Paracatu produziu cerca de 588 mil onças de ouro ao longo do ano, o que equivale a uma produção diária de aproximadamente 1.610 onças, ou cerca de 50 quilos de ouro por dia. Considerando a falha ocorrida, que gerou uma paralisação de 20 horas e 44 minutos na produção, e o valor médio de US\$ 1.935 por onça de ouro, estima-se uma perda de aproximadamente 2,6 milhões de dólares. Esse cenário reforça a necessidade de aprimoramento dos sistemas de monitoramento e mitigação de falhas para evitar prejuízos causados na indústria mineral.

Palavras-chave: Célula de carga; Sensor virtual; Balança integradora, Correia transportadora, Sensor de umidade.

ABSTRACT

Conveyor belts are widely used in industrial production systems, especially in the mining sector. These belts have integrated scales to measure the amount of material transported, as well as load cells to measure the instantaneous weight. With this weight and also the speed information, it is possible to measure the material rate. This final course work analyzed the effects of the breakage of a load cell in an integrated industrial scale, planning strategies to mitigate and prevent failures, minimizing impacts on production. The case study, carried out in an industrial environment, investigated the causes of the breakage and collected data on mitigation and prevention measures. Among the strategies, the implementation of a virtual sensor (virtual scale) stands out, which uses information from interconnected conveyor belts to obtain behavioral and functional parameters of the real scale, aiding in the detection of anomalies. The quantitative and qualitative analysis of the data found proved the effectiveness of the mitigation measures. It was concluded that the concentration of humidity at the site was a crucial factor in the breakage of the cell load. It was recommended that a humidity sensor be installed to monitor environmental conditions and prevent future failures, ensuring system reliability and production efficiency. In addition, the virtual sensor proved to be efficient in detecting anomalies and identifying failures in the integrated scale load cell. The importance of the reliability of these systems can be exemplified by the economic impact generated by production failures. The data indicate that in 2023, Kinross Paracatu produced approximately 588 thousand ounces of gold throughout the year, which is equivalent to a daily production of approximately 1,610 ounces, or approximately 50 kilograms of gold per day. Considering the failure that occurred, which caused a 20-hour and 44-minute production stoppage, and the average value of US\$ 1,935 per ounce of gold, a loss of approximately 2.6 million dollars is estimated. This scenario reinforces the need to improve monitoring and failure mitigation systems to avoid losses caused in the mining industry.

Keywords: Load cell; Virtual sensors; Integrated scale, Conveyor belt, Humidity sensor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Correia transportadora.	8
Figura 2 - Layout físico da balança integradora.	9
Figura 3 - Princípio de funcionamento da balança integradora.	10
Figura 4 - Disposição geral do quadro de pesagem.	11
Figura 5 - Travas da célula de carga.	11
Figura 6 - Célula de carga modelo: S40A.	13
Figura 7 – Relação entre sensibilidade (mV/V) e carga (kg/m).	13
Figura 8- Peso de padrão calibração embarcado.	14
Figura 9 - Sensor de velocidade usado na balança integradora.	15
Figura 10 - Disposição geral da balança.	16
Figura 11 - Princípio de funcionamento da balança integradora.	17
Figura 12 - Ponte de Wheatstone e sua relação com a segunda Lei de Ohm.	18
Figura 13 - Ponte de Wheatstone.	19
Figura 14 - Célula de carga tipo Beam.	20
Figura 15 - Célula de carga tipo Single Point.	20
Figura 16 - Célula de carga tipo Tração.	21
Figura 17 - Célula de carga tipo Compressão.	21
Figura 18 - Indicação de classe de precisão.	22
Figura 19 - Integração sensor virtual.	27
Figura 20 - Célula de carga danificada.	30
Figura 21 - Variação de carga durante atividade mecânica.	31
Figura 22 - Equipamento utilizado pela mecânica para troca dos roletes.	32
Figura 23 - Nivelamento do quadro de pesagem.	33
Figura 24 - Sobrecarga na correia e a velocidade dos alimentadores.	34
Figura 25 - Análise laboratorial da célula de carga.	35
Figura 26 - Comparação da robustez entre a célula antiga e a atual.	36
Figura 27 - Alarme de sensor patinando.	37
Figura 28 - Parâmetros (UTILIZATION LC (%) e LOADCELL(mV/V)).	38
Figura 29 - Testador de célula de carga.	38
Figura 30 - Balança real X Balança virtual.	39
Figura 31 - Influência do sensor patinando sobre a carga (kg/m).	41

TABELAS

Tabela 1 - Dados das células de carga.	40
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
1.2 Problema	6
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo geral.....	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4 Hipótese	6
1.5 Justificativa	7
1.6 Delimitação.....	7
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	8
2.1 Transportador de Minério	8
2.2 Balanças Integradoras	9
2.2.1 Descrições da Balança.....	10
2.2.2 Princípios de Funcionamento	16
2.2.3 Ponte de Wheatstone	17
2.2.4 Principais Tipos de Células de Carga	19
2.2.5 Precisão	21
2.3 Considerações importantes para Células de Carga	22
2.3.1 Tipos de Falhas nas Células de Carga	22
2.3.2 Impactos das Falhas nas Operações Industriais.....	23
2.4 Manutenção Preditiva e Preventiva em Balanças Integradoras	23
2.4.1 Manutenção Preventiva.....	23
2.4.2 Manutenção Preditiva.....	24
2.5 Sensor Virtual no Contexto das Células de Carga	25
2.6 Tecnologias de Diagnóstico e Monitoramento.....	28
2.7 Soluções de Mitigação	28
3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	29
3.1 Metodologia.....	29
3.1.1 Resultados esperados.....	29
3.2 Estudo de caso.....	29
3.3 Relato da falha	30

3.4 Análise dos dados	33
3.5 Análise gráfica.....	33
3.6 Análise laboratorial.....	35
3.7 Soluções implementadas	36
3.7.1 Substituição da célula de carga.....	36
3.7.2 Melhoria na lógica de controle.....	36
3.7.3 Aquisição de equipamentos de testes preventivos.....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1 Aumento da confiabilidade	39
4.2 Fator econômico.....	41
4.3 Soluções propostas.....	42
5 CONCLUSÕES	43
5.1 Sugestões de trabalhos futuros.....	44
6 REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

As balanças integradoras desempenham um papel crucial no setor da mineração, sendo muito utilizadas para o controle de pesagem de minério em correias transportadoras, permitindo o controle exato da produção. Balanças que operam em regime contínuo, dependem diretamente da precisão e da confiabilidade das células de carga, componentes responsáveis pela medição da força exercida pelo peso do material. Portanto, falhas nas células de carga podem comprometer significativamente o desempenho de uma balança integradora, resultando em medições imprecisas, interrupções no processo de produção e consequentemente prejuízos econômicos. Segundo Fedorko (2021), as falhas em transportadores de correia podem gerar impactos significativos na operação industrial, afetando a produtividade, os custos de manutenção e a segurança dos trabalhadores.

Nessa conjuntura, a identificação precoce, análise e criação de meios de mitigação para esses problemas tornam-se imprescindíveis para garantir a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de pesagem.

Sendo assim, este estudo de caso tem como objetivo principal analisar as causas, efeitos, estratégias de mitigação e prevenção de falhas relacionadas à quebra de células de carga, baseado em um caso real, ocorrido em uma empresa mineradora. Para isso, serão abordados aspectos técnicos relacionados às possíveis causas da falha, os métodos de detecção disponíveis e as soluções práticas aplicáveis à manutenção preditiva e corretiva. Assim, este trabalho busca contribuir para a melhoria do desempenho dos sistemas de pesagem industrial, promovendo maior precisão, eficiência operacional e redução de custos associados a falhas.

Com o intuito de alicerçar o desenvolvimento dessa pesquisa, serão feitos levantamentos bibliográficos, sobre os temas relevantes, principalmente sobre o tema sensores virtuais, que é fator preponderante nessa pesquisa.

1.2 Problema

As células de carga são suscetíveis a falhas, sendo a quebra uma das mais críticas. Este estudo visa investigar as causas da quebra de célula de carga em questão e analisar as estratégias de mitigação implementadas.

O problema ocorreu devido à quebra de uma das quatro células de carga que compõem a balança integradora que mede a taxa de alimentação da planta. Isso causou a parada abrupta do transportador principal, resultando no entupimento dos chutes (elementos de transferência) de minério que alimentam a correia e no acúmulo de material sobre a mesma. O incidente impossibilitou a repartida do transportador de correia devido à sobrecarga.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Analisar as causas e consequências da quebra da célula de carga, bem como os métodos de mitigação e manutenção implementados, e os efeitos observados após a implementação das tratativas.

1.3.2 Objetivos específicos

1.4 Hipótese

A falha das células de carga em balanças integradoras está diretamente relacionada a fatores operacionais, ambientais e/ou de instalação inadequada, que podem ser mitigados com manutenção preditiva e ações corretivas específicas.

Esse problema será resolvido com o desenvolvimento de lógicas de intertravamento que considerem os dados dos transportadores de correia que alimentam o transportador principal, integrando-os ao modelo da balança virtual.

Além disso, a substituição da célula de carga atual por um modelo mais robusto garantirá maior confiabilidade e resistência à quebra.

1.5 Justificativa

Este estudo se justifica pela necessidade de compreender as falhas em células de carga e suas consequências, além de fortalecer as ferramentas e estratégias de aprimoramento do processo de medição de pesagem. Pois entende-se que as falhas em questão podem causar diversos tipos de impactos, tais como:

- **Econômicos:** Medições imprecisas podem levar a perdas financeiras significativas. Segundo Oliveira et al. (2020), a precisão nas medições é diretamente proporcional à eficiência do processo produtivo, influenciando a rentabilidade das empresas.
- **Ambientais:** A utilização inadequada de recursos devido a falhas em medições pode resultar em desperdício e impacto ambiental. A gestão adequada das medições contribui para a sustentabilidade, como destacado por Silva (2019), práticas de medição precisas são fundamentais para a conservação de recursos naturais.
- **Sociais e Éticos:** A imprecisão em medições pode comprometer a qualidade dos produtos, afetando a saúde e segurança dos consumidores. Estudos mostram que "a integridade dos processos de medição é vital para garantir produtos seguros e de qualidade" (PEREIRA, 2021).

1.6 Delimitação

Este estudo foi conduzido no setor industrial, com foco em uma empresa de mineração de ouro que utiliza balanças integradoras em seu processo. A pesquisa abrange um período de 16 meses, analisando falhas ocorridas em 2023 e 2024, considerando apenas aquelas com impactos mensuráveis, como perdas financeiras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

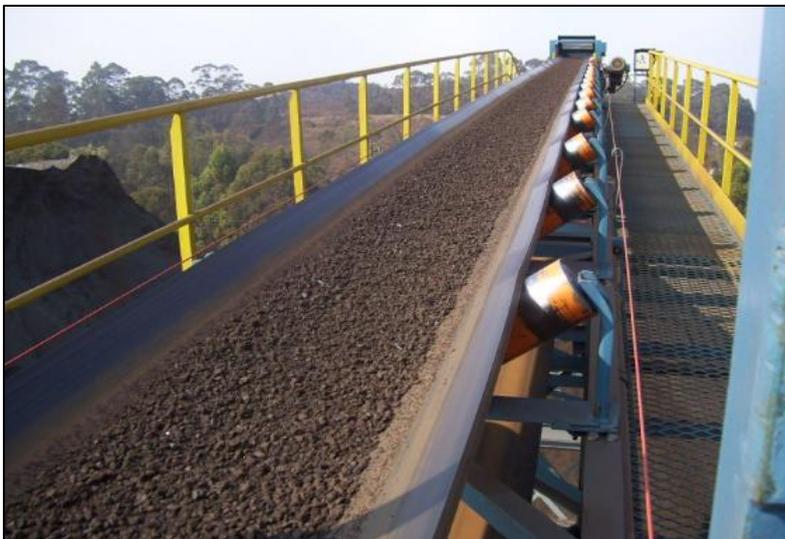
2.1 Transportador de Minério

O transportador de minério é um sistema utilizado para movimentar grandes volumes de minério de forma contínua, sendo amplamente empregado em ambientes de mineração. Esses sistemas são projetados para lidar com materiais pesados, abrasivos e em grande escala, sendo cruciais para a operação de minas e plantas industriais.

Segundo Chaves (2013), os transportadores de correia são os equipamentos de transporte mais importantes em termos de tonelagem movimentada, tornando o setor de mineração um dos maiores usuários desse tipo de equipamento.

O transportador de correia consiste em uma estrutura longitudinal, normalmente de metal que serve como base para os cavaletes, que sustentam os rolos, sobre os quais é apoiada a correia que geralmente é feita de borracha, como está representado na Figura 1.

Figura 1 - Correia transportadora.



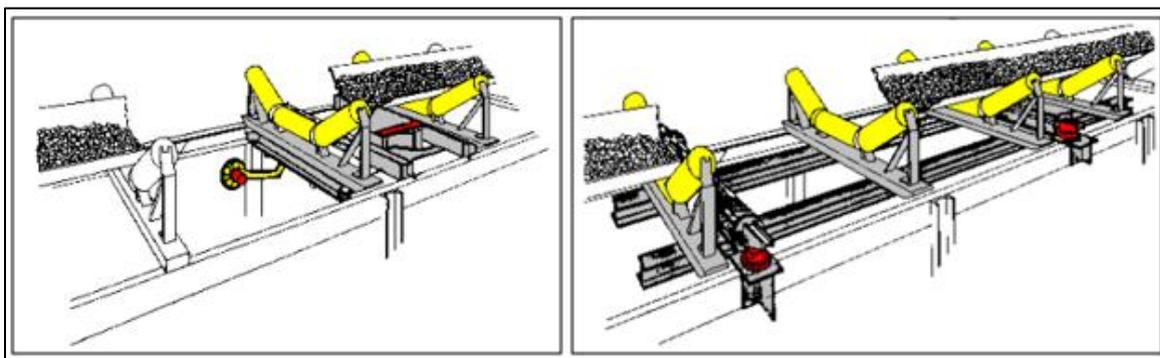
Fonte: (Própria autoria, 2024).

2.2 Balanças Integradoras

Balanças integradoras são usadas para totalizar o fluxo de material de um transportador, a fim de conhecer sua produção de minério em tonelada/hora. Seu funcionamento baseia-se na obtenção de duas variáveis: a velocidade do transportador e a carga sobre a correia, que são utilizadas para indicar a taxa em t/h.

O sensor de velocidade e as células de carga, destacadas em vermelho, são dois dos principais componentes de uma balança integradora, conforme ilustrado na Figura 2.

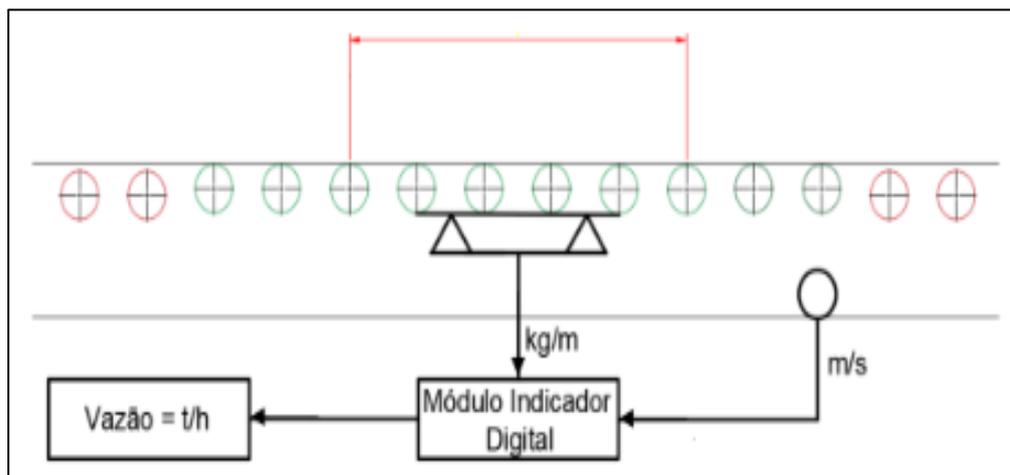
Figura 2 - Layout físico da balança integradora.



Fonte: (WBS, 2024).

As células de carga medem o peso do material na correia (kg) e um sensor de alta precisão adquire a velocidade da correia (m/s), onde o produto destas duas variáveis é a vazão instantânea (kg/h). A balança irá informar a vazão instantânea e o valor totalizado durante o período de trabalho. O diagrama de funcionamento da balança integradora pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Princípio de funcionamento da balança integradora.



Fonte: (WBS, 2024).

A instalação mecânica é fundamental que seja feita de maneira correta, seguindo as orientações de nossa engenharia, que trabalha baseada nas normas da OIML e NIST. Essas referências de instalação são resultados de anos de testes realizados por estes dois institutos nos mais diversos tipos de transportadores, que somado a experiência de nosso corpo de engenharia, garante um projeto correto que vai resultar em uma precisão que atenda a necessidade de cada instalação (WBS2, 2024).

A balança integradora objeto dessa pesquisa é fabricada pela empresa BRX e tem o código de modelo WBS 4 ZEUS.

2.2.1 Descrições da Balança

A balança integradora é projetada para medir continuamente o fluxo de material que é transportado por uma correia transportadora, não exercendo nenhum controle sobre a correia ou sobre o fluxo de material.

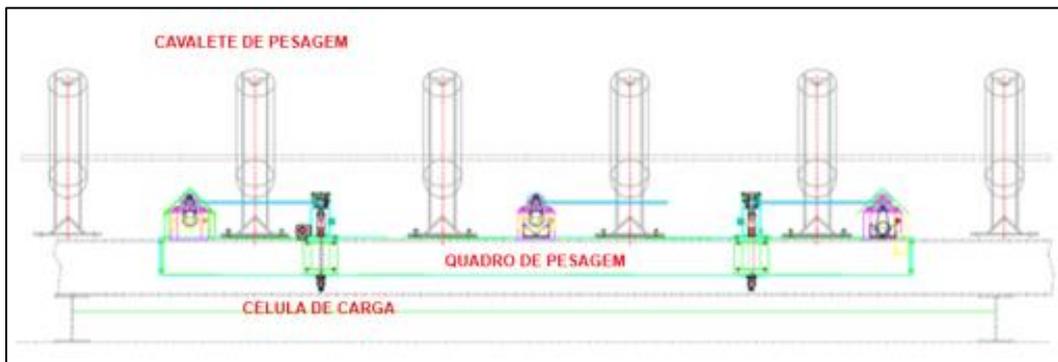
Para exercer essa função, a balança é constituída por:

- **Quadro de pesagem**

Quadro de pesagem é a estrutura que sustenta os cavaletes de pesagem, os quais recebem o esforço dos rolos e correia transportadora, transmitindo esse esforço mecânico para as células de carga.

Na Figura 4, pode-se observar o quadro de pesagem que é representado pelo retângulo verde, é suportado por 4 células de carga em sua parte inferior, enquanto suporta na sua parte superior os 4 cavaletes de pesagem.

Figura 4 - Disposição geral do quadro de pesagem.

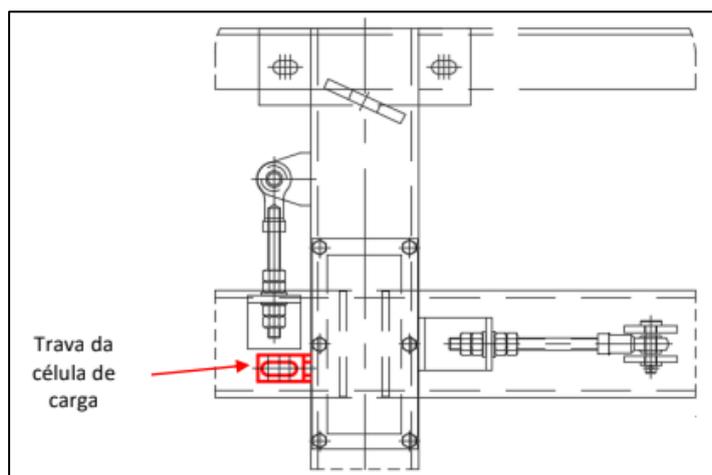


Fonte: (WBS, 2024).

- **Dispositivos de travamento**

Esse sistema evita o deslocamento da balança, mantendo a célula de carga estável para receber o esforço no sentido vertical. A trava da célula de carga está destacada em vermelho na Figura 5.

Figura 5 - Travas da célula de carga.



Fonte: (WBS, 2024).

- **Célula de carga**

A célula de carga é responsável pela transformação do esforço mecânico, peso, em um sinal elétrico para ser interpretado pelo módulo eletrônico.

As células de carga consistem de um elemento de medição onde os *strain gages* são fixados. Este elemento é geralmente feito de aço ou alumínio. Isso significa que é muito resistente, mas também possui uma elasticidade mesmo que mínima. O aço ou alumínio é levemente deformado sob o efeito da carga, mas então volta à sua posição inicial, com uma resposta elástica a cada carga. Estas mudanças extremamente pequenas (micro deformações) podem ser medidas pelos *strain gages* (abreviado como SG). Então finalmente a deformação do SG é interpretada pela eletrônica (amplificador) que permite assim, determinar o peso (SCHMIDT, 2024).

As células de carga embora sejam muito utilizadas no setor industrial, também desempenham um papel crucial no nosso dia a dia, porém muitas vezes de forma invisível.

Células de carga são usadas para medir o peso (massa). São integrantes da nossa vida diária. Em seu carro ou na balança do supermercado: encontramos células de carga em todos os lugares. Elas não são reconhecidas de imediato, porque funcionam escondidas no interior dos equipamentos (SCHMIDT, 2024).

Figura 6 - Célula de carga modelo: S40A.



Fonte: (WBS, 2024).

A célula de carga que sofreu danos e ocasionou falha no processo de pesagem é do mesmo modelo mostrado na Figura 6, fabricada pela empresa HBM, com código de modelo S40A e capacidade de carga de 1000 kg. Uma característica importante da célula de carga é sua sensibilidade, sendo especificada em mV/V, que indica o sinal em milivolts (mV) fornecido pela célula para cada Volt (V) de alimentação na sua capacidade nominal.

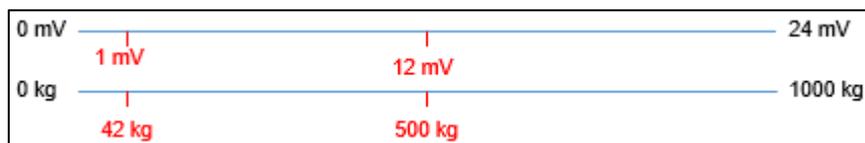
A célula de carga possui características padrão de 2 mV/V de sensibilidade e capacidade de 1000 kg. Quando excitada com uma tensão de 12 Vcc, o sinal de saída da célula poderá variar de 0 mV a 24 mV. Isso significa que, sem carga aplicada, o sinal de saída será de 0 mV, e com a carga máxima de 1000 kg, será de 24 mV, como pode ser visto na Equação (1).

$$\frac{1000 \text{ kg}}{500 \text{ Kg}} = \frac{24 \text{ mV}}{X \text{ mV}} \rightarrow 1000 \text{ kg} \times X \text{ mV} = 500 \text{ Kg} \times 24 \text{ mV} \rightarrow X \text{ mV} = \frac{500 \text{ kg} \times 24 \text{ mV}}{1000 \text{ Kg}} \quad (1)$$

$$X = 12 \text{ mV}$$

A relação linear entre a sensibilidade pode ser vista na Figura 7.

Figura 7 – Relação entre sensibilidade (mV/V) e carga (kg/m).



Fonte: (Própria autoria, 2024).

Outra forma de representar o parâmetro de sensibilidade é por meio utilização da célula de carga, que é expressa em percentual da carga sobre as células. Considerando uma carga de 500 Kg sobre a correia, uma tara de 300 Kg e a capacidade de carga de 1000 Kg, a utilização das células de carga é de 80%, conforme representado na Equação (2).

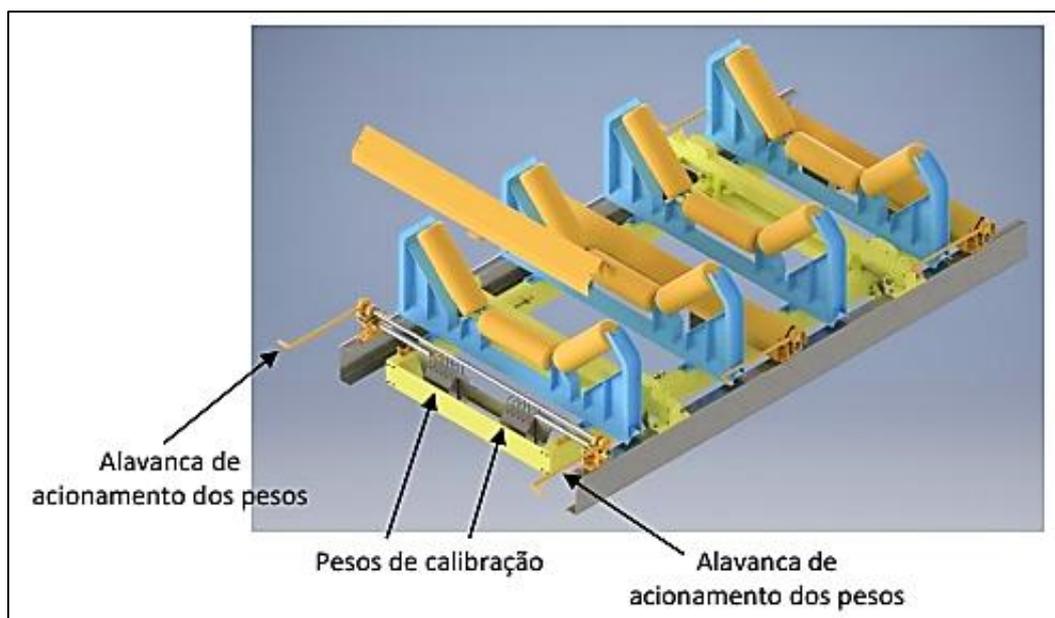
$$Utilização\ da\ célula = 500\ Kg + 300\ Kg = 800\ Kg \rightarrow 800\ Kg \times 100 \div 1000\ Kg = 80\% \quad (2)$$

- **Peso de calibração**

Ele é utilizado para calibrar a balança estaticamente.

Na Figura 8, é apresentado o modelo do peso de calibração utilizado na Balança Integradora, que é objeto do estudo.

Figura 8- Peso de padrão calibração embarcado.

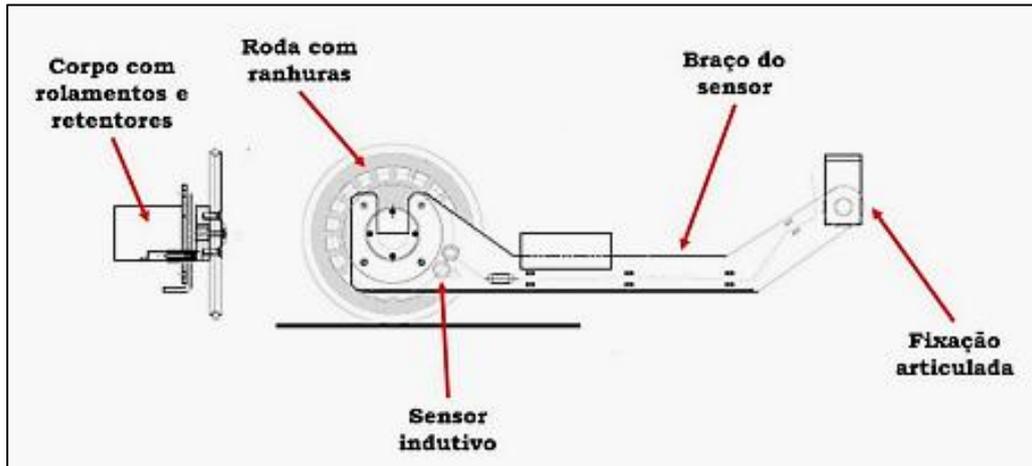


Fonte: (WBS, 2024).

- **Sensor de velocidade**

Utilizado para indicar a velocidade do transportador. O modelo padrão de sensor de velocidade pode ser visto na Figura 9.

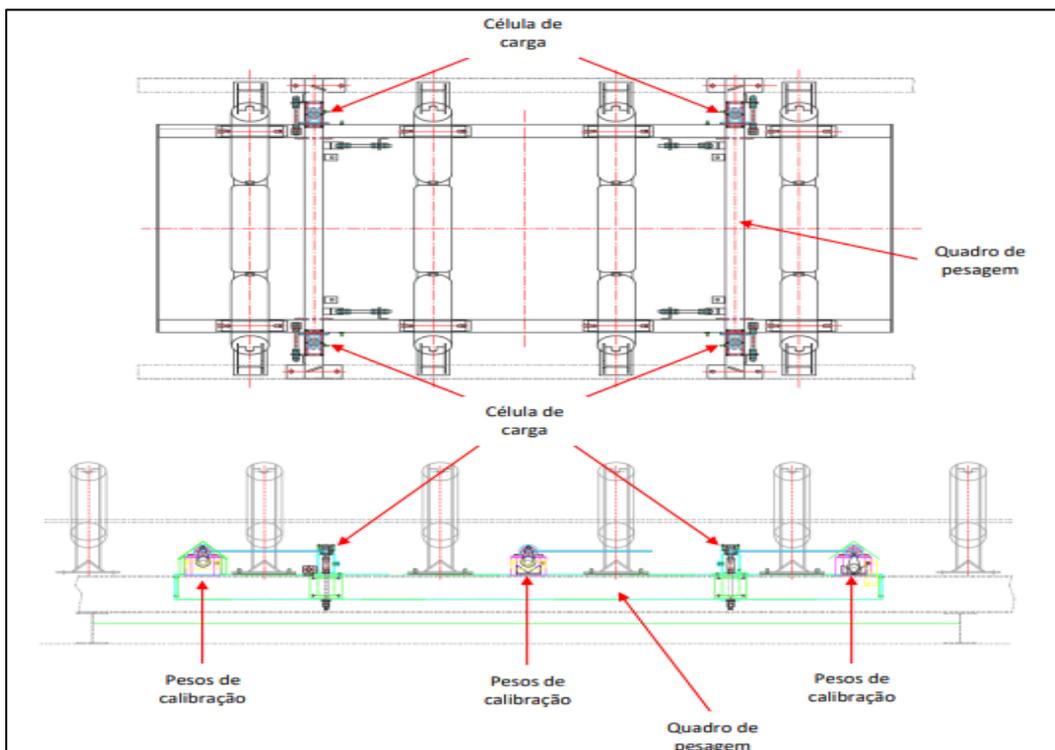
Figura 9 - Sensor de velocidade usado na balança integradora.



Fonte: (WBS, 2024).

A balança integradora é composta de diversas partes mecânicas que, precisam ser montadas conforme as orientações do fabricante. Além disso, é de suma importância manter as condições iniciais de montagem, afim de que essas partes não sejam afetadas por condições que possam danificá-las ou influenciar na sua eficiência. A disposição geral da balança pode ser vista na Figura 10.

Figura 10 - Disposição geral da balança.

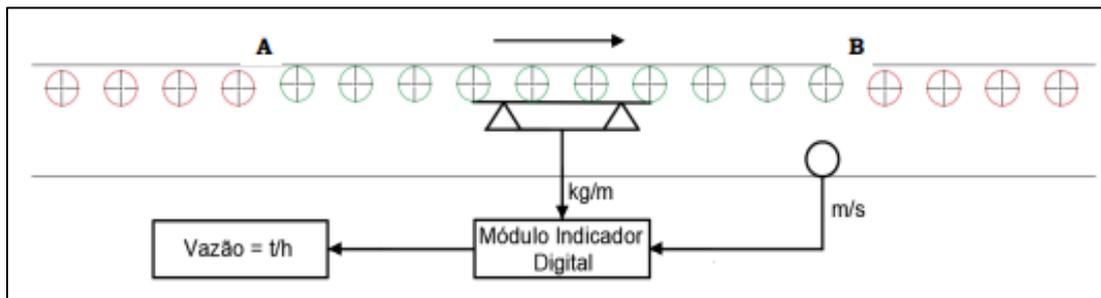


Fonte: (WBS, 2024).

2.2.2 Princípios de Funcionamento

O princípio de funcionamento é mostrado na Figura 11. A correia transporta o material no sentido do ponto “A” para o ponto “B”. A balança por meio do quadro de pesagem, que recebe o peso através de 4 cavaletes, transfere a força para as células de carga, que são transdutores mecânico/elétrico que produzem um sinal que é proporcional ao esforço mecânico aplicado sobre as células. Esse esforço é transformado em um sinal elétrico e enviado para a unidade eletrônica que será interpretado e resultará na indicação da carga na correia. Um sensor de velocidade, instalado em um ponto sem vibração da correia, faz a leitura de pulsos que serão enviados para o módulo e serão interpretados conforme a programação e resultará na indicação de velocidade da correia.

Figura 11 - Princípio de funcionamento da balança integradora.



Fonte: (WBS, 2024).

O módulo, de posse destes dois sinais, faz a multiplicação e obtém a vazão real ou o fluxo real, como pode ser visto na Equação (3):

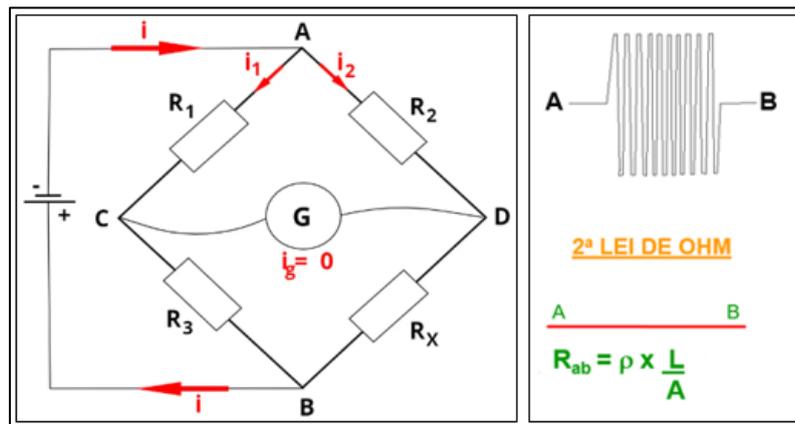
$$\text{Vazão (t/h)} = \text{Carga (kg/m)} \times \text{Velocidade (m/s)} \times 3,6 \quad (3)$$

A constante (3,6) na Equação (3) se trata do fator de conversão de segundos para horas.

2.2.3 Ponte de Wheatstone

Segundo Silva, I. B. (2014), a Ponte de Wheatstone é um circuito amplamente utilizado em medições elétricas para determinar o valor de uma resistência desconhecida, utilizando um conjunto de resistências conhecidas como referência. O circuito consiste em quatro resistores conectados em forma de losango, uma fonte de tensão e um galvanômetro. A ponte de Wheatstone depende da análise das resistências em um circuito, conforme ilustrado na Figura 12 e seu comportamento pode ser explicado pela segunda Lei de Ohm.

Figura 12 - Ponte de Wheatstone e sua relação com a segunda Lei de Ohm.



Fonte: (Mundo Educação, 2024).

Ao considerarmos a equação da 2ª lei de ohm demonstrada da Figura 12, podemos entender que:

R_{ab} é a resistência entre dois pontos A e B.

ρ é o coeficiente de resistividade do material.

L é a distância entre A e B.

A é a área da seção transversal do condutor.

Funcionamento:

- A ponte está equilibrada quando a corrente através do galvanômetro é zero.
- A condição de equilíbrio é dada pela relação vista nas Equações (4), (5) e (6):

$$\sum U_{ADC} = 0 \rightarrow -i_2 R_2 + 0 + i_1 R_1 = 0 \rightarrow \frac{i_1}{i_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

$$\sum U_{DBC} = 0 \rightarrow -i_2 R_X + i_2 R_3 + 0 = 0 \rightarrow \frac{i_1}{i_2} = \frac{R_X}{R_3} \quad (5)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_X}{R_3} \rightarrow R_2 \cdot R_3 = R_1 \cdot R_X \quad (6)$$

Onde:

UADC – Tensões na malha ADC.

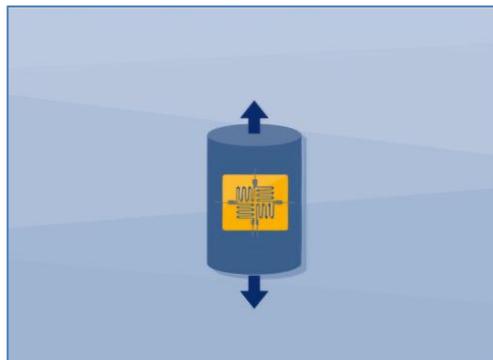
UDBC – Tensões na malha DBC.

RX – resistência desconhecida.

R1, R2, R3 – resistências conhecidas.

A Ponte de Wheatstone pode ser representada pela ligação de 4 *strain gauges* em anel, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Ponte de Wheatstone.

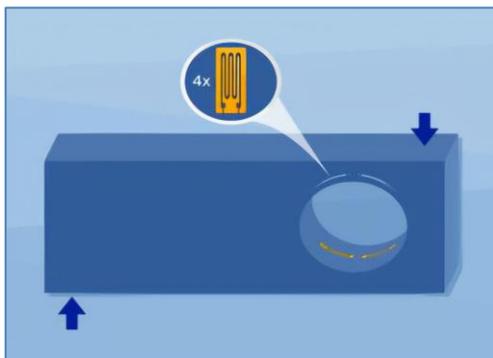


Fonte: (HBM, 2024).

2.2.4 Principais Tipos de Células de Carga

Célula de carga tipo Beam: Apresentada na Figura 14, utiliza uma viga como elemento sensível à força. A deformação mecânica na viga é medida pelos *strain gauges* (extensômetros), que convertem a força aplicada em um sinal elétrico proporcional.

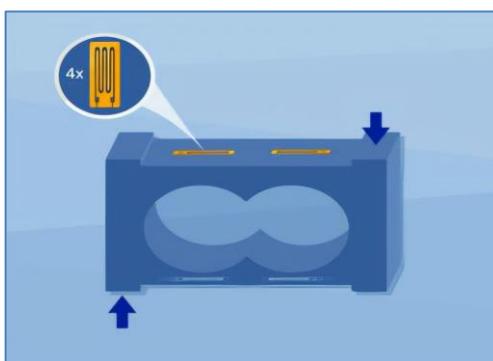
Figura 14 - Célula de carga tipo Beam.



Fonte: (HBM, 2024).

Célula de carga Single Point: Apresentada na Figura 15, é projetada para permitir a aplicação da força em um único ponto ou eixo. Mesmo que a carga não seja perfeitamente centralizada, o sistema compensa, garantindo medições precisas.

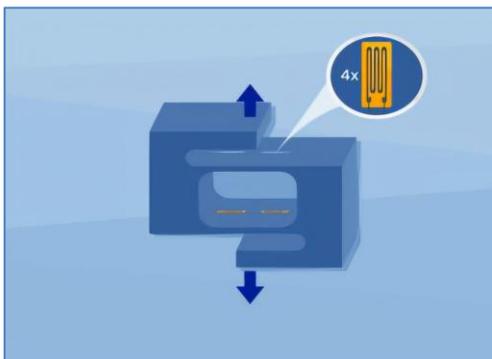
Figura 15 - Célula de carga tipo Single Point.



Fonte: (HBM, 2024).

Célula de carga tipo Tração: Apresentada na Figura 16, é projetada para medir tanto as forças de tração (que "puxam" ou esticam a célula).

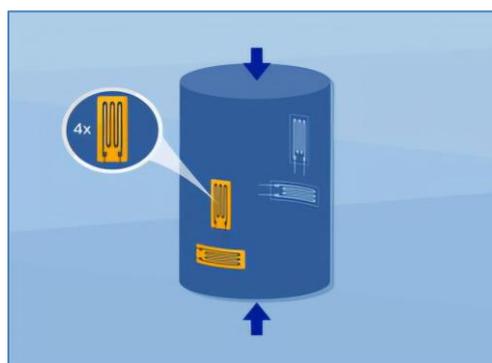
Figura 16 - Célula de carga tipo Tração.



Fonte: (HBM, 2024).

Célula de carga tipo Compressão: Apresentada na Figura 17, mede as forças (que "empurram" ou comprimem a célula).

Figura 17 - Célula de carga tipo Compressão.



Fonte: (HBM, 2024).

2.2.5 Precisão

A precisão de uma balança integradora refere-se à capacidade do equipamento de medir o peso do material com exatidão e consistência em relação ao valor real. Ela é uma característica fundamental para garantir a confiabilidade da medição. As classes de precisão podem ser vistas na Figura 18.

Não importa em qual aplicação uma célula de carga é usada, a precisão desempenha um papel fundamental. As células de carga estão disponíveis em diferentes capacidades (a capacidade máxima define a carga máxima pretendida) e classes de precisão. A tecnologia de strain gauges é usada principalmente para se obter as classes C e D. Células de carga com correção eletrônica são usadas em algumas balanças com classes de precisão mais altas (SCHMIDT, 2024).

Figura 18 - Indicação de classe de precisão.



Fonte: Site HBM, 2024.

2.3 Considerações importantes para Células de Carga

2.3.1 Tipos de Falhas nas Células de Carga

Falhas nas células de carga podem ser causadas por diversos fatores, como sobrecarga, desgaste, vibrações excessivas, erros de calibração, danos físicos ou falhas eletrônicas. Essas falhas podem resultar em leituras imprecisas, afetando diretamente o controle de processos, a eficiência do sistema e a qualidade do produto final.

As falhas nas células de carga podem ser classificadas em falhas temporárias e falhas permanentes:

- Falhas temporárias: São causadas por distúrbios momentâneos, como picos de carga ou interferências externas. Em muitos casos, essas falhas podem ser corrigidas com ajustes no sistema de pesagem ou calibração.
- Falhas permanentes: Estas são mais críticas e podem envolver danos físicos no sensor ou na eletrônica associada, resultando em falhas de leitura

constantes e imprecisas. As falhas permanentes exigem a substituição ou reparo das células de carga.

2.3.2 Impactos das Falhas nas Operações Industriais

As falhas em células de carga têm impacto direto na qualidade dos processos industriais. A imprecisão nas medições pode levar a erros de pesagem que afetam a qualidade, o controle de produção e até mesmo a conformidade com normas regulamentadoras. Além disso, falhas frequentes podem causar danos às máquinas e prolongar os tempos de inatividade, resultando em perdas financeiras significativas.

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) é o único órgão brasileiro responsável por elaborar e publicar todas as normas que se referem a pesagem. Porém, o INMETRO segue as referências de normas internacionais, advindas da Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML) e do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST).

Portanto todas recomendações apresentadas neste manual são baseadas em normas técnicas internacionais, que se referem exclusivamente a Balanças Integradoras de Correia. São recomendações baseadas nas normas da OIML, (*Organisation Internationale de Métrologie Légale*), sediada na Europa, cuja norma R-50 trata de balanças integradora de correia e normas da NIST (*National Institute of Standards and Technology*), sediada nos Estados Unidos, cuja norma *Handbook 44* trata de balanças integradora de correia, onde existe uma grande similaridade entre as duas normas (WBS, 2024).

2.4 Manutenção Preditiva e Preventiva em Balanças Integradoras

2.4.1 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva consiste em ações planejadas e realizadas periodicamente para evitar falhas ou desgastes excessivos nos equipamentos, com o objetivo de manter os sistemas em condições ideais de funcionamento, garantindo maior vida útil e reduzindo as chances de falhas inesperadas.

No contexto das balanças integradoras, a manutenção preventiva pode incluir as seguintes atividades:

- Calibração periódicas: As balanças dependem da precisão das células de carga para realizar medições confiáveis.
- Inspeção visual e funcional: Verificar componentes como conectores, cabos, estrutura mecânica e eletrônica para identificar sinais de desgaste, corrosão ou danos físicos.
- Proteção contra condições adversas: O ambiente em que as balanças operam pode ter um impacto significativo. Poeira, vibrações, umidade ou temperaturas extremas podem afetar as células de carga. A manutenção preventiva pode incluir ações como limpeza e instalação de proteções físicas.

2.4.2 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva é baseada na coleta de dados em tempo real e em análises avançadas, ela permite prever falhas antes que ocorram, possibilitando intervenções direcionadas apenas quando necessário (manutenção corretiva).

Essa abordagem utiliza tecnologias como sensores, algoritmos de análise e sistemas de monitoramento para identificar padrões de comportamento anômalo nos equipamentos. Em balanças integradoras, a manutenção preditiva pode ser implementada por meio de:

- Monitoramento contínuo das células de carga: Sensores adicionais ou sistemas de diagnóstico integrados podem acompanhar variáveis como força aplicada, vibrações, temperatura e sinais elétricos emitidos pelas células de carga.
- Sensores virtuais: Modelos matemáticos ou algoritmos baseados em dados históricos podem estimar o desempenho esperado das células de carga e identificar desvios de comportamento que indiquem possíveis falhas.
- Análise de dados históricos: Sistemas de *machine learning* ou inteligência artificial podem processar grandes volumes de dados históricos para prever falhas futuras com base em padrões recorrentes.

2.5 Sensor Virtual no Contexto das Células de Carga

Sensores são itens de extrema importância para a Instrumentação, pois permitem por meio dos dados coletados por eles, tanto o controle de uma planta, quanto o monitoramento do desempenho de um processo. Por possuir esse papel tão fundamental, os sensores vêm sendo foco de constante evolução tecnológica, a fim de otimizar seu uso e resolver problemas inerentes. Entre esses problemas podemos citar os descritos abaixo:

1. Erro de medições;
2. Disponibilidade e Confiabilidade;
3. Atrasos de Medição;
4. Distância do Ponto de Medição;
5. Ambiente de Medição;
6. Interferência no Processo;
7. Preço;

Com intuito de solucionar ou amenizar os problemas descritos acima, nasce um novo conceito de instrumento, capaz de manipular computacionalmente as informações medidas e transmiti-las de forma confiável, os chamados sensores inteligentes.

Porém, mais recentemente surgiu um novo conceito de sensores, chamados de **Soft-Sensors (Sensores Virtuais)**, que possibilitam a medição de variáveis que não poderiam ser medidas por sensores tradicionais, ou mesmo que mensuráveis, seriam obtidas de forma limitada.

O uso de sensores virtuais tem se expandido de forma relevante, como uma ferramenta eficaz de monitoramento e análise de falhas em sistemas de pesagem. Segundo Silva, E. R. e Souza, C. A. (2021), o crescimento na geração e armazenamento de dados impulsionou o desenvolvimento de sensores baseados em software, conhecidos como Sensores Virtuais. Um sensor virtual é um sistema baseados em software que utiliza algoritmos para combinar dados de múltiplos sensores físicos, ou outros parâmetros do sistema, a fim de estimar o comportamento do sensor de forma indireta. Em um sistema de pesagem, pode ser utilizado para prever falhas nas células de carga, monitorando algumas condições

operacionais, como carga aplicada e velocidade e comparar esses dados com as leituras esperadas.

Segundo Fortuna et al. (2007), os principais benefícios dos *soft sensors* são:

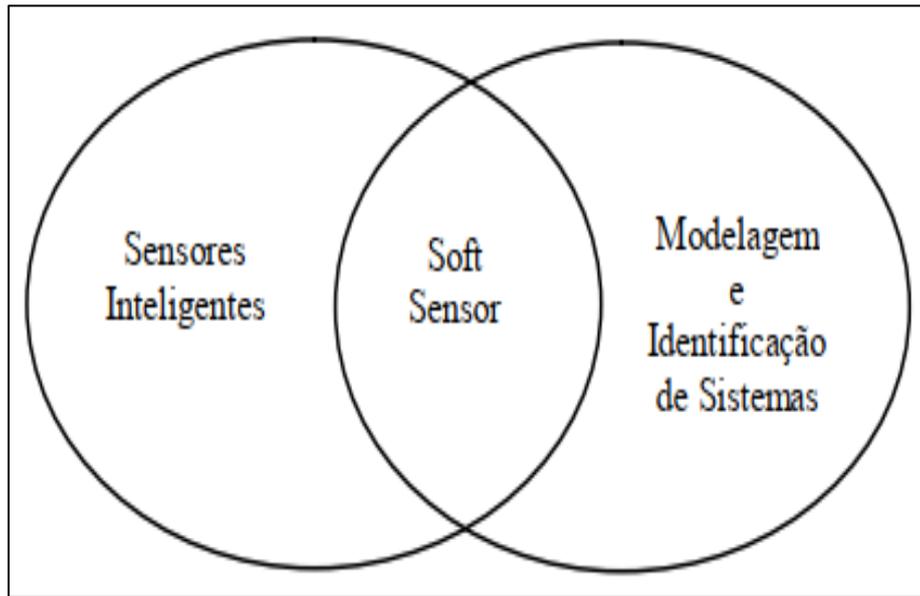
- Representam uma alternativa de baixo custo quando comparado aos sensores físicos, possibilitando mais pontos de monitoramento;
- Podem trabalhar em conjunto com sensores físicos, inclusive para identificar quando eles apresentam falhas;
- Podem ser implementados em dispositivos existentes;
- Fornecem estimativas em tempo real, se mostrando uma opção para medições onde sensores físicos dependem de análises demoradas

O uso desses sensores permite detectar precocemente o surgimento de falhas, sem a necessidade de intervenções físicas. Além disso, pode aumentar a confiabilidade do sistema, permitindo um diagnóstico contínuo e em tempo real.

Para Assis e Maciel Filho [6], “soft-sensor é a associação de um sensor (hardware), que permite medições on-line de algumas variáveis do processo, com um algoritmo de estimação (software) a fim de prover estimativas on-line de variáveis não medidas, parâmetros do modelo ou superar atrasos de medições” (LOTUFO e GARCIA, 2008).

A integração dos sensores virtuais que é representada na Figura 19 é um método que combina dados obtidos pelos sensores inteligentes e pelos modelos computacionais para fornecer medições estimadas.

Figura 19 - Integração sensor virtual



Fonte: (DINCON, 2008)

Essa associação entre sensor e modelo é a ideia fundamental do soft-sensor. Podemos separar o soft-sensor em duas partes distintas: a parte do sensor ou conjunto de sensores, que medem variáveis relacionadas com a variável desejada e a parte do modelo desta relação, geralmente implementado em software, capaz de fornecer, por meio de simulação, a variável desejada. Assim, o soft-sensor é uma boa alternativa em relação ao sensor tradicional, quando as variáveis de entrada podem ser medidas sem os problemas já citados e quando a simulação para a geração da variável desejada apresenta precisão e tempo de computação aceitável. Existem problemas no mundo real para os quais inferência de variáveis, detecção e classificação de falhas, previsão de desempenho, aproximação de funções não lineares e identificação de padrões são requeridos (DINCON, 2008).

Uma das características mais comuns no controle e monitoramento de processos é a complexa relação entre as muitas variáveis medidas, o que tem incentivado o desenvolvimento de técnicas que permitam estimar algumas variáveis, através da medição de outras. Em um cenário ideal, podemos dizer que a medição em tempo real é primordial para o melhor controle e monitoramento, porém a ausência de métodos de detecção apropriados e o alto custo dos métodos, podem inviabilizar esse tipo de medição.

A fim de eliminar ou diminuir estes problemas tem-se incluído o desenvolvimento de estimadores inferenciais ou sensores virtuais. Em suma, pode-

se dizer que há muitas variáveis medidas em tempo real e que são amostradas de forma relativamente rápida. Através dessas variáveis pode-se indiretamente inferir outras variáveis difíceis de medir.

2.6 Tecnologias de Diagnóstico e Monitoramento

Diversas tecnologias e métodos de diagnóstico podem ser utilizados para monitorar as células de carga e detectar falhas. Entre essas tecnologias, destacam-se:

- **Implementação de sensores virtuais:** Para a detecção de problemas antes que se tornem críticos.
- **Análise de sinais elétricos:** Os sinais emitidos pelas células de carga podem representar parâmetros importantes para a detecção de falhas.
- **Monitoramento de umidade:** A umidade excessiva pode ser um fator de degradação para células de carga, por isso seu monitoramento pode ser essencial para prevenção de falhas.

2.7 Soluções de Mitigação

Com base nas falhas identificadas, diferentes estratégias de mitigação podem ser aplicadas, incluindo:

- **Lógicas de Intertravamento:** Baseado nos parâmetros habituais, lógicas de programação podem ser desenvolvidas de modos a amenizar os danos ao processo em caso da quebra de uma célula de carga.
- **Modos de operação emergencial:** Programar a balança para funcionar com um número reduzido de células em caso de falha de uma delas, com base em algoritmos de estimativa de peso.
- **Alarmes e notificações:** Implementar alarmes que alertem a equipe responsável, assim que a célula apresentar sinais de mau funcionamento, como leituras fora do intervalo.

3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

3.1 Metodologia

A abordagem adotada combinou métodos qualitativos e quantitativos, integrando análise de dados e pesquisa de campo para uma compreensão abrangente do problema.

A coleta de dados foi realizada por meio de revisão bibliográfica, análise de documentos, entrevistas com profissionais atuantes na área e observação in loco, garantindo uma visão ampla e detalhada do contexto estudado.

A etapa de análise desenvolveu um exame minucioso das informações obtidas, permitindo a identificação de padrões e causas da falha em questão. Com base nos resultados dessa análise, serão desenvolvidas estratégias eficazes para prevenir e mitigar falhas futuras, assegurando melhorias no processo e na tomada de decisão.

3.1.1 Resultados esperados

O estudo busca compreender a causa da falha, identificando os fatores que contribuíram para a quebra da célula de carga. A partir dessa análise, serão desenvolvidas propostas de soluções eficazes, com estratégias voltadas à prevenção e mitigação de ocorrências futuras. Além disso, espera-se que os resultados contribuam para a confiabilidade das balanças integradoras.

3.2 Estudo de caso

O presente estudo de caso consiste em apresentar uma ocorrência real de falha ocasionada pela quebra de uma célula de carga. Dito isso, será realizada uma análise das causas e das já medidas implementadas, com o intuito de propor uma solução complementar às ações preventivas existentes.

3.3 Relato da falha

No dia 29/07/2023, às 20:44, o transportador de correia (16TR503) de uma mineradora de ouro foi desarmado devido a uma sobrecarga de minério na correia.

A falha na medição da balança (16PHWIT501) causou uma queda na taxa de alimentação, resultando no acúmulo excessivo de minério sobre a correia e, conseqüentemente, na parada do transportador principal por 19 horas e 23 minutos. Essa sobrecarga ocorreu devido à correção do setpoint de velocidade realizada pelos inversores de frequência dos alimentadores, que aumentaram a rotação dos motores na tentativa de corrigir o desvio abrupto da taxa de alimentação da planta. No entanto, esse ajuste acabou intensificando a sobrecarga e levando à paralisação do sistema.

Durante a investigação da falha, foi identificado que uma das células de carga estava danificada, conforme ilustrado na Figura 20. A falha na célula de carga resultou em uma interrupção da produção de ouro com duração de 19 horas e 23 minutos.

Figura 20 - Célula de carga danificada.



Fonte: (Própria autoria, 2024).

Foi necessário então realizar a limpeza da correia e dos chutes (elementos de transferência de minério) dos seis alimentadores que estavam obstruídos, para restabelecer a operação do transportador.

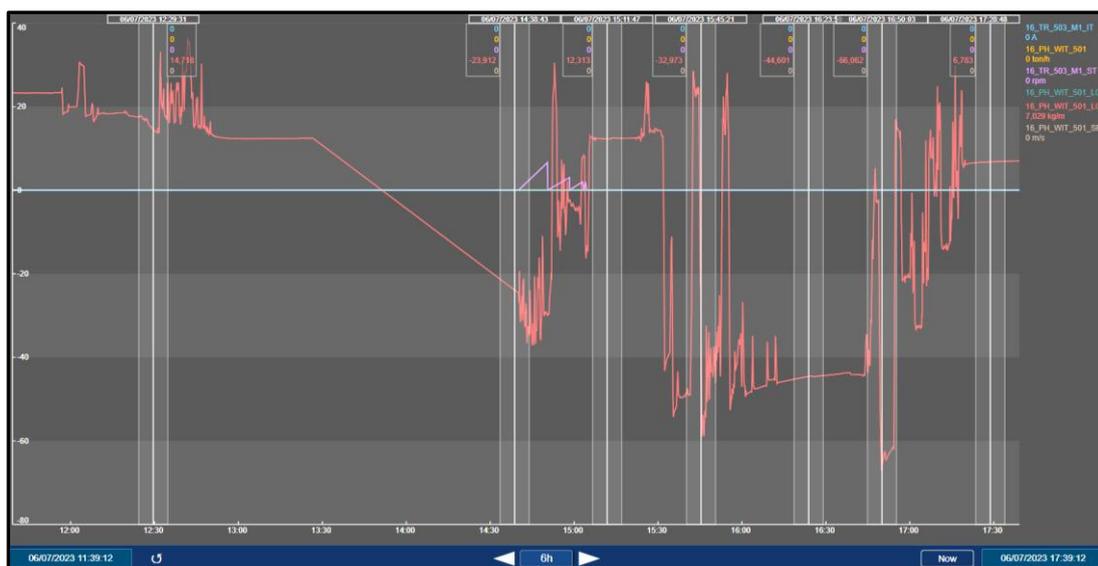
Após a desobstrução dos chutes dos alimentadores (transportadores de correia menores que injetam minério no transportador principal) e alívio do peso sobre a correia, foi realizada a troca da célula de carga e a calibração da balança, permitindo que a planta voltasse a operar normalmente.

Para melhor contextualização, alguns acontecimentos anteriores à data da ocorrência serão apresentados abaixo:

- Em 05/07/2023, foi realizada a manutenção preventiva da balança.
- Em 07/07/2023, houve a troca de 30 roletes na área da balança pela equipe de manutenção mecânica, o que poderia ter contribuído para a quebra da célula de carga.

Durante a atividade de troca dos roletes, ocorreram diversas variações no valor da carga sobre a correia em kg/m que pode ser visto a Figura 21. Esse comportamento pode indicar que houve forças parasitas sobre o quadro de pesagem. A linha em vermelho representada pela descrição (16_PH_WIT_501_LOA) indica a variação da carga sobre a correia transportadora.

Figura 21 - Variação de carga durante atividade mecânica.



Fonte: (Própria autoria, 2024).

O equipamento apresentado na Figura 22 foi utilizado pela equipe de manutenção mecânica para levantamento da correia, permitindo a troca dos roletes.

Figura 22 - Equipamento utilizado pela mecânica para troca dos roletes.

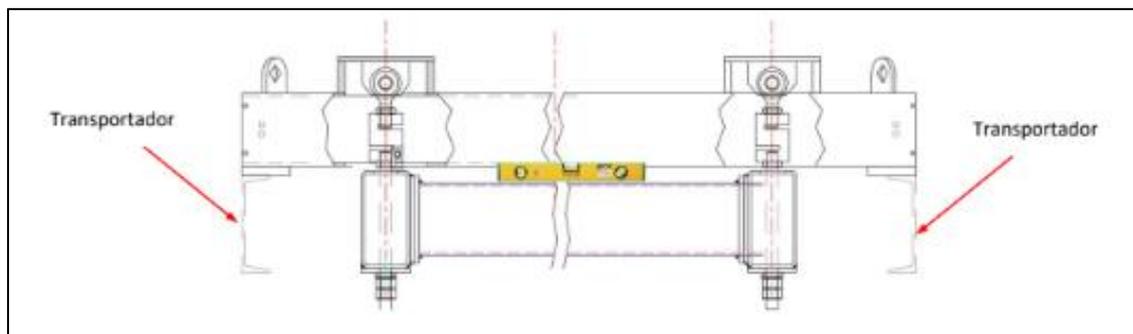


Fonte: (Própria autoria, 2024).

A suspeita inicial levantou a possibilidade de a equipe mecânica ter utilizado o equipamento de forma inadequada, apoiando-o sobre a estrutura da balança em vez da estrutura do transportador. Esse procedimento poderia ter desnivelado o quadro de pesagem que pode ser visto na Figura 23, ao ter adicionado uma força parasita sobre a célula de carga.

O manual do fabricante (WBS 4 Zeus) recomenda manter a estrutura nivelada no sentido longitudinal e transversal, para que não haja um desequilíbrio na distribuição de carga no quadro de pesagem. O desnivelamento pode causar uma sobrecarga em uma ou mais células de carga, uma vez que a carga sobre a correia ficaria concentrada em uma região isolada. Na Figura 23 é mostrado um exemplo de nivelamento da balança no sentido transversal.

Figura 23 - Nivelamento do quadro de pesagem.



Fonte: (WBS, 2024).

3.4 Análise dos dados

Para determinar o fator responsável pela quebra da célula de carga, foram utilizados recursos de análises gráficas e laboratoriais.

Como ferramenta de análise gráfica, foi utilizado o *software* PI VISION, que permite a visualização de *displays* de processo, valores e gráficos e outros recursos necessários para as análises. O PI VISION faz parte de um conjunto de programas baseados na arquitetura Cliente Servidor, denominado PIMS (*Plant Information Management System* – Sistema de Gerenciamento de Informações de Planta), permitindo a automação completa da coleta, armazenamento e apresentação de dados de uma planta industrial. De acordo com o *PI Vision User Guide*, o software oferece funcionalidades avançadas para monitoramento e análise, facilitando a identificação de tendências e anomalias no processo.

Para a análise laboratorial, a célula de carga danificada foi enviada para o Instituto de materiais tecnológicos do Brasil, que emitiu um relatório com seu parecer sobre a causa da quebra.

3.5 Análise gráfica

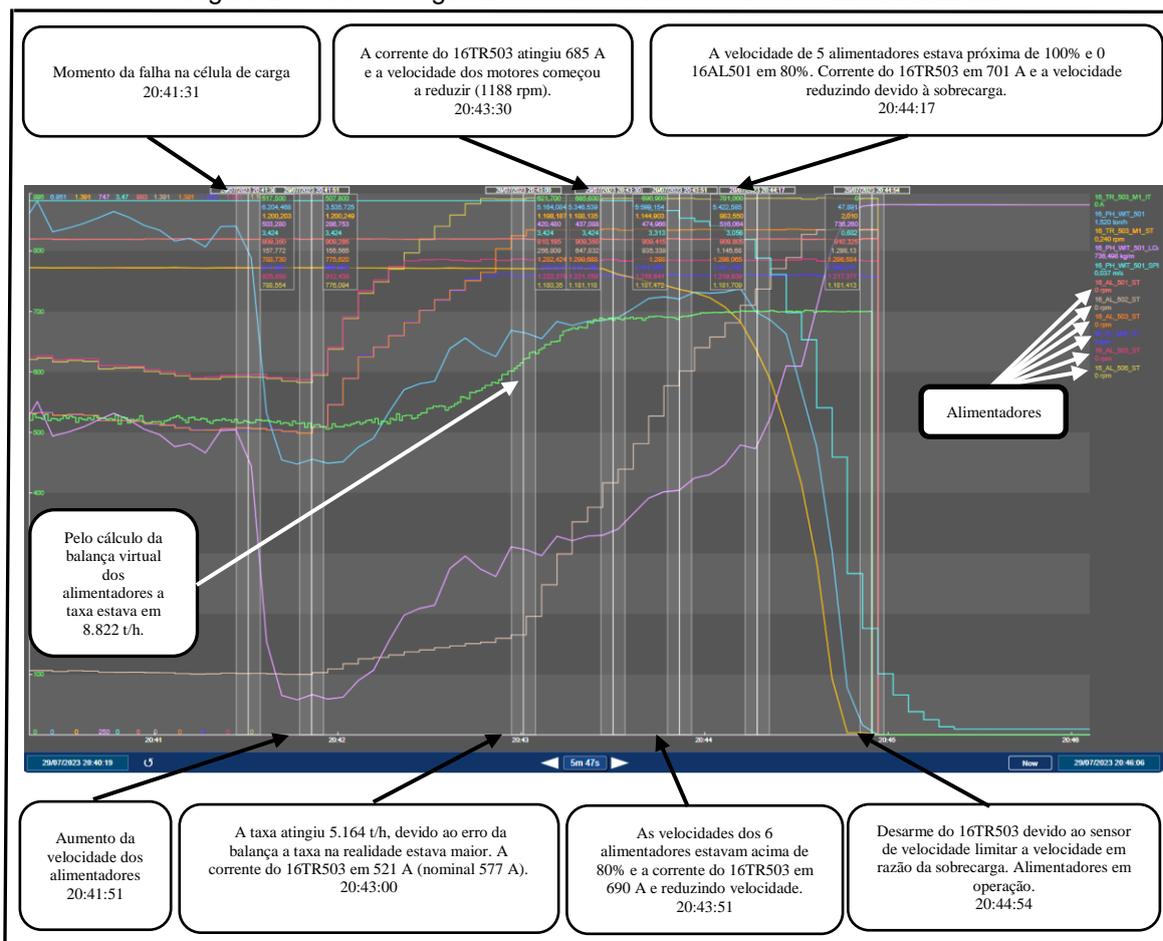
Conforme demonstrado na Figura 24, a partir do momento em que ocorreu a falha de medição, as velocidades dos alimentadores começaram a aumentar na tentativa de compensar a redução da taxa de alimentação. Esse aumento abrupto na velocidade dos alimentadores ocasionou uma sobrecarga de minério sobre a

correia do transportador principal.

Foi verificado que a taxa de alimentação indicada pela balança reduziu drasticamente, de 6174 t/h para 3528 t/h, em um intervalo de 10 segundos. Portanto essa redução na taxa de alimentação pode ser associada à falha na medição da balança (16PHWIT501).

Seguindo a lógica de controle para manter o *setpoint* de 6500 t/h, os seis alimentadores, que estavam em operação aumentaram sua rotação para compensar a redução. Contudo, o excesso de alimentação resultou em sobrecarga no transportador de correia (16TR503), limitando a velocidade dos motores até que o transportador foi desarmado por indicação de velocidade baixa do sensor de velocidade.

Figura 24 - Sobrecarga na correia e a velocidade dos alimentadores.

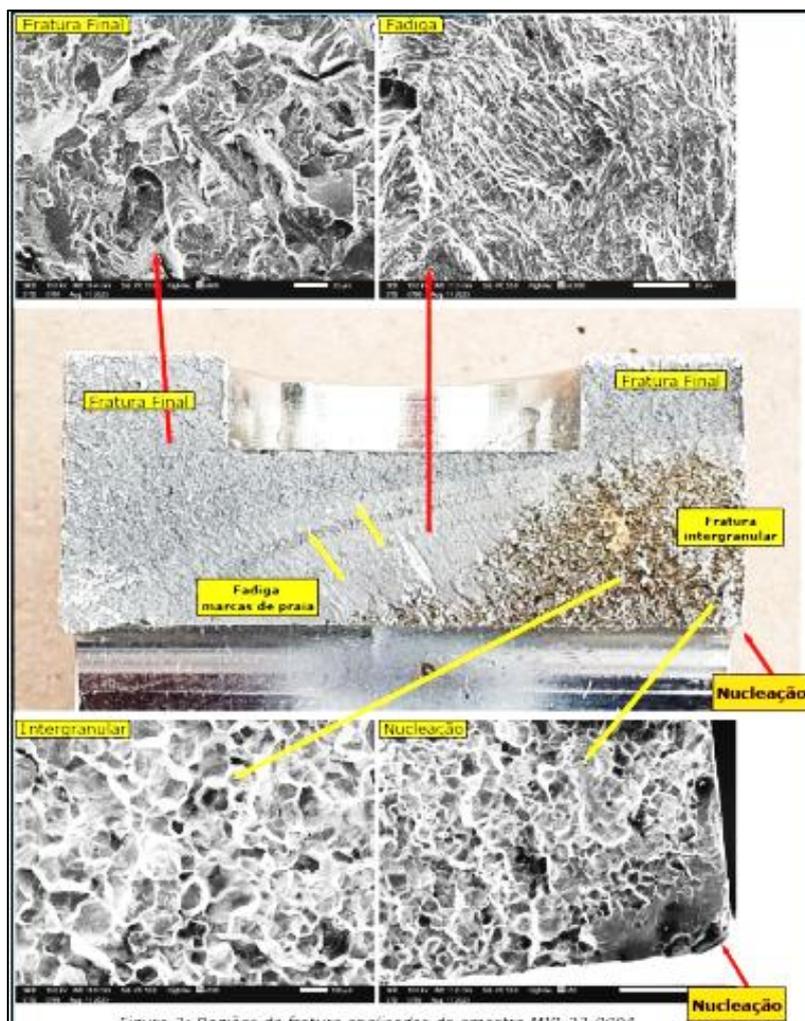


Fonte: (Própria autoria, 2024).

3.6 Análise laboratorial

A análise laboratorial teve como objetivo apresentar a possível causa da quebra da célula de carga. De acordo com a conclusão do responsável técnico pela emissão do relatório laboratorial, a causa mais provável da quebra célula está associada a um fenômeno denominado como fragilização por hidrogênio. Esse fenômeno, que afeta principalmente metais de alta ductilidade, ocorre devido ao aumento da concentração local de hidrogênio. A Figura 25 demonstra os indícios que sugerem que a causa da quebra foi por umidade localizada.

Figura 25 - Análise laboratorial da célula de carga.



Fonte: (Relatório de análise laboratorial, 2023).

3.7 Soluções implementadas

3.7.1 Substituição da célula de carga

Em busca de maior confiabilidade e segurança na operação da balança integradora, optou-se pela substituição da célula com capacidade de 1000 Kg e carga de ruptura de 1500 Kg por uma célula com capacidade de carga de 2000 Kg e carga de ruptura de 3000 Kg. Na Figura 26, é possível observar a diferença de robustez mecânica entre a antiga célula de carga e a atual. A célula de carga atual, localizada à direita na primeira parte da Figura 26, destaca-se pela sua maior robustez mecânica.

Figura 26 - Comparação da robustez entre a célula antiga e a atual.



Capacidade	C (mm)	A (mm)	L (mm)	M
50kg,	50,8	63,5	25,4	M8
100kg, 200kg,	50,8	76,2	25,4	M12
500kg	57,2	87,3	31	M12
1t	57,2	87,3	31	M12
2t	69,8	100	36,5	M24 x 2
3t	69,8	100	36,5	M24 x 2
5t	76,2	114,3	36,5	M24 x 2

Fonte: (Própria autoria; HBM S40, 2024).

3.7.2 Melhoria na lógica de controle

Para possibilitar a antecipação do problema ocorrido, criou-se uma balança virtual para fins de comparação com a balança real.

Além disso, três alarmes críticos relacionados ao funcionamento do sensor de velocidade foram definidos para os casos abaixo.

Caso 1: se a velocidade indicada pelo sensor for superior a ($\pm 4\%$) do valor nominal durante 5 minutos, será gerado a indicação de sensor operando com valor anormal.

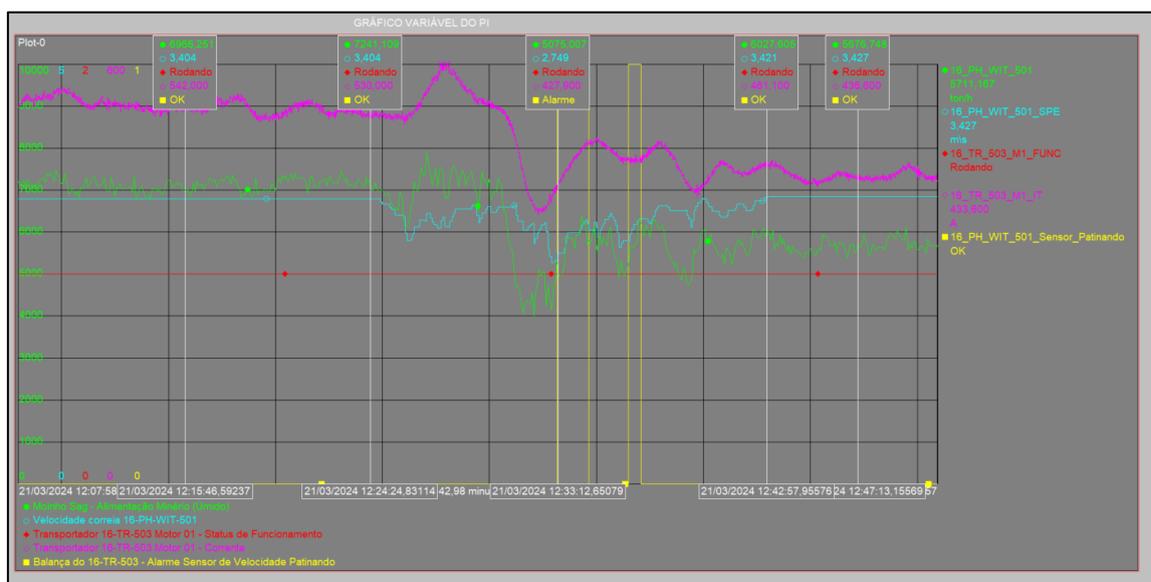
Caso 2: se a velocidade indicada pelo sensor permanecer abaixo de (-10%) do valor nominal durante 30s, será gerado a indicação de patinação do sensor.

Caso 3: se a velocidade indicada pelo sensor permanecer abaixo de (-20%)

do valor nominal durante 15s, será gerado a indicação de patinação do sensor.

Foi criada a descrição 16_PH_WIT_501_Sensor_Patinando para acompanhamento via PI Vision. A Figura 27 demonstra a relação direta dos parâmetros da balança e as falhas no sensor de velocidade.

Figura 27 - Alarme de sensor patinando.



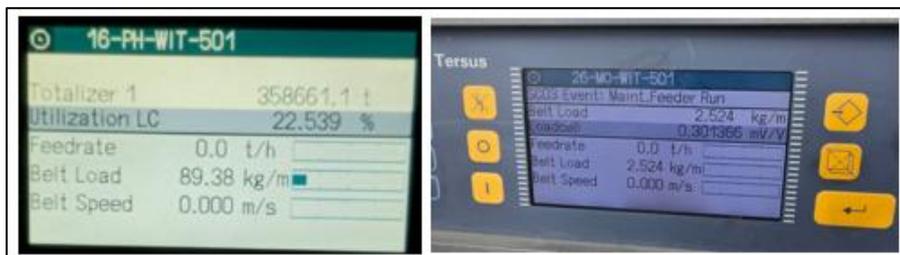
Fonte: (Própria autoria, 2024).

3.7.3 Aquisição de equipamentos de testes preventivos

A Figura 28 apresenta dois parâmetros utilizados para verificar a distribuição de carga entre as células: o valor de LOADCELL (mV/V) e o valor de UTILIZATION LC (%), que podem ser visualizados diretamente na IHM da balança integradora. No entanto, essa leitura é limitada aos valores de uma única célula por vez.

O parâmetro de UTILIZATION LC representa a utilização de carga vista na Equação (2).

Figura 28 - Parâmetros (UTILIZATION LC (%) e LOADCELL(mV/V)).



Fonte: (Própria autoria, 2024).

O instrumento ilustrado na Figura 29 é um equipamento projetado para verificar a distribuição de carga entre as células de carga, prevenindo sobrecargas ou desequilíbrios que possam comprometer tanto a integridade das células quanto a precisão das medições. Permite verificar a calibração exata dos sistemas de quatro células ao exibir os valores da carga (Kg) e o LOADCELL (mV/V) para cada célula de carga.

Figura 29 - Testador de célula de carga.



Fonte: (Própria autoria, 2024).

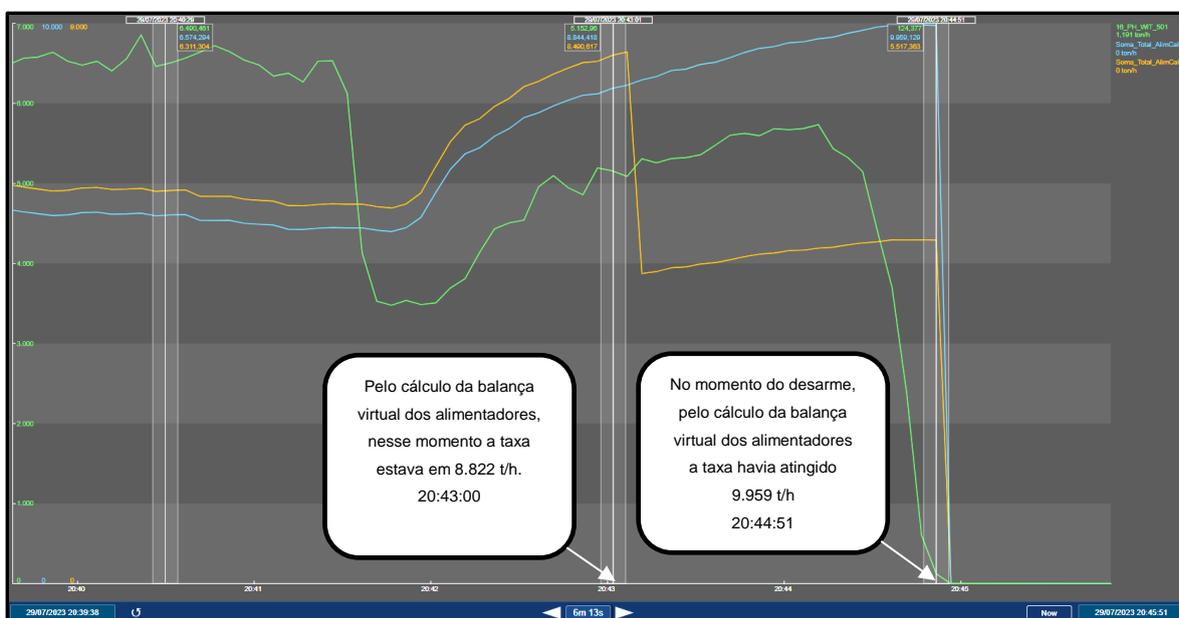
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Aumento da confiabilidade

A utilização da balança virtual possibilita análises prévias do comportamento da balança real. Ao analisar e comparar os parâmetros de ambas, torna-se possível prever falhas e condições anormais, permitindo intervenções precoces.

Ao se analisar a Figura 30, que apresenta a relação entre a taxa real e taxa calculada, é possível identificar que, no momento do desarme do transportador principal, a taxa real indicou um valor próximo a zero, enquanto a taxa calculada apresentou o valor de taxa de 9961 t/h. Esse comportamento evidencia que a balança integradora interrompeu a medição devido à redução de velocidade indicada pelo sensor de velocidade com identificação 16_PH_WIT_501_SPE, conforme demonstrado no Figura 30.

Figura 30 - Balança real X Balança virtual.



Fonte: (Própria autoria, 2024).

A substituição das células de carga garantiu maior resistência mecânica ao equipamento, aumentando sua proteção contra danos em caso de sobrecarga de minério sobre a correia.

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre as capacidades e a classe de precisão das células, demonstrando que a substituição resulta em um ganho de robustez sem comprometer a precisão da medição, mantendo a mesma classe de precisão anterior. Isso indica que a melhoria na resistência não afeta a confiabilidade das medições.

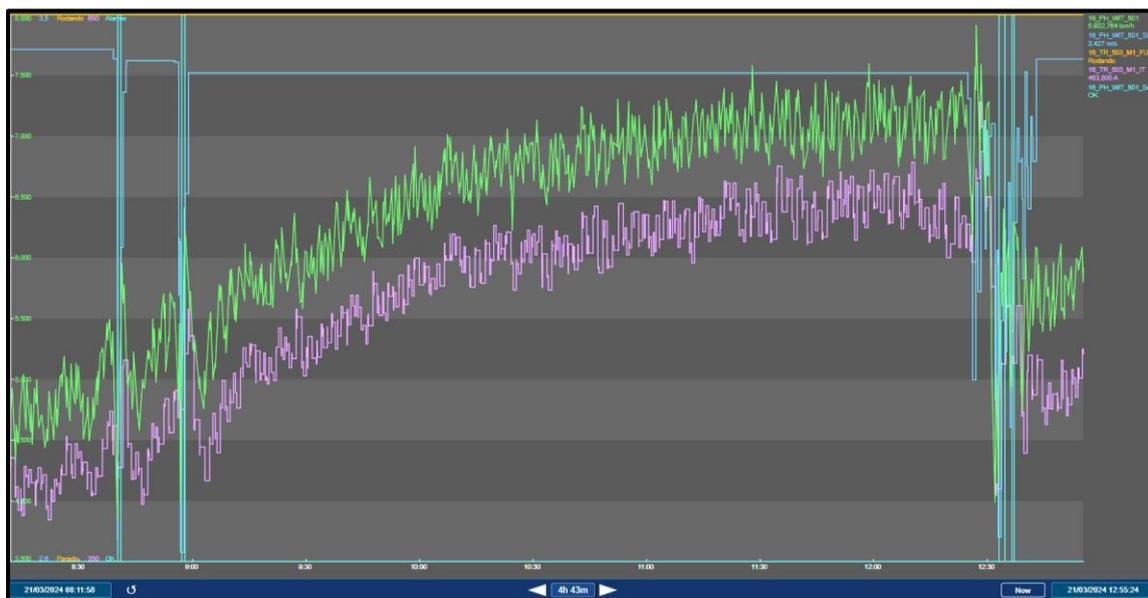
Tabela 1 - Dados das células de carga.

MODELO	CARGA NOMINAL	CARGA MINIMA	CARGA DE RUPTURA	CLASSE DE PRECISÃO
S40	1000 Kg	0 Kg	1500 Kg	C3
RSCC	2000 Kg	0 Kg	3000 Kg	C3

Fonte: (Própria autoria).

A criação dos alarmes críticos foi um passo fundamental para garantir a confiabilidade do processo. O sensor de velocidade, que serve tanto para fins de cálculos quanto para monitorar o transportador, é um componente essencial do sistema, garantindo a detecção precoce de falhas e eficiência da operação. A Figura 31 demonstra nitidamente a influência do sensor de velocidade sobre a resposta de medição da balança integradora.

Figura 31 - Influência do sensor patinando sobre a carga (kg/m).



Fonte: (Própria autoria, 2024).

A patinação de um sensor de transportador sinaliza uma discrepância entre a velocidade real e a velocidade nominal inserida na balança integradora. A implementação dos alarmes baseados no tempo de patinação auxilia na identificação precoce de problemas e na prevenção de danos maiores, permitindo uma análise mais precisa das possíveis causas da falha.

A aquisição do testador de célula de carga (Figura 29) representou um avanço significativo nas manutenções preventivas. O equipamento permite identificar desnivelamentos no quadro de pesagem e prevenir sobrecargas nas células de carga de forma mais precisa e eficiente, garantindo maior confiabilidade nas pesagens e prolongando a vida útil dos equipamentos.

4.2 Fator econômico

De acordo com o site Diário do Comércio (2024) a Kinross Paracatu produziu cerca de 588 mil onças, o que equivale a mais ou menos 18 mil quilos de ouro em 2023. Considerando os números fornecidos pelo site citado e a falha na célula de carga que resultou em uma interrupção da produção de ouro com duração de 20 horas e 44 minutos, a perda financeira foi de aproximadamente 2,6 milhões de dólares.

Através da adoção de medidas proativas para prevenir falhas futuras, é possível obter uma economia significativa em milhões de reais, seja pela antecipação de problemas ou pela redução do impacto de falhas inevitáveis.

4.3 Soluções propostas

Com base nos resultados obtidos, a implementação de um sensor de umidade surge como uma solução promissora para prevenir a quebra prematura da célula de carga. A detecção antecipada de altos níveis de umidade permitirá a tomada de medidas preventivas, evitando falhas e seus custos associados.

Adicionalmente, este trabalho propõe também a instalação de um sensor de velocidade redundante no transportador. Essa medida visa evitar paradas não planejadas devido a falhas no sensor de velocidade primário. A redundância garante que, em caso de falha do sensor principal, o sistema continue operando normalmente, utilizando as informações do sensor secundário.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho investigou as causas e consequências da quebra de uma célula de carga em uma balança integradora, propondo estratégias para mitigar seus impactos e prevenir novas ocorrências. O estudo de caso realizado em ambiente industrial permitiu coletar dados relevantes sobre o problema, revelando a influência da umidade na falha da célula de carga.

A utilização de um sensor virtual, alimentado por dados de outras correias transportadoras, as quais alimentam essa correia principal, mostrou-se uma ferramenta eficaz para monitorar o desempenho da balança e detectar anomalias. Essa estratégia, combinada à análise quantitativa e qualitativa dos dados, contribuiu para a compreensão do problema e a avaliação da efetividade das medidas de mitigação.

Com base nos resultados obtidos, a implementação de um sensor de umidade surge como uma solução promissora para prevenir a quebra prematura da célula de carga. A detecção antecipada de altos níveis de umidade permitirá a tomada de medidas preventivas, evitando falhas e seus custos associados.

Adicionalmente, este trabalho propõe a instalação de um sensor de velocidade redundante no transportador. Essa medida visa aumentar a confiabilidade do sistema, evitando paradas não planejadas devido a falhas no sensor de velocidade primário. A redundância do sensor garante que, em caso de falha do sensor principal, o sistema continue operando normalmente, utilizando as informações do sensor secundário.

Este estudo contribui para o aprimoramento da confiabilidade e segurança de sistemas de pesagem em ambientes industriais, demonstrando a importância da monitoração contínua e da adoção de medidas preventivas, incluindo a redundância de componentes críticos como sensores de velocidade. A aplicação das estratégias propostas pode resultar em redução de custos, aumento da eficiência e maior segurança operacional.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

- **Estudo sobre o impacto de diferentes condições ambientais:** Investigar a influência de outras variáveis ambientais (como temperatura e poeira) na falha das células de carga e propor soluções para mitigação desses fatores.
- **Aprimoramento do sensor virtual:** Explorar a utilização dos sensores virtuais mais avançados, integrando algoritmos de aprendizado de máquina para prever falhas antes que ocorram, com base no comportamento histórico dos dados.
- **Avaliação de novas tecnologias de sensores:** Realizar testes com sensores de umidade de diferentes tipos e tecnologias, buscando soluções mais precisas e com menor custo operacional.
- **Estudo de viabilidade econômica:** Realizar uma análise de custo-benefício sobre a implementação das medidas propostas, comparando os custos das soluções preventivas com as perdas ocasionadas pelas falhas das células de carga.

6 REFERÊNCIAS

AVEVA, “**O que é o AVEVA PI Vision?**”. 2024. Disponível em: <<https://www.aveva.com/pt-br/products/aveva-pi-vision/>> Acesso em 01 Fev. 2025.

AVEVA, **PI Vision user guide**. 2023. Disponível em: < https://docs-be.aveva.com/bundle/pi-vision-2023-pt/raw/resource/enus/pi-vision-2023-pt.pdf?save_local=false> Acesso em: 12 de Dez. .=2024.

CHAVES, Arthur Pinto. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. Manuseio de sólidos granulados. Oficina de texto. 2º edição. 2014.

DIÁRIO DO COMÉRCIO, **Produção global de ouro da Kinross avança e em Paracatu fica estável**. 21 de fevereiro de 2024. Disponível em <https://diariodocomercio.com.br/economia/kinross-investir-us-145-milhoes-producao-ouro-brasil/> Acesso em 16 Fev. 2025.

ENGELOGIC AUTOMAÇÃO E CONTROLE INDUSTRIAL, **Transdutores de força célula de carga**, 2025. Disponível em:< <https://www.engelologic.com.br/download/transdutores-forca-celulas-carga.pdf> > Acesso em:01 fev. 2025.

GUEDES, Rodrigo Souza. **Estudo sobre a calibração de uma balança dosadora de correia**. Ouro Preto. Oficina de texto, 2º edição, 2013.

FEDORKO, G.; **Application possibilities of virtual reality in failure analysis of conveyor belts**, Engineering Failure Analysis, 2021.

HBM, **Classes de precisão OIML**. 2024. Disponível em: < https://www.hbm.com/pt/2637/classes-de-preciso-oiml-exatido-das-celulas-de-carga/?product_type_no=Classes%20de%20precis%C3%A3o%20OIML> Acesso em: 25 nov. 2024.

HBM, **Instalação de sensores de força**. 2024. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/3917/instalacao-de-sensores-de-forca/>> Acesso em: 25 nov. 2024

LOTUFO, Francisco Antonio¹, GARCIA, Claudio². **Sensores virtuais ou Soft Sensors: Uma Introdução**. UNESP - FEG, Guaratinguetá, USP – LAG, São Paulo, 2008.

MACEDO, Anderson Silva. **Desenvolvimento de um sistema de medição de volume de minério utilizando sensor LiDAR em correias transportadoras. Instituto Tecnológico Vale**. Ouro Preto. Out. 2023. Disponível em: <<https://www.itv.org/wp-content/uploads/2023/10/Dissertacao-Anderson-Silva-Macedo.pdf>> Acesso em: 02 jan. 2025.

VIEIRA, Josiane Cristine Aparecida Oliveira. **A tecnologia do transportador de correias de longa distância (TCLD) como estratégia do sistema de transporte numa mineradora em Minas Gerais**. UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2012.

SCHENCK, **INTECONT Tersus Weighfeder Instruction Manual BV-H2463 GB**. Darmstadt. 2024

SCHMIDT, Stefan. **Como uma célula de carga realmente trabalha**. 2024. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/6768/como-uma-celula-de-carga-trabalha/>>Acesso em: 25 nov. 2024.

SILVA, Ivan H. Bechtold. **Medidas de Resistências com a Ponte de Wheatstone. Universidade Federal de Santa Catarina**. 2014 Disponível em: < https://ivanbechtold.paginas.ufsc.br/files/2014/03/exp03_ponte-de-wheatstone.pdf?utm_source=chatgpt.com> Acesso em 12 Fev. 2025.

SOBREIRA, Sandro Geraldo Alves. **Aplicação de sensores virtuais baseados em aprendizado de máquina para estimativa da vazão mássica de minério de ferro em correias transportadoras**. ITV – UFOP, Ouro Preto – MG, 2021.

WBS. **Manual Balança Integradora de Correia**, Wbs 4 Ex MNS 7040_pt_2349 Jundiaí, São Paulo, 2024.

WBS. **Manual Balança Integradora de Correia**, Wbs 4 Zeus MNS 7014-pt-1943, Jundiaí, São Paulo, 2024.