

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* IPATINGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Tairone Diego da Silva Reis

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DE NÍVEL EM SILOS DE MATERIAIS POR MEIO DE
SONDA RADAR: projeto e aplicação.**

Ipatinga
2025

TAIRONE DIEGO DA SILVA REIS

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DE NÍVEL EM SILOS DE MATERIAIS POR MEIO DE
SONDA RADAR: projeto e aplicação.**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso Bacharelado em
Engenharia Elétrica do Instituto Federal
de Minas Gerais – *Campus* Ipatinga para
obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Carlos Renato Magalhães
Duarte

Ipatinga
2025

R347s Reis, Tairone Diego da Silva.

Sistema de medição de nível em silos de materiais por meio de sonda radar: projeto e aplicação. Tairone Diego da Silva Reis. – 2025.
72f.;il.

Orientador: Carlos Renato Magalhães Duarte.
Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Ipatinga*, 2025.

1.Sonda radar. 2. Armazenamento de materiais. 3. Silos. 4. Medição de nível. I. Duarte, Carlos Renato Magalhães. II. Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus Ipatinga*. III. Título.

CDD 621.384

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS

Campus Avançado Ipatinga
Rua Maria Silva, n.º 125, Veneza - Ipatinga - MG - CEP 35.164-261
(31) 3829-8615 / (31) 97133-4399 - gabinete.ipatinga@ifmg.edu.br

ANEXO III

ATA DA DEFESA DO TCC

Aos 7 dias do mês de julho de 2025, às 15 horas, na sala 210 do IFMG Campus Avançado Ipatinga, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) pelo(a)/pelos(as) aluno(a)/alunos(as), sendo aprovado com a nota 85% pela Banca Examinadora, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC.

O(A)/Os(As) aluno(a)/alunos(as) deverá(ão) apresentar o trabalho com as devidas modificações e no formato solicitado em 11 de agosto de 2025.

O(A)/Os(As) aluno(a)/alunos(as) está(ão) ciente(s) de que, caso não cumpra(m) os procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, sua(s) nota(s) será(ão) considerada(s) zero e a sua defesa será anulada. Também está(ão) ciente(s) de que o trabalho de conclusão de seu curso poderá ser divulgado pela instituição através dos seus meios de comunicação.

Observações pertinentes à defesa:

Reações sugeridas pela banca

NOME COMPLETO E ASSINATURA DOS COMPONENTES
DA BANCA E DO DISCENTE ORIENTADO

Orientador: Carlos Renato Magalhães Duarte Assinatura: Duarte

Membro: Gabriel Miranda Freitas Assinatura: Freitas

Membro: William Marlon Ferreira Assinatura: Wm

Aluno(a): Tairone Diego da Silva Reis Assinatura: TR

Aluno(a): _____ Assinatura: _____

Dedico este trabalho a minha mãe, Vera,
pelo carinho, apoio e incentivo constantes
durante minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida e por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos ao longo dessa jornada.

Agradeço a toda à minha família, em especial minha mãe, meus avós, Ezilda e Pedro, e ao meu primo, Luciano, pois contribuíram de forma imensurável para a conclusão dessa jornada.

Agradeço ao meu orientador, Carlos Renato, e a empresa Aperam pela contribuição para a realização deste trabalho.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre os ombros de gigantes”.

Isaac Newton

RESUMO

A busca por eficiência é uma característica inerente a qualquer organização atualmente. Empresas que investem em melhorias contínuas aumentam sua competitividade no mercado em que atuam. No setor siderúrgico, a redução de perdas de materiais e a otimização do tempo nas etapas produtivas são fatores cruciais para garantir uma produção mais eficiente.

Este trabalho apresenta uma solução para reduzir perdas de materiais e o tempo de execução no processo siderúrgico, substituindo o sistema utilizado para conhecimento da ocupação dos silos, por um sistema de medição de nível de materiais utilizando sonda radar. Para alcançar esse objetivo, o projeto foi desenvolvido com foco no sistema de armazenamento de materiais utilizado pela empresa *Aperam South America*, na planta de Timóteo, Minas Gerais. Assim, todo o modelo adotado e a escolha dos componentes têm como base os equipamentos já utilizados em campo pela empresa, bem como a demanda existente.

Entre os resultados esperados estão a melhoria da confiabilidade do sistema de armazenamento, a redução das perdas de materiais e paradas ocasionadas por falhas no processo. Além disso, o projeto promove uma integração mais eficiente com os sistemas de automação existentes na empresa, potencializando a produtividade e a confiabilidade operacional.

Palavras-chave: Eficiência. Armazenamento de materiais. Silos. Sonda radar. Medição de nível.

ABSTRACT

The pursuit of efficiency is an inherent characteristic of any organization today. Companies that invest in continuous improvement increase their competitiveness in the market in which they operate. In the steel industry, reducing material losses and optimizing time in production stages are crucial factors to ensure more efficient manufacturing.

This work presents a solution to reduce material losses and execution time in the steelmaking process by replacing the existing system used to determine silo occupancy with a material level measurement system using radar sensors. To achieve this goal, the project was developed with a focus on the material storage system used by Aperam South America, at the Timóteo plant in Minas Gerais. Thus, the entire adopted model and the choice of components are based on the equipment already used in the field by the company, as well as the existing demand.

Among the expected results are improved reliability of the storage system, reduced material losses and downtime caused by process failures. Additionally, the project promotes more efficient integration with the company's existing automation systems, enhancing productivity and operational reliability.

Keywords: Efficiency. Material Storage. Silos. Radar Sensor. Level Measurement.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Justificativa.....	10
1.2	Objetivos.....	14
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>14</i>
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>15</i>
1.3	Estrutura do trabalho.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	O Processo Siderúrgico na Aciaria.....	17
2.1.1	<i>AOD-L e MRP-L.....</i>	<i>20</i>
2.1.2	<i>Abastecimento Externo.....</i>	<i>22</i>
2.2	Controlador Lógico Programável.....	23
2.3	A sonda radar.....	26
3	DESENVOLVIMENTO.....	28
3.1	Metodologia.....	28
3.2	Configuração de Hardware.....	28
3.3	Fluxo da lógica.....	32
3.3.1	<i>Nível.....</i>	<i>33</i>
3.3.2	<i>Altura.....</i>	<i>34</i>
3.3.3	<i>Função de volume.....</i>	<i>35</i>
3.3.4	<i>Implementação da função de volume.....</i>	<i>45</i>
3.3.5	<i>Peso.....</i>	<i>46</i>
3.3.6	<i>Intertravamento por Nível.....</i>	<i>47</i>
3.3.7	<i>Intertravamento por peso.....</i>	<i>48</i>
3.3.8	<i>Incremento e decremento de peso.....</i>	<i>50</i>
3.3.9	<i>Erro de Sonda.....</i>	<i>52</i>
3.4	Dimensionamento do circuito de alimentação.....	53
3.4.1	<i>Dimensionamento de condutores e proteção.....</i>	<i>55</i>
3.4.2	<i>Eletrodutos.....</i>	<i>62</i>
3.5	Levantamento do custo.....	64
3.6	Resultados.....	64
4	CONCLUSÃO.....	68
	REFERÊNCIAS.....	79
	APÊNDICE.....	71

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Aperam (2025), a fundação da empresa ocorreu no ano de 1944 então sob o nome ACESITA, abreviação para o nome Aços Especiais de Itabira, na cidade de Timóteo em Minas Gerais. A empresa, em seu portfólio, possui três linhas de produção: o aço inox, utilizado no setor automotivo e construção civil, por exemplo; o aço elétrico, utilizado na fabricação de equipamentos elétricos; e o aço carbono especial, utilizado em móveis, tubos, etc.

Para a produção destes aços, a Aperam conta com uma usina siderúrgica integrada na planta de Timóteo. De acordo com o Instituto Aço Brasil (2025), usinas integradas são plantas que operam as três fases básicas, sendo elas: redução, refino e laminação. Na fase de redução é que ocorre a produção do ferro gusa, após, no refino, se utilizam aciarias a oxigênio ou elétricas para transformar o ferro gusa líquido, ou sólido, e a sucata de ferro e aço, em aço líquido e solidificados em equipamentos de lingotamento. Por fim, na laminação, os lingotes são processados por laminadores e transformados em uma grande variedade de produtos siderúrgicos.

Direcionando agora para área de execução deste trabalho, a aciaria, como mencionado anteriormente, pertence a etapa de refino, ou seja, a transformação de ferro gusa em aço. Para isso, é necessário o uso de diversos equipamentos conforme o tipo de aço a ser produzido. Estes equipamentos utilizam um sistema de adição de ligas para produção do aço, sendo esse sistema objeto deste projeto.

Este projeto propõe melhorias no sistema de adição de ligas, como a instalação de uma sonda radar para a leitura constante do nível de material nos silos de armazenamento, intertravamentos voltados à segurança operacional e funções que auxiliam o controle do processo. Para que, se substitua o sistema atual que provoca falhas prejudiciais como: perda de material por transbordamento de silo; parada por falta de material; entre outros problemas recorrentes.

1.1 Justificativa

A etapa de refino da Aperam, na área da aciaria, possui dois equipamentos essenciais ao processo de transformação do ferro gusa em aço: o *Argonium Oxygen Descarburation With Lance* (AOD-L), Descarbonização com Oxigênio e Argônio com Lança, e o *Metal Refining Process With Lance* (MRP-L), Processo de Refino de Metal com Lança. Ambos os equipamentos citados são convertedores, e a escolha entre eles depende do aço a ser produzido.

Os convertedores citados acima, em seu processo de produção, utilizam materiais provenientes de silos de armazenamento, conhecido como sistema de adição de ligas.

Esse sistema de adição possui silos internos e externos. Os silos internos são agrupados em conjuntos, sendo um conjunto de silos para o AOD-L e outro para o MRP-L, e outros conjuntos para demais equipamentos da aciaria. Estes silos ficam de prontidão para serem utilizados no processo. Os silos externos por sua vez, ficam localizados no abastecimento externo fora da aciaria, são silos que recebem, armazenam e distribuem para os silos internos os materiais utilizados pelos convertedores e demais equipamentos da aciaria.

Como dito anteriormente, é necessária uma interação de todo o sistema de adição de ligas, de tal forma que os silos internos estejam sempre carregados e forneçam os materiais solicitados pelo convertedor e, ao estar descarregado, solicite os materiais ao abastecimento externo.

Para tal interação, se faz necessário um sistema de medição de nível de material nos silos internos de forma precisa e confiável para uma maior previsibilidade do sistema. Dessa forma, o sistema de adição de ligas consegue prever o melhor momento de abastecer os materiais nos silos internos evitando paradas por falta de material e outros tipos de problemas ocasionados.

O atual sistema de medição de nível de material nos silos internos acarreta problemas pelo seu método de medição e confiabilidade. O método utilizado atualmente se baseia em sondas capacitivas para definir nível máximo e nível mínimo através do contato com o material, em outras palavras, é possível saber quando o silo está cheio e quando está vazio somente, não é possível saber o quanto de material se tem entre esses dois extremos. Além disso, as sondas capacitivas ainda podem apresentar falhas como agarramento de material no

sensor, ficando com a indicação travada gerando transbordamento de materiais e outros eventos.

Os problemas ocasionados pelo sistema atual de medição interferem diretamente no processo, como perda de produção por parada por falta de material nos silos internos, falta de confiabilidade no levantamento de inventário de ligas, transbordamento de material, controle não confiável de nível nos silos. Alguns registros destes eventos podem ser vistos na Tabela 1, sendo o período de análise de janeiro de 2023 até abril de 2024.

Tabela 1 - Paradas relacionadas a medição de nível no equipamento AOD-L.

Equipamento	Data Inicial	Duração	Descrição Motivo da Parada
AOD	28/01/2023 11:45	0:54:00	Sujeira no sensor de posição
AOD	04/02/2023 08:18	0:13:00	FeMo do silo 45 acabou, necessário acompanhamento para abastecimento do silo
AOD	05/01/2024 08:20	0:14:00	Sonda no silo não funciona, estava marcando 41 T e zerou
AOD	20/01/2024 08:36	1:04:00	Defeito na balança de abastecimento, falta de material nos silos.
AOD	15/03/2024 22:59	0:31:00	Falta de material nos silos: 31, 32, 33 e 35.
AOD	01/04/2024 19:58	0:59:00	Transbordamento de material para fora do silo, desarmando a TC 1. Silo 31 vazio.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A Tabela 1 apresenta as paradas relacionadas a medição de nível no AOD-L, foco inicial deste trabalho. A tabela traz informações como a data de início da parada, duração e motivo, sendo o motivo uma descrição feita pelo operador responsável pelo equipamento.

Como visto na Tabela 1, no dia 28/01/2023 ocorreu uma parada por sujeira no sensor de posição, ocasionando em 54 minutos de parada no AOD-L. Um dos motivos que podem ocasionar esse tipo de parada é o transbordamento de material no silo devido à não atuação da sonda capacitiva de nível máximo, o que ocasiona sujeira no sensor de posição do carro de abastecimento, responsável por direcionar o material ao silo correto, sendo necessária a limpeza antes de continuar os abastecimentos. A Figura 1 ilustra um transbordamento de material no silo.

Figura 1 - Transbordamento de material no silo interno.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Na Figura 1 é possível ver o resultado de um transbordamento de material, aglomerando material perdido na boca do silo além de provocar sujeira em todos os equipamentos ao redor.

Os transbordamentos, além de apresentar paradas de longa duração como no dia 01/04/2024, na qual ocasionou o desarme da correia transportadora (TC 1), podem também oferecer riscos à segurança, como queda de material aos andares inferiores ou mesmo danificar a estrutura do silo.

No dia 04/02/2023 houve parada por falta de material no silo 45 e a necessidade de acompanhamento para abastecimento deste. Esse acompanhamento é devido ao controle de nível do silo não ser confiável. A medição de nível dos silos não ser confiável ocasiona diversos cenários onde ocorre o esgotamento do silo ou mesmo a falta de material neste com indicação de que haveria material, a exemplo dos dias 05/01/2024 e 15/03/2024.

A medição de nível dos silos pode evitar paradas por motivos adjacentes como no dia 20/01/2024, na qual ocorreu o defeito na balança do abastecimento externo e isso ocasionou falta de materiais nos silos internos, que poderia ser evitado com um abastecimento prévio dos silos antes da intervenção na balança.

Durante o início e fim do ano de 2023, o total de ocorrências que remetem a ineficiência do sistema atual foi de 17 registros totalizando 04:02 horas de parada, enquanto no ano de 2024 até o dia 23/04/2024 foram 17 registros e um total de 06:28 horas de parada. Além do aumento da perda de horas por equipamento parado, também é notável um aumento na frequência de ocorrências.

A ineficiência na medição de nível também influencia em outros aspectos do processo. Como no levantamento do inventário de ligas para fechamento de gastos, definição de perdas de materiais e afins. A exemplo, a liga de Ferro Silício (FeSi), que por possuir alto consumo e alto valor agregado, impacta fortemente os gastos, sendo necessário um controle do uso, busca por melhor desempenho com a liga e outras ações.

Em um levantamento interno sobre o consumo de FeSi, foi levantado conforme mostra a Tabela 2, o inventário de ligas com maior assertividade e a instalação de sonda radar nos silos, além de outras ações.

Tabela 2 - Ajuste de FeSi atípico.

Causa	Ação	Motivo da ação	Observações
Ajuste de FeSi atípico	Estabelecer novo processo para realizar inventários de ligas	Ter uma maior assertividade do inventário de ligas	Utiliza-se trena a laser para medir o volume dos silos
	Criar padrão e treinar os envolvidos na atividade de inventário de ligas		Gerar uma repetibilidade na atividade de inventário
	Fazer orçamento de instalação de sonda radar para os silos.	Ter uma maior assertividade do inventário de ligas e menor degradação da matéria-prima	A sonda radar gera informação da porcentagem de ocupação do silo, tornando mais confiável a leitura de quanto em tonelada há de liga.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os registros apresentados têm como referência o AOD-L, porém os demais equipamentos da aciaria que utilizam o sistema de adição de ligas com sonda capacitiva também apresentam problemas semelhantes.

A escolha da sonda radar ao invés de outro método de medição se baseia na afinidade da empresa com o equipamento, pois já é utilizado em outros equipamentos e outras áreas.

Portanto, a instalação da sonda radar ocasiona a melhoria do sistema de adição de ligas em vários aspectos. Solucionando problemas como: a falta de medição de nível confiável nos silos; auxiliando no inventário de ligas consumidas; e questões operacionais de segurança.

1.2 Objetivos

O projeto tem como objetivo elevar significativamente a eficiência operacional, a segurança e a sustentabilidade no manuseio de materiais nos silos, proporcionando um controle mais assertivo e confiável do processo de adição de ligas. Evitando assim desperdícios de materiais e danos financeiros.

1.2.1 Objetivo geral

O projeto foi elaborado para implementar um sistema eficiente de monitoramento por meio da instalação de sonda radar em silos internos da aciaria. As sondas radar serão empregadas para medir com precisão a altura do material nos silos, proporcionando o cálculo para obtenção do volume com base nos materiais adicionados. Dessa forma, será possível calcular o peso, a fim de obter um controle mais robusto sobre o processo de adição de ligas.

O sistema permitirá uma comunicação eficaz com um Controlador Lógico Programável (CLP), o qual receberá os sinais de altura das sondas por meio de cartões analógicos. O trabalho visa um melhor monitoramento do nível e peso dos materiais que são adicionados aos silos diariamente, esse controle irá contribuir na prevenção de transbordamento e redução do desperdício de material, além de reduzir paradas e contribuir diretamente e indiretamente com o processo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver lógica com as funções de interesse para implementação utilizando o CLP fornecido como referência, além de prever a interação deste com os demais CLP's presentes na área.
- Realizar modelagem matemática da função que representa o volume do silo.
- Dimensionar componentes inerentes à instalação da sonda rodar.
- Analisar resultados obtidos com a implementação da lógica desenvolvida.

1.3 Estrutura do trabalho

O projeto irá considerar as necessidades operacionais da empresa, como, particularidades do processo, equipamentos disponíveis, linguagem de programação já utilizada e ampliações necessárias.

No capítulo 1, a introdução apresenta a área de execução deste projeto, assim como a justificativa da realização e os objetivos deste trabalho.

No capítulo 2, a revisão bibliográfica irá apresentar o ambiente siderúrgico fazendo o recorte e contextualizações da área de aplicação deste projeto. Após, uma breve explanação sobre o CLP e a linguagem de programação utilizada. Por fim, uma abordagem sobre a sonda radar utilizada.

No capítulo 3, o desenvolvimento da etapa de modelagem dos silos e programação se baseia no conversor AOD-L. Em sequência, o dimensionamento engloba os silos internos do AOD-L e outro equipamento adjacente para aproveitamento de rotas de condutores e afins.

Ainda no capítulo 3, os testes e resultados do retorno do valor de peso de material foram obtidos com o conversor MRP-L, este que possuía sonda radar previamente instalada em seus silos internos, porém não possui lógica de programação para sua utilização. Para se obter os resultados, foi realizada uma adaptação da lógica desenvolvida para o AOD-L em pontos de interesse para teste do método desenvolvido. A aplicação parcial no MRP-L permitirá validação dos valores obtidos e ajustes necessários antes da implementação definitiva no AOD-L.

A pedido da empresa, o projeto não foi desenvolvido inicialmente com base no MRP-L, pois não seria possível disponibilizar o CLP para elaboração e testes da lógica sem intervir no processo. Portanto, para o AOD-L, o CLP utilizado é

um equipamento novo, que ia ser implementado em área, estando então disponível para testes em bancada. Outro ponto de interesse da empresa é a obtenção de todas as etapas do projeto: partindo de uma lógica desenvolvida do início; modelagem matemática do silo; dimensionamento para a instalação da sonda radar e afins. Ficando a cargo da empresa a adaptação e aplicação das etapas de interesse em outros equipamentos.

No capítulo 4, é apresentado a conclusão, ressaltando pontos notáveis encontrados durante o desenvolvimento do projeto, e também, propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para fins de contextualização e base para esse trabalho, a revisão bibliográfica irá tratar de três assuntos essenciais: o processo siderúrgico na aciaria; os controladores lógicos programáveis; e a sonda radar a ser utilizada.

Na primeira parte, será apresentado o processo siderúrgico de modo geral fazendo um recorte na área de interesse, a aciaria, e trazendo as particularidades do processo feitas pela empresa nos equipamentos que objetificam esse trabalho.

Em segundo lugar, uma visão geral sobre os controladores lógicos programáveis, importância, aplicação e modo na qual foi empregado neste projeto.

Em terceiro e último assunto, a sonda radar que irá ser utilizada, princípio de funcionamento, dados do fabricante que são essenciais ao projeto e afins.

Demais assuntos pertinentes serão tratados de forma sucinta ao longo do desenvolvimento do trabalho a fim de esclarecer e embasar as decisões do projeto.

2.1 O Processo Siderúrgico na Aciaria

Segundo Bolota (2024), a siderurgia é o ramo da metalurgia que trata apenas do ferro e aço, excluindo os metais não ferrosos. Enquanto a metalurgia é o ramo dos metais e suas ligas, composição e formas de uso. Dessa forma, a siderurgia representa uma área especializada dentro da metalurgia, com grande importância industrial pois é base para fabricação de diversos equipamentos e várias aplicações.

Portanto, de acordo com Carvalho *et al.* (2015), a siderurgia por si só desempenha um papel estratégico na economia, pois fornece materiais essenciais para a fabricação de bens em diversos segmentos industriais, além de ser indispensável para o setor da construção civil. Dada a importância da siderurgia, as indústrias, denominadas usinas siderúrgicas, são sempre foco de evolução e busca por melhorias e eficiência.

A fim de se obter as ligas de ferro, as usinas que realizam o processo siderúrgico estão divididas em dois grupos: usinas integradas e semi-integradas, ver Figura 2.

Figura 2 - Grupo de usinas integradas e semi-integradas.



Fonte: Adaptado de BOLOTA (2011, p. 63).

A Figura 2 apresenta quais são as etapas comuns dos dois grupos de usinas. A Aperam, como já mencionado, é uma usina integrada, porém, também possui etapas que são comuns de serem encontradas em usinas semi-integradas.

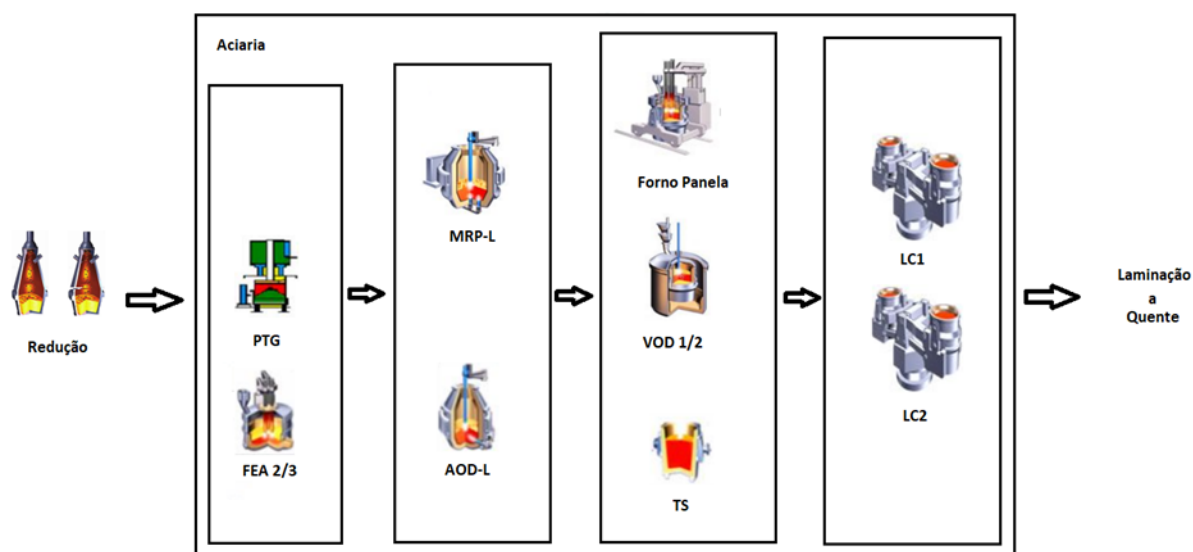
Na rota da usina integrada, utiliza-se minério e coque como matérias primas, possui um alto forno para o processo de redução, em seguida na aciaria, o conversor ou convertedor trata esse material, então denominado ferro-gusa, transformando-o em aço líquido. Na usina semi integrada, utilizando sucata de aço e gusa, acontece a fusão desses materiais no forno elétrico e ajuste de composição química no forno panela.

Em ambas as usinas, o aço líquido passa por um refino secundário das composições químicas e são lingotados e solidificados, ainda na aciaria. E esses subprodutos da aciaria, que podem ser blocos ou placas, são enviadas para a laminação a quente e a frio, dependendo da espessura final que se deseja o produto.

Trazendo a rota da usina siderúrgica alvo deste projeto, o que se tem é a mescla de equipamentos e processos encontrados em ambos os tipos de usina. A Figura 3 ilustra os equipamentos presentes na aciaria.

Na Figura 3, da esquerda para a direita, está representado o fluxo de produção imediatamente antes e depois da aciaria, detalhando os equipamentos desta. Anteriormente a aciaria, a área de redução fornece o ferro gusa e, posteriormente, a aciaria fornece as placas de aço a Laminação a Quente, em uma relação fornecedor e cliente.

Figura 3 - Equipamentos presentes na aciaria.



Fonte: Adaptado de: Acervo interno da Aperam (2024).

Interiormente na Aciaria, o primeiro bloco da esquerda, se refere à preparação de pré metal. O Pré-tratamento de Gusa (PTG) produz o pré-metal a partir do tratamento do ferro gusa recebido da redução, enquanto os Fornos Elétricos a Arco (FEA) 2 e 3, produzem o pré-metal a partir da fundição de sucata com alta concentração de ligas. Em seguida, ambas as cargas são direcionadas para suas rotas, sendo o pré-metal do PTG utilizado para produção de todos os tipos de aço no portfólio da empresa e a carga dos FEA 's tipicamente direcionada a produção de aços inoxidáveis.

No próximo bloco, as cargas são direcionadas aos convertedores, pertencentes ao refino primário, o MRP-L, sendo comumente utilizado na produção de aços ao carbono e aços elétricos, e o AOD-L, utilizado tipicamente na produção de aços inoxidáveis. Sendo o AOD-L um dos objetos deste trabalho. Ambos os convertedores realizam um refino no pré-metal, trazendo a este a faixa adequada de composição química e temperatura, sendo agora considerado aço.

O aço processado nos convertedores é direcionado à etapa de refino secundário, o próximo bloco. Esta etapa é composta pelo Forno Panela (FP), destinado a realizar acertos de composição e temperatura. O *Vacuum Oxygen Descarburization* (VOD), Descarbonização a Vácuo e Oxigênio, realiza ajustes no carbono presente no aço e adiciona outras ligas e acerta a temperatura. O último equipamento deste bloco é a *Trimming Station* (TS), Estação de Aparagem, esta

realiza também ajustes na composição e agita a corrida com passagem de gás inerte.

Neste bloco, os aços provenientes dos convertedores podem passar por um equipamento apenas ou mais, dependendo do tipo de aço, por exemplo, o AOD-L processa o aço, e em seguida é enviado somente a TS, e após ao lingotamento.

Os Lingotamentos Contínuos (LC) 1 e 2, presentes no último bloco interno na Figura 3, é a etapa de solidificação do aço. Esta solidificação transforma o aço líquido em placas para serem fornecidas à Laminação a Quente. Cada equipamento é destinado a realizar a solidificação de um grupo de aços, o LC1 para aços ao carbono e elétricos e o LC2 para aços inoxidáveis.

Por fim, as placas de aço produzidas pelo Lingotamento Contínuo são fornecidas à Laminação a Quente para continuar a sequência no processo siderúrgico. Para este trabalho, os sistemas do AOD-L, MRP-L e o abastecimento externo serão apresentados em detalhes a seguir.

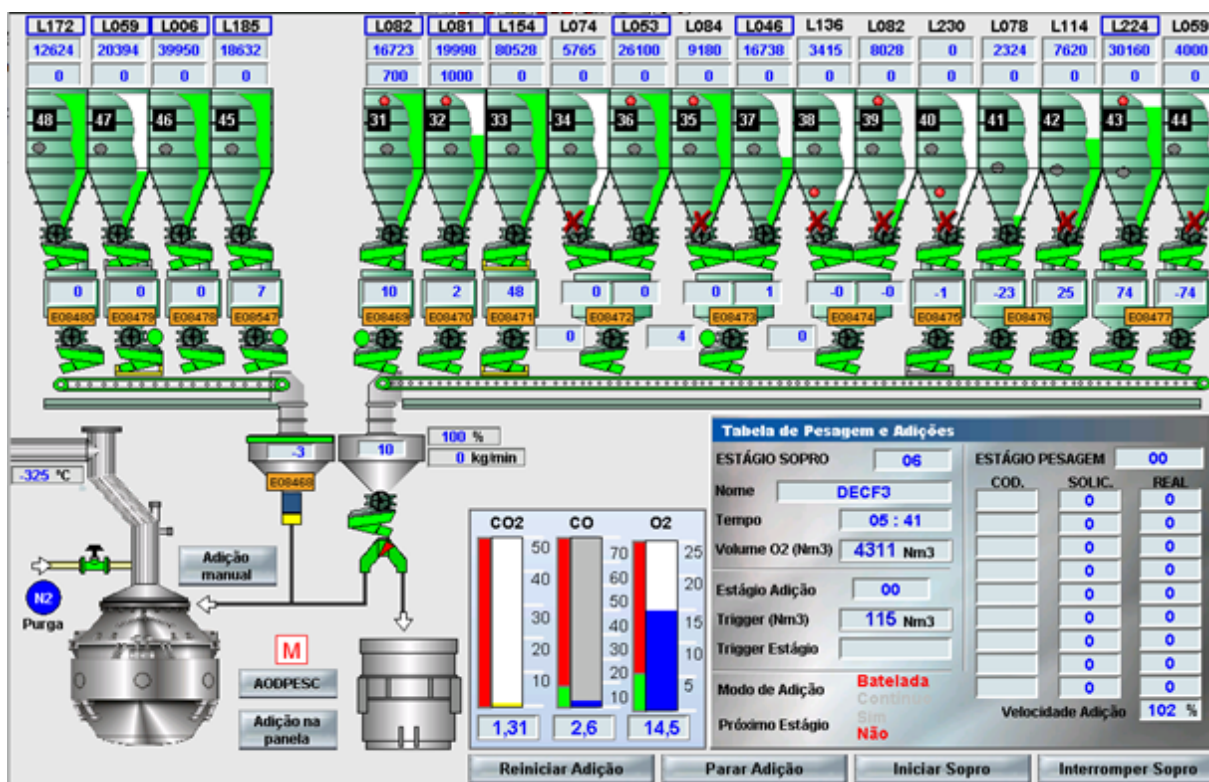
2.1.1 AOD-L e MRP-L

No que tange este projeto é necessário ter uma visão geral de como o processo ocorre nestes dois equipamentos. Como dito anteriormente: o AOD-L é o convertedor responsável usualmente pela produção de aços inoxidáveis; enquanto o MRP-L é comumente utilizado na produção de aços ao carbono e elétricos. Em ambos os equipamentos, durante o processamento se utiliza um sistema de adição de ligas. Em ambos os convertedores, as ligas são pesadas e adicionadas no vaso durante o processo, portanto os silos internos devem estar abastecidos e prontos ao serem solicitados.

A adição destas ligas se dá por meio de silos de armazenamento interno, seguidos de um vibrador de descarga e uma balança de pesagem. Para o AOD-L, cada silo possui sua balança individual, enquanto o MRP-L possui uma balança para grupos de silos, porém este fato não interfere na usabilidade deste projeto.

A Figura 4 mostra o supervisório de operação do equipamento AOD-L e servirá de base para explicação de como funciona o processo de adição de ligas.

Figura 4 - Supervisório do AOD-L.



Fonte: Acervo interno da Aperam (2024).

Na Figura 4, cada silo mostrado armazena um tipo de material. Ao decorrer do processo esses materiais são solicitados pelo operador ao modelo matemático para serem adicionados à corrida. Ao início do pedido, liga-se o vibrador de descarga do silo e o valor pesado é acompanhado pela balança e, quando se atinge o valor de peso requisitado, desliga-se o vibrador de descarga e abre-se a comporta da balança liberando o material pesado para seguir para a corrida.

Para o operador do supervisório, cada silo apresenta a quantidade de material e nível de ocupação, com o objetivo de permitir o controle e racionamento dos materiais utilizados no processo. Portanto, os dados apresentados como nível de ocupação do silo, peso de material neste, precisam ser confiáveis para as tomadas de decisão como, por exemplo, o momento de carregar o silo de forma a não impactar o processo.

Atualmente, a indicação de nível ocorre por meio de sonda capacitiva para indicar que o silo está em capacidade máxima ou mínima. A sonda capacitiva ao encostar no material durante o carregamento do silo envia um sinal ao CLP que define que o silo está em capacidade máxima realizando a parada de carregamento,

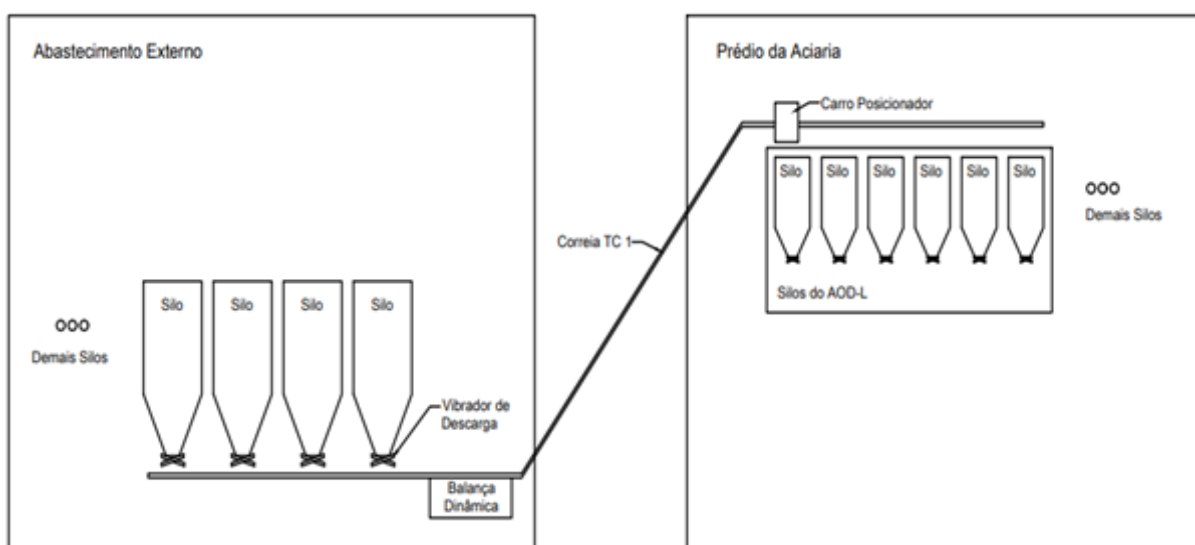
ou seja, a sonda capacitiva por si só não é capaz de entregar o valor de nível e material do silo de forma contínua.

Portanto, para obter algum indicativo de nível de material no silo, esse sistema trabalha em conjunto com o sistema de abastecimento externo, que será discutido a seguir.

2.1.2 Abastecimento Externo

O sistema de abastecimento externo é responsável pelo carregamento de material nos silos do AOD-L e MRP-L, assim como os demais equipamentos. Para tal, possui silos de maior capacidade se comparados aos dos equipamentos, correia transportadora, balança dinâmica e outros componentes pertinentes. O desenho esquemático de como o abastecimento externo interage com os silos internos está na Figura 5.

Figura 5 - Abastecimento externo e aciaria.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Como dito anteriormente, o abastecimento externo possui silos que armazenam os materiais antes de enviar aos silos internos. Os silos do abastecimento são descarregados por meio de vibrador de descarga e transporta esses materiais via correia transportadora (TC 1). Acoplado à TC 1 está a balança dinâmica que registra o somatório de peso dos materiais que passam por ela e, ao

final da correia, está o carro posicionador, que seleciona o silo interno a ser carregado e direciona o material vindo da correia transportadora.

Portanto, o sistema de abastecimento externo trabalha em conjunto com os sistemas de indicação de nível dos silos. Durante o carregamento dos silos, o abastecimento externo envia o peso registrado pela balança dinâmica ao CLP responsável pelos silos de cada equipamento. Este atribui esse valor ao nível de ocupação do silo durante o carregamento até chegar na sonda capacitiva.

A balança dinâmica, que o abastecimento externo possui para medição de peso de material que está carregando no silo, não possui uma boa precisão, o que acaba por inserir valores errados de quantidade de material ocasionando problemas no abastecimento e no processo.

Recapitulando, durante o carregamento dos silos internos, o valor de quantidade de material é enviado pela balança dinâmica até a sonda capacitiva acusar capacidade máxima. Para o descarregamento, o valor pesado pela balança logo abaixo do silo interno é subtraído do valor de material armazenado vindo da balança dinâmica. Estes métodos de carregamento e descarregamento implicam erros e problemas no processo.

2.2 Controlador Lógico Programável

Segundo Mendes (2021), os CLP's vêm ganhando popularidade no chão de fábrica pelas vantagens que oferecem: redução de custos para controlar sistemas complexos, flexíveis para reaplicação em outros sistemas de forma rápida e fácil, entre outras vantagens notáveis.

Petruzella (2014) ressalta que o CLP é a tecnologia de controle de processos industriais mais utilizada. Portanto, nota-se a importância e versatilidade nos CLP's que os tornam atrativos nas mais diversas aplicações.

O CLP é composto por diversos elementos fundamentais: a fonte de alimentação; a CPU (Unidade Central de Processamento); entradas e saídas; a base ou *rack*. Esses elementos, trabalhando em conjunto, tornam o CLP uma ferramenta essencial para o controle automático de processos industriais.

A fonte de alimentação pode ser uma unidade externa ou incorporada ao CLP, os níveis de tensão mais comuns são 24 Vcc, 120 Vac e 220 Vac, que atendem os mais variados usos.

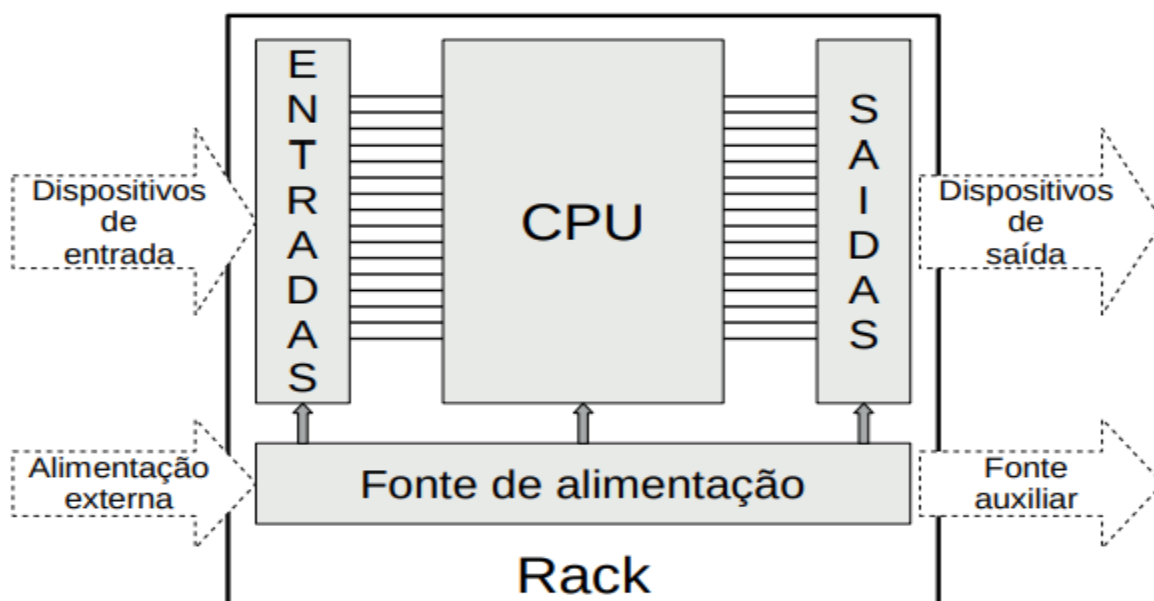
A CPU é o componente responsável por armazenar e processar a lógica, realizando a leitura das entradas, compilando as instruções armazenadas e atualizando as saídas.

Para que o CLP possa monitorar e controlar o processo, são disponibilizados vários terminais de entrada e saída. Os terminais podem ser incorporados no CLP, ou estarem em cartões modulares de entradas e saídas, permitindo assim, uma expansão do número de terminais.

Todos esses módulos são montados em uma base ou *rack*, que garante a conexão mecânica e elétrica entre os componentes, além de abrigar o barramento de comunicação e alimentação, como mostra a Figura 6.

O CLP utilizado nesse projeto é da fabricante GE, modelo *PACSystems RX3i*, e seus componentes serão descritos no capítulo da configuração de *hardware*.

Figura 6 - Componentes do CLP.



Fonte: Mendes (2021, p.13).

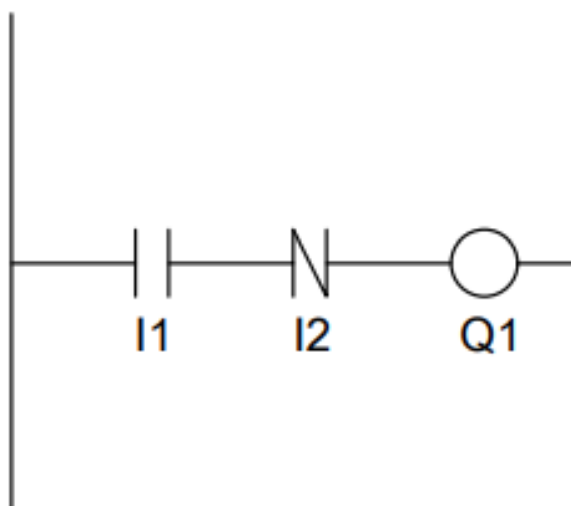
A versatilidade dos CLP's ocorre também pelo método de programação utilizado. O autor Mendes (2021) ressalta que a principal linguagem utilizada é a *Ladder*. A linguagem *Ladder* é uma lógica baseada em relés. Uma das vantagens é a simplicidade no uso e período de aprendizagem reduzido para a operação.

Os relés utilizam uma bobina que ao serem energizadas mudam o estado da chave que estão atrelados. A bobina fecha o contato em caso de uma chave

normalmente aberta (NA) e abrem os contatos de chave normalmente fechados (NF). De forma análoga, a lógica *Ladder* utiliza os contatos NA e NF, que estão atrelados às entradas, para definir uma série de condições para que se altere o estado da saída.

Na Figura 7, observa-se uma lógica simples em *Ladder*, para que a saída Q1 seja energizada, todas as condições na linha em que está inserida têm de ser satisfeitas. A entrada NA identificada por I1 deve ser energizada, ou seja, a entrada física que está atrelada a I1 deve receber um estado de energia ligado. O contato NF, I2, deve estar com a entrada física desenergizada para que dê continuidade na linha e a saída Q1 vá para nível lógico alto.

Figura 7 - Lógica simples.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Existem outras funções na lógica *Ladder* que serão explicadas à medida que forem sendo utilizadas no desenvolvimento da lógica.

Toda a automação existente na aciaria, no sistema de abastecimento externo, na operação dos equipamentos, no sistema de adição de ligas é feita por meio de CLP. Portanto, por se tratar de uma tecnologia já implementada, todo desenvolvimento da lógica de programação segue o padrão da empresa.

2.3 A sonda radar

Segundo Cassiolato (s.d.), a medição de nível, embora conceitualmente simples, exige técnicas avançadas na prática, especialmente em aplicações industriais críticas como controle de inventário e transferências fiscais. É amplamente usada em diversos setores por sua importância operacional e econômica.

De acordo com a fabricante, VEGA (2025), a sonda radar utilizada, modelo Vegapuls 31, ver Figura 8, é um equipamento de dois condutores, com sinal de saída de 4 a 20 mA e tensão de funcionamento de 12 a 24 Vcc. A sonda em questão não necessita de alimentação externa para seu funcionamento, sendo suficiente apenas os dois condutores de comunicação. Isso facilita sua instalação e reduz custos com condutores.

Com faixa de medição de até 20 metros e erro menor ou igual a 2 mm, possui as características necessárias à sua aplicação. A escolha da sonda se baseia também no histórico e relacionamento da empresa com a fabricante.

O princípio de funcionamento da sonda se baseia em emitir um sinal de radar contínuo por meio de sua antena, com modulação de frequência. Ao atingir a superfície do material de enchimento, o sinal é refletido e retornado à antena na forma de eco. A diferença de frequência entre o sinal transmitido e o sinal refletido é proporcional à distância, sendo então convertida no valor correspondente ao nível de enchimento do material.

Figura 8 - Sonda radar Vegapuls 31.

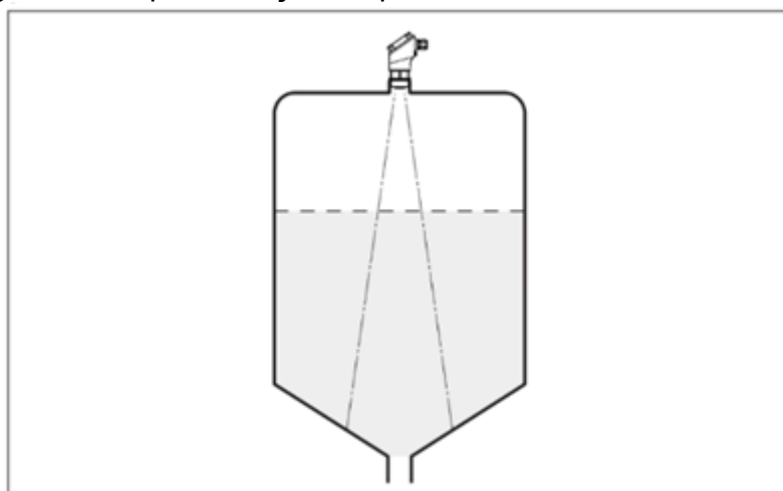


Fonte: VEGA (2025, p.1).

A integração da sonda Vegapuls 31, Figura 8, ao sistema de controle é simples, graças à padronização do sinal de saída em corrente, 4 a 20 mA, o que permite sua conexão direta a CLP's, sistemas supervisórios ou indicadores analógicos.

Nesse projeto, as sondas radar ficarão posicionadas próximo a altura máxima de cada silo, onde será possível visualizar o nível total em tempo real do enchimento dos silos, conforme apresenta a Figura 9.

Figura 9 - Representação de posicionamento da sonda radar.



Fonte: VEGA (2025, p.14).

A configuração da sonda ocorre através de um aplicativo gratuito, *Vega Tools*, disponível na *Apple App Store* e no *Google Play Store*. Através do aplicativo se inserem os dados como altura do silo, tipo de material presente no silo, na qual influencia na taxa de atualização dos dados da sonda, ajuste de ruído de sinal, banda morta de leitura e outros.

Portanto, a escolha da sonda radar Vegapuls 31 representa uma solução técnica eficiente, segura e economicamente viável para o monitoramento contínuo do nível de enchimento, atendendo plenamente aos requisitos operacionais do sistema.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Metodologia

A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho consiste em basear a estrutura do projeto, lógica e dimensionamento, nos componentes inicialmente fornecidos pela empresa e sugestões de componentes comumente utilizados em área.

A lógica foi desenvolvida de forma a interagir positivamente com o processo, em prontidão para substituir o sistema antigo após implementação completa. O desenvolvimento da programação mostrado é com base no conversor AOD-L, porém algumas partes da metodologia foram testadas no conversor MRP-L e exibidas no capítulo de resultados.

A modelagem matemática dos silos será demonstrada ao decorrer do desenvolvimento, quando esta se fizer necessária.

O dimensionamento é com base na Norma Brasileira Regulamentadora nº 5410 (ABNT, 2008) e utilizando padrões utilizados em área, visando atender os requisitos da norma e dos componentes. Para fins de aproveitamento de rota e materiais, o dimensionamento irá englobar, além das sondas do AOD-L, as sondas que serão futuramente instaladas nos silos internos do VOD-1.

Portanto, a metodologia aplicada neste trabalho atende aos critérios técnicos exigidos, considerando componentes fornecidos pela empresa e práticas comuns na área. A lógica foi desenvolvida com foco na integração direta ao processo, permitindo substituição do sistema antigo de forma segura e eficiente.

3.2 Configuração de Hardware

Os componentes na qual o projeto foi desenvolvido foram fornecidos pela empresa. Trata-se de modelos já utilizados na área. Esses componentes são o *rack*, a unidade central de processamento (CPU), a fonte de alimentação para o CLP, o cartão de entrada analógica, a fonte de 24 Vcc e a sonda radar. Ambos os componentes terão uma descrição de suas características pertinentes a seguir.

Para a montagem do CLP é necessário um *rack* para instalação dos dispositivos como a CPU, a fonte de alimentação e as entradas analógicas.

Neste projeto, o rack fornecido e utilizado é da marca GE, modelo RX3i IC695CHS012-BA com 12 *slot's*, modelo já conhecido e utilizado pela empresa.

Além do rack, a fonte de alimentação de 24 Vcc fornecida é da fabricante GE, modelo RX3i IC695PSA140H, de 40 W, entrada 120/240 Vac ou 125 Vcc. Esta fonte é responsável pela alimentação da CPU.

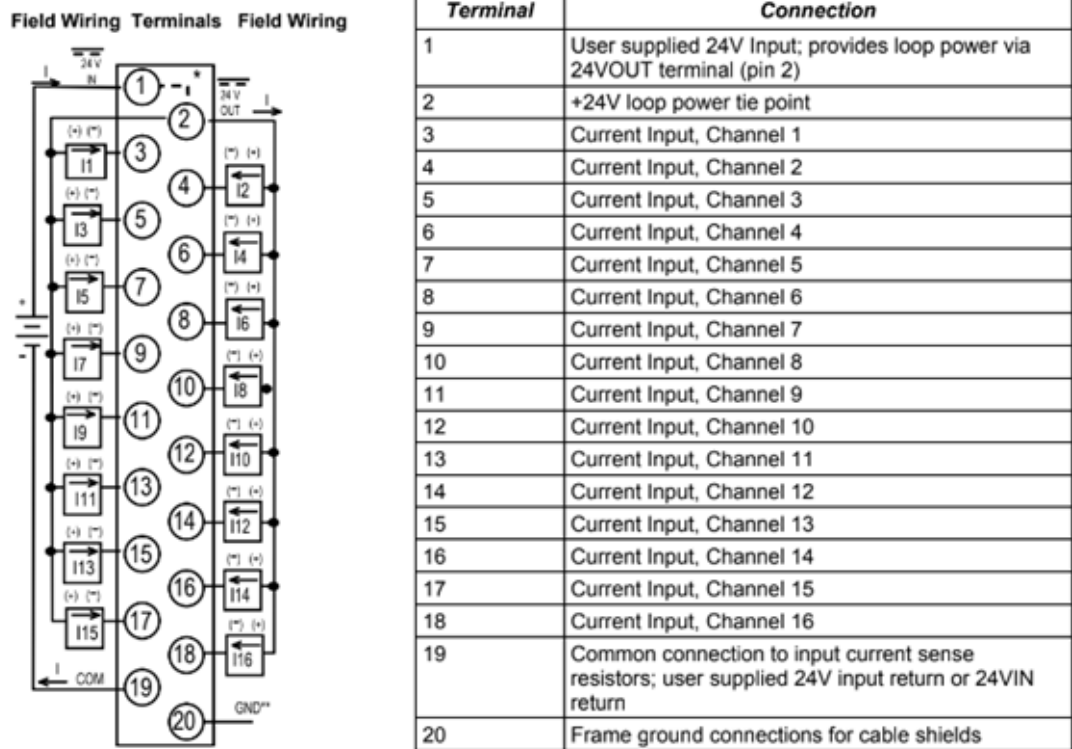
A CPU utilizada é da fabricante GE, modelo CPU310 IC695CPE310 com conexão *Ethernet*, juntamente com o programa *Proficy Machine Edition* 9.5. Esta CPU possui diversos indicadores de estado em sua frontal, para facilitar o diagnóstico rápido.

Para as conexões, foi utilizado o módulo de entrada analógica de corrente de 16 canais, Figura 10, RX3i IC694ALG233, que fornece 16 canais de entrada de terminação única. Cada entrada pode ser configurada usando o software de configuração para qualquer uma das três faixas de entrada: 4 a 20 mA; 0 a 20 mA e 4 a 20 mA aprimorado.

No projeto foi utilizado a configuração 4 a 20 mA baseado nas especificações da sonda radar utilizada.

Figura 10 - Representação do cartão de entradas analógicas.

Field Wiring: ALG233



Fonte: PAC Systems (2025, p.8).

Tendo em vista o desenho representativo das entradas do cartão, observa-se que há 16 canais analógicos de entrada disponíveis para uso (terminais 3 ao 18). Os terminais 1 e 19 são os pontos onde devem ser conectados a alimentação externa, 24 Vcc. O ponto 2 é interligado internamente ao ponto 1, provendo 24 Vcc para os demais terminais. O terminal de número 20 é o GND (terra) utilizado para conexão com a malha de cabos protegidos.

Como dito anteriormente, foi utilizado nos silos a sonda radar Vegapuls 31, ela possui um sensor de radar para a medição contínua de nível. A conexão elétrica da sonda é a dois fios, Figura 11, podendo ser alimentada de 12 V a 24 V. Ao terminal positivo é inserido o cabo de alimentação 24 Vcc e o negativo da sonda é utilizado como retorno e é inserido na entrada do cartão analógico.

Figura 11 - Esquema de ligação da sonda radar.

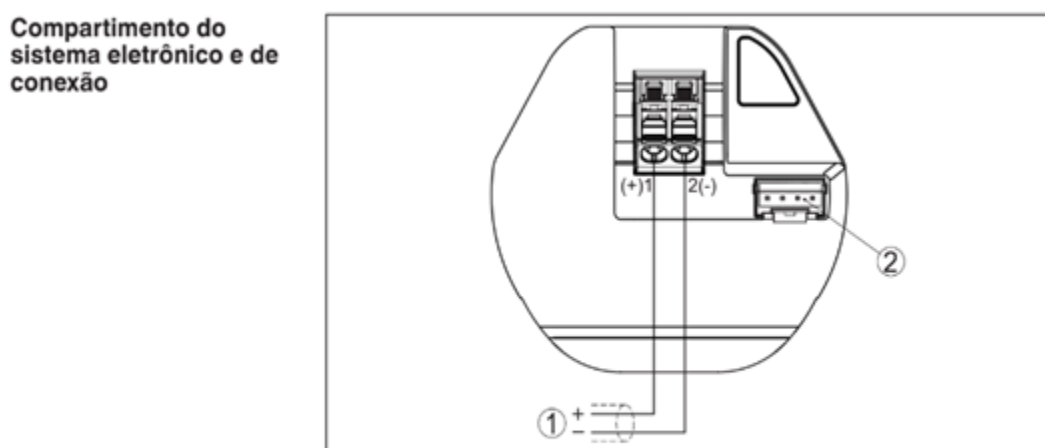


Fig. 20: Compartimento de conexões VEGAPULS 31

1 Alimentação de tensão, saída de sinal

2 Conector de encaixe para unidade de visualização e configuração

Fonte: VEGA (2025, p.24).

A alimentação da sonda é feita pela fonte 24 Vcc, modelo ZSQH075-24V de 75 W, assim como os cartões analógicos.

Por fim, todos os componentes descritos anteriormente foram montados em bancada para testes. Os testes foram executados à medida que as etapas da lógica foram desenvolvidas, para averiguação e acertos. A Figura 12 mostra a bancada utilizada.

Figura 12 - Bancada montada para desenvolvimento e testes.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Assim que foi realizada a montagem dos componentes, partiu-se para o programa *Proficy Machine Edition 9.5*, no qual foi declarado todo o equipamento disposto na bancada e desenvolvido a lógica do projeto. Dessa forma, foi feita a conexão do CLP com a máquina através dos endereços IP e *Submask* padrão.

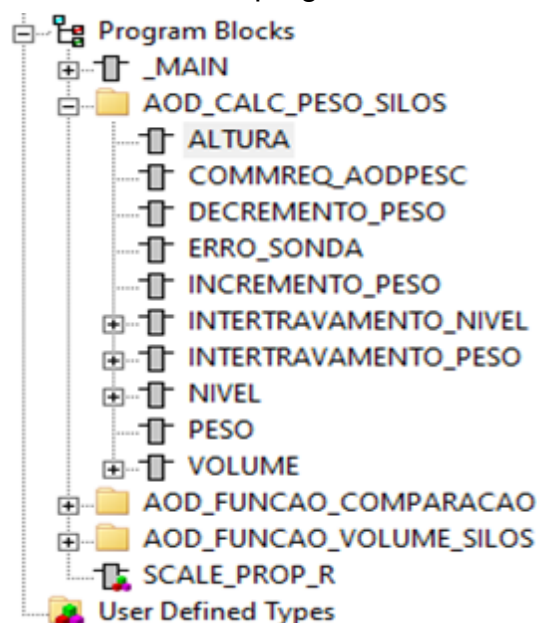
É importante ressaltar que todo o cálculo de volume dos silos é realizado no CLP. A sonda é configurada apenas para enviar distância (em metros), onde a configuração deve ser feita baseada nas dimensões do respectivo silo.

O programa consiste em etapas para calcular o nível e o peso dos silos baseado na densidade da liga que se encontra no seu respectivo silo e se utilizando desses valores, implementar outras funções como, intertravamento por nível e peso, incremento e decremento de peso.

3.3 Fluxo da lógica

A lógica implementada no CLP consiste em etapas bem definidas para uma melhor compreensão e utilização dos profissionais responsáveis em área, seja para ajustes ou ampliação, ver Figura 13. Essas etapas consistem em cada bloco de programa executado pelo CLP, utilizando o sinal recebido da sonda.

Figura 13 - Blocos do programa desenvolvido.



Fonte: Adaptador de: *Proficy Machine Edition 9.5*, 2025.

Para um melhor entendimento, as etapas serão apresentadas seguindo uma sequência lógica de tratamento de sinal e valores de interesse com ênfase em apenas um silo, pois os demais silos seguem a mesma estrutura lógica.

A primeira etapa é o tratamento do sinal 4 a 20 mA vindo do campo, pelo bloco “NIVEL”, convertendo-o em nível percentual. Depois, o nível percentual será refletido em altura em metros, bloco “ALTURA”, que, por sua vez, será inserido na função de volume do silo, bloco “VOLUME”, obtido por meio de modelagem matemática. Com o valor de volume e a densidade do material, chega-se ao peso do material, bloco “PESO”.

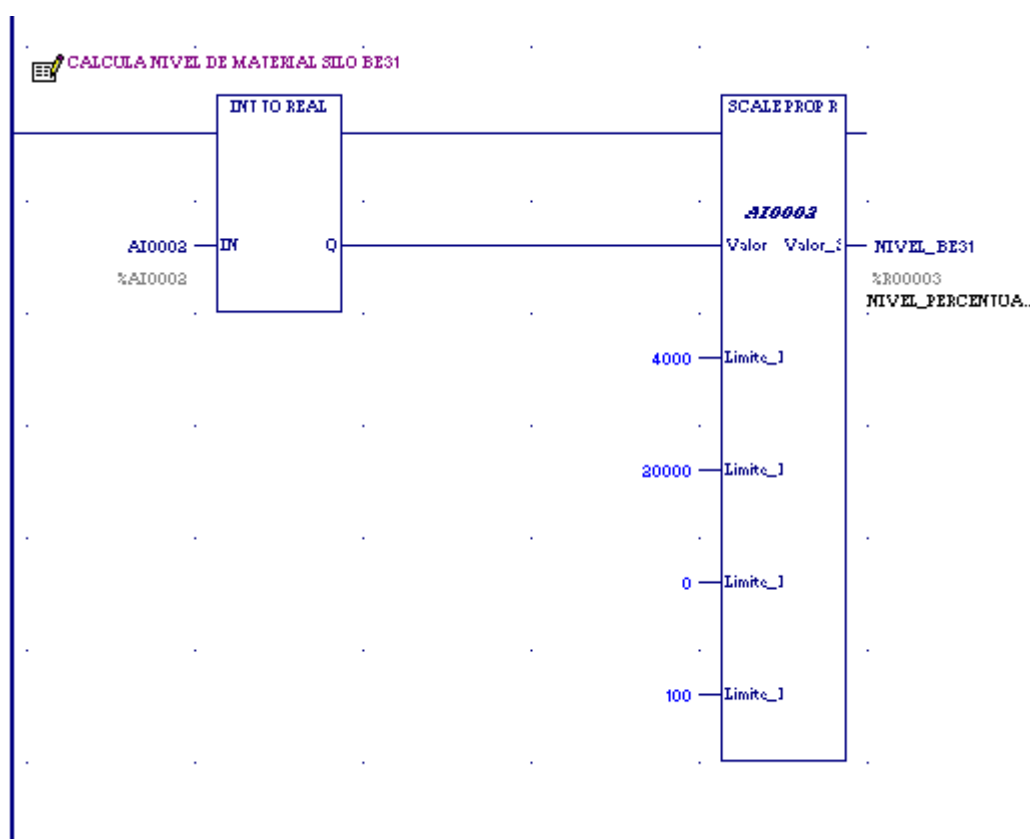
As variáveis de nível, altura, volume e peso são cruciais ao sistema, por meio delas as demais funções implementadas, intertravamentos e incremento e decremento de peso irão funcionar corretamente.

3.3.1 Nível

O processo consiste em receber o sinal do campo através do cartão analógico de entrada de corrente. Na aba "NIVEL", a lógica desenvolvida transforma esse sinal de corrente (variando de 4 a 20 mA) em um nível percentual correspondente (de 0 a 100%), refletindo o percentual ocupado do silo. Essa conversão é realizada de forma direta, onde 4 mA representa 0% e 20 mA representa 100% do silo.

Para realizar essa conversão, utilizou-se o bloco "SCALE PROP R". A saída deste bloco é uma variável real, que representa o nível calculado, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 - Programa de nível.



Fonte: Adaptador de: *Proficy Machine Edition 9.5*, 2025.

Após todas as etapas internas no bloco de função "SCALE PROP R", o bloco entrega em sua saída o valor escalonado seguindo todos os parâmetros

inseridos na entrada, a utilização deste bloco visa facilitar a mesma aplicação para outros blocos, além de simplificar o entendimento geral.

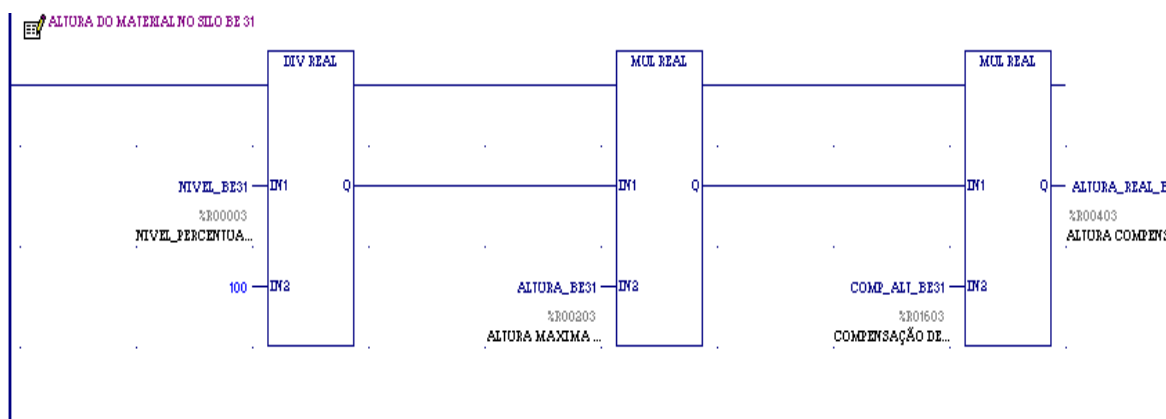
O valor do nível é uma variável de interesse da empresa para ser exibido no supervisório para monitoramento e controle do processo. O objetivo dessa exibição é para supervisionar o carregamento e descarregamento do silo, conhecimento do nível de ocupação do silo.

A próxima etapa no fluxo da lógica é a obtenção do valor da altura de material do silo, esta etapa possui um bloco de programa para esta finalidade.

3.3.2 Altura

Nesta etapa, o objetivo é adquirir o valor de altura de material em cada silo. Esse valor será utilizado para a obtenção de volume de material, peso, e outras aplicações. Para tal finalidade, se utiliza uma sequência de cálculos, que partem da variável com o valor de nível da etapa anterior, que visa obter e compensar o valor de altura de material no silo, ver Figura 15.

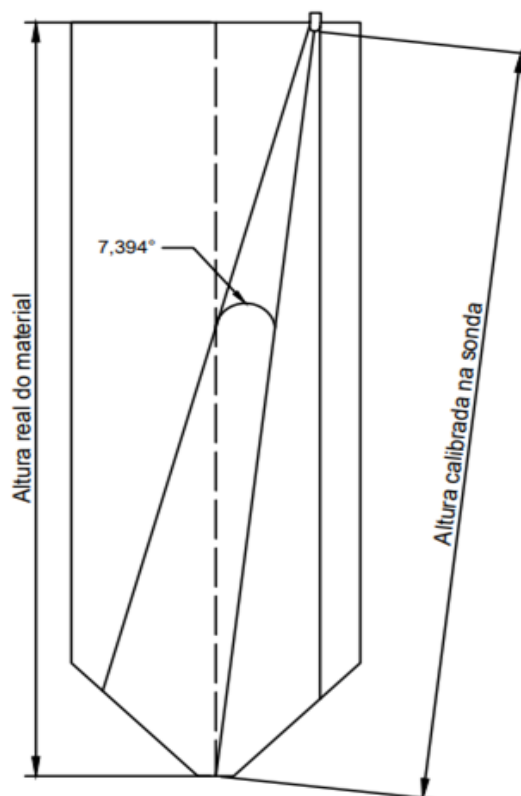
Figura 15 - Etapa de obtenção de altura.



Fonte: Adaptador de: *Proficy Machine Edition 9.5*, 2025.

A primeira etapa do cálculo, ocorre a divisão do valor de nível de material pela constante de valor 100, obtendo-se o valor nível por unidade (PU). Com este valor, realiza-se a multiplicação do valor em PU pelo valor de altura máxima configurada na sonda, e após, com o resultado obtido da multiplicação anterior, se realiza a compensação de posicionamento da sonda. Esses conceitos são ilustrados pela Figura 16.

Figura 16 - Instalação da sonda em ângulo no silo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A Figura 16, demonstra os conceitos de altura real do material e a altura configurada na sonda. A princípio, de acordo com o fabricante da sonda, é permitido um afastamento da sonda do centro do silo, o que implica o uso de inclinação na montagem da sonda. Caso seja necessário, uma constante de compensação de altura pode ser inserida para corrigir o uso de inclinação na sonda.

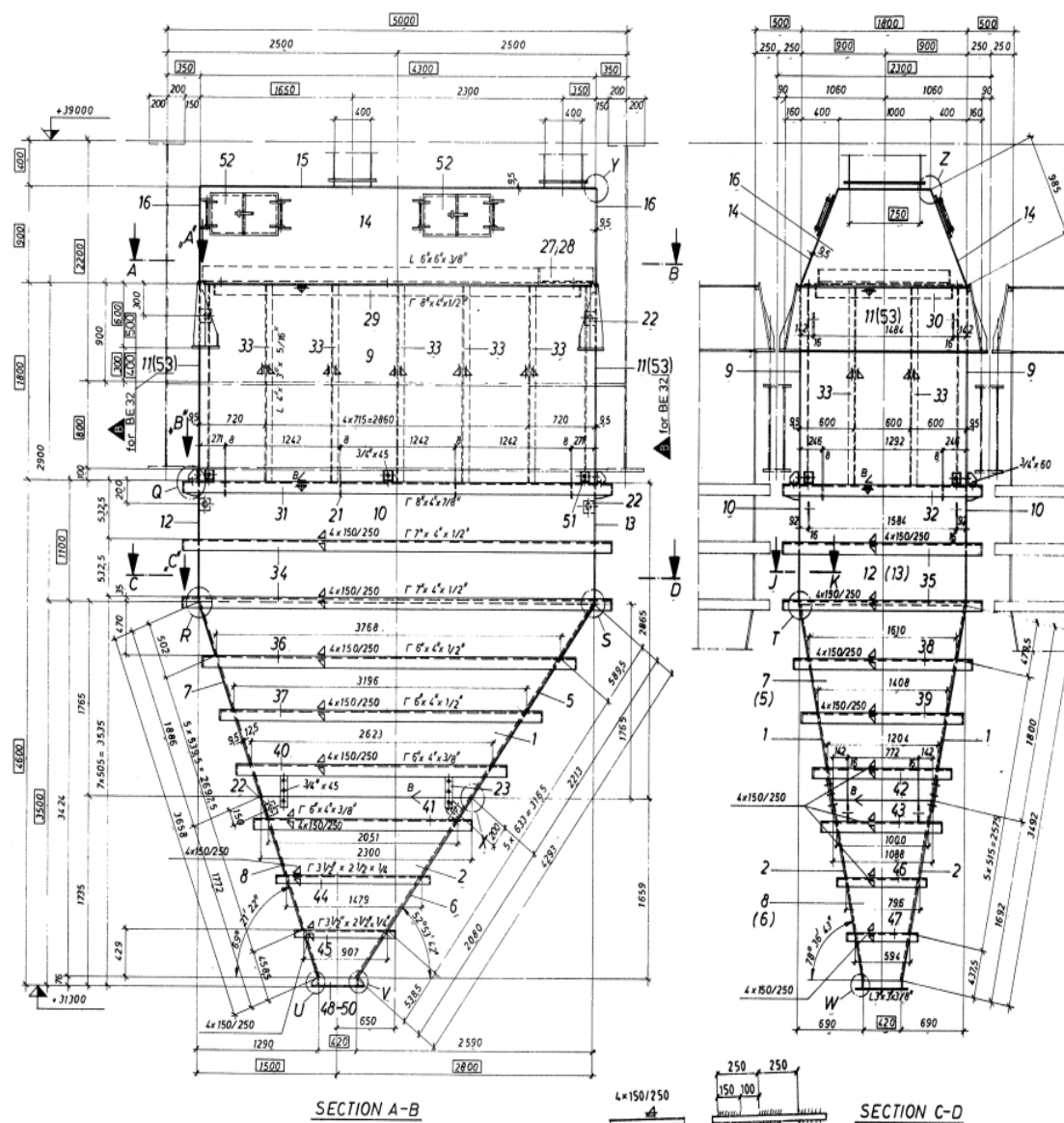
Após obter o valor de altura do material de cada silo, este valor será utilizado para o cálculo de volume do silo.

3.3.3 Função de volume

O objetivo desta etapa é adquirir o valor de volume de material em cada silo, a partir do valor de altura e funções matemáticas. Para tal, é necessária a modelagem matemática do volume do silo em função da altura, esta etapa será demonstrada a seguir e após, sua aplicação na lógica. Para tal demonstração, o silo 31 será utilizado, portanto, a mesma estrutura e sequência de passos é aplicada aos demais silos.

O silo 31, assim como os demais silos, possuem um formato irregular que não pode ser modelado por formatos geométricos usuais, ver Figura 17.

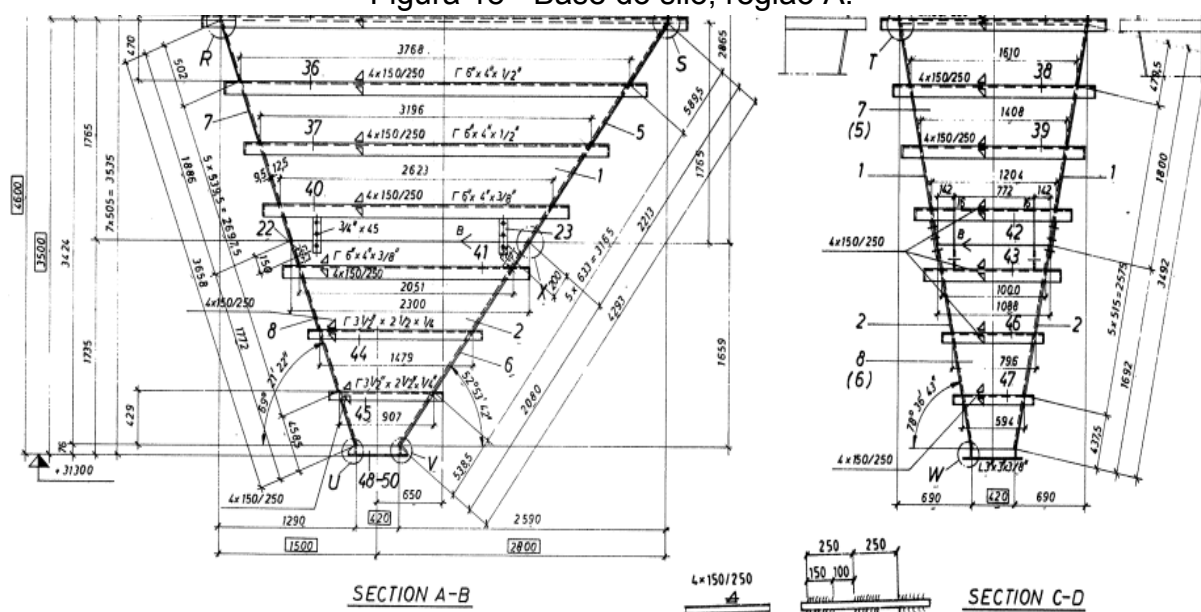
Figura 17 - Dimensões do silo.



Fonte: Acervo interno da Aperam (2024).

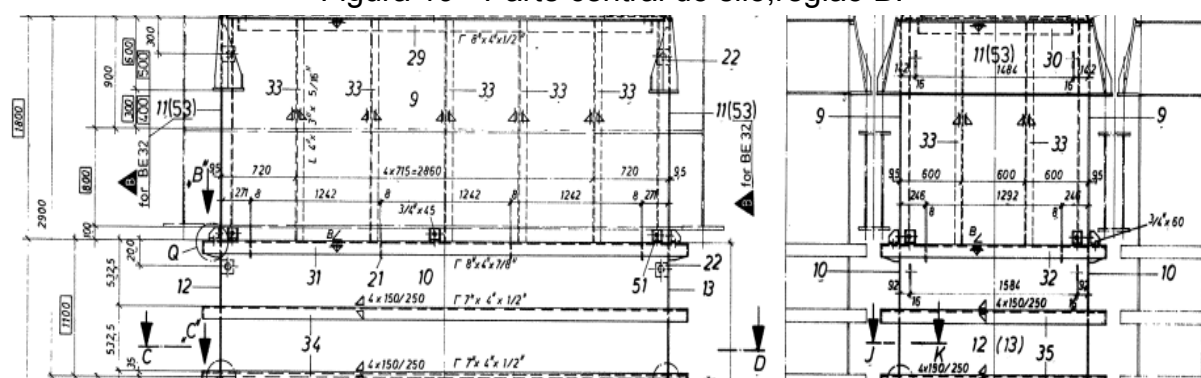
A Figura 17 é o desenho estrutural do silo 31 fornecido pela empresa, através dele é possível notar a irregularidade do silo em algumas regiões. Para simplificar o processo de modelagem, o silo foi dividido em três regiões, A, B e C, como mostram as figuras 18,19 e 20.

Figura 18 - Base do silo, região A.



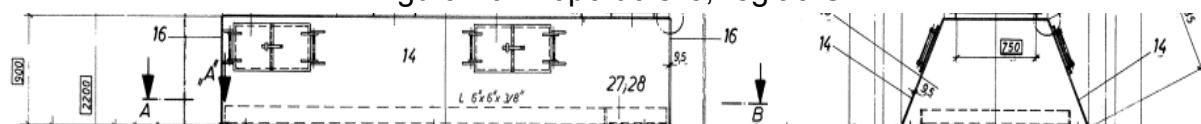
Fonte: Adaptado de: Acervo interno da Aperam (2024).

Figura 19 - Parte central do silo, região B.



Fonte: Adaptado de: Acervo interno da Aperam (2024).

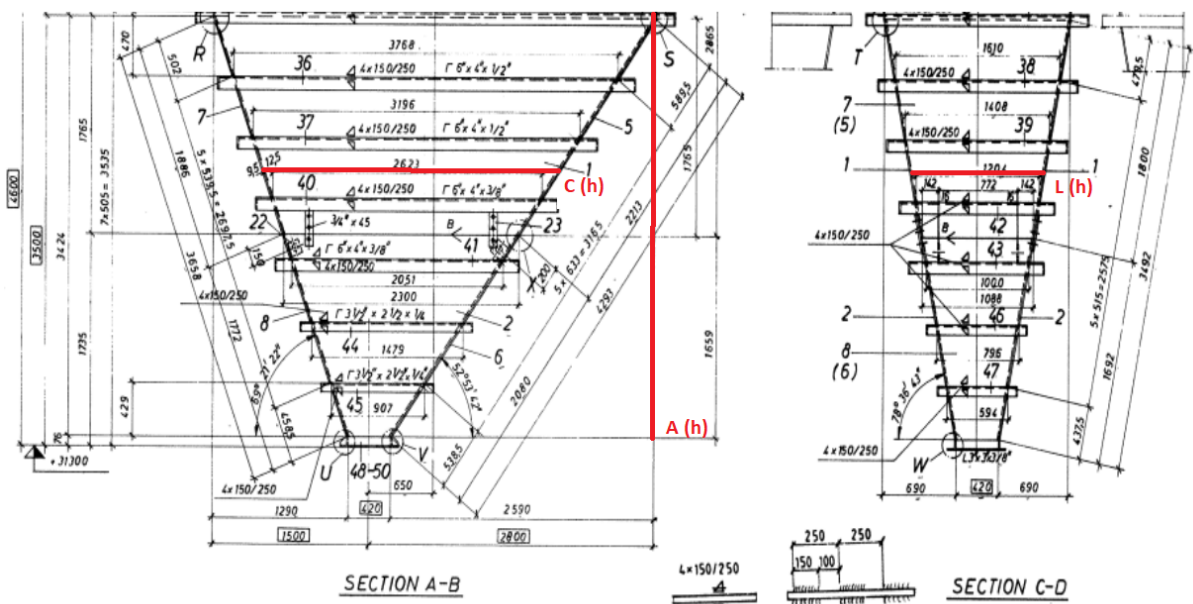
Figura 20 - Topo do silo, região C.



Fonte: Adaptado de: Acervo interno da Aperam (2024).

A primeira região modelada é a região A, que é um formato geométrico não comum. A primeira etapa é encontrar a equação de variação de tamanho em cada uma das três dimensões em função da altura (h), ver Figura 21 .

Figura 21 - Equações da região A.

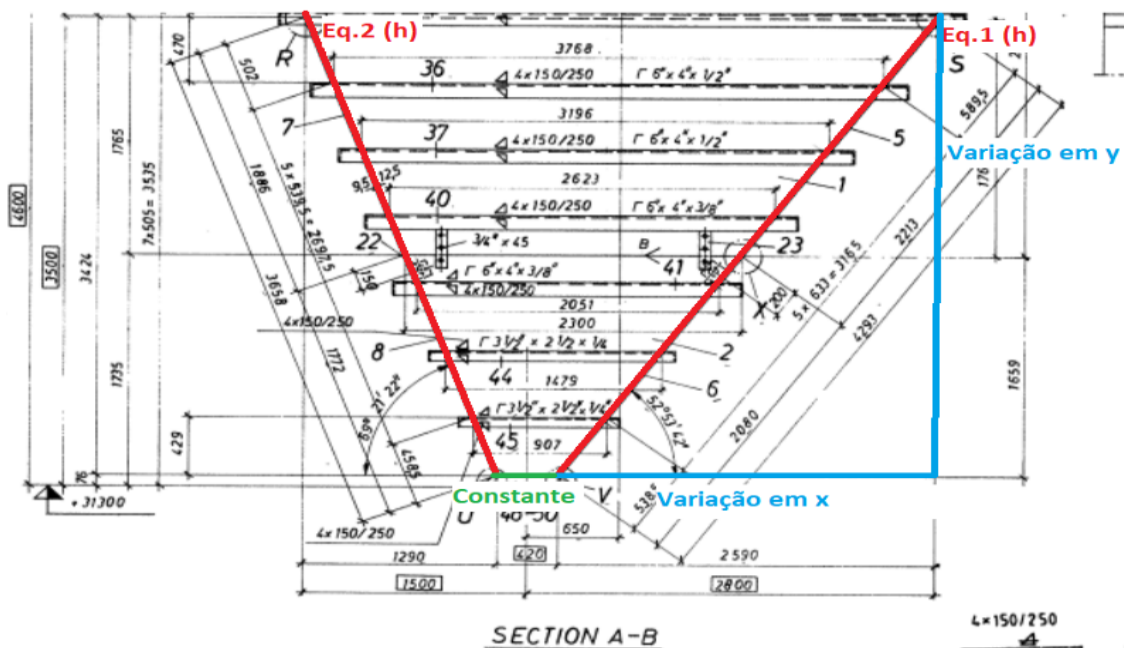


Fonte: Adaptado de: Acervo técnico da Aperam (2024).

As variações $C(h)$, $A(h)$ e $L(h)$, apresentadas na Figura 21, são levantadas em função de h da seguinte forma:

Para C (h) ocorre o levantamento das equações de reta das duas extremidades do silo, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 - Lateral da região A.



Fonte: Adaptado de: Acervo interno da Aperam (2024).

Portanto, a Eq.1 (h) pode ser adquirida com a seguinte fórmula:

$$Eq. 1 (h) = \frac{\Delta x}{\Delta y} \times h \quad (1)$$

Onde:

h = variável de altura.

Δx = variação do valor de x (m)

Δy = variação do valor de y (m)

Substituindo valores de cada variação, que se refere aos tamanhos em metros, a Eq.1 (h) fica da seguinte forma:

$$Eq. 1 (h) = 0,756425 \times h$$

Para a Eq. 2 (h), a mesma estrutura da Eq. 1 (h) é aplicada:

$$Eq. 2 (h) = \frac{\Delta x}{\Delta y} \times h \quad (2)$$

$$Eq. 2 (h) = 0,376752 \times h$$

Por fim a expressão da C (h) é escrita da seguinte forma:

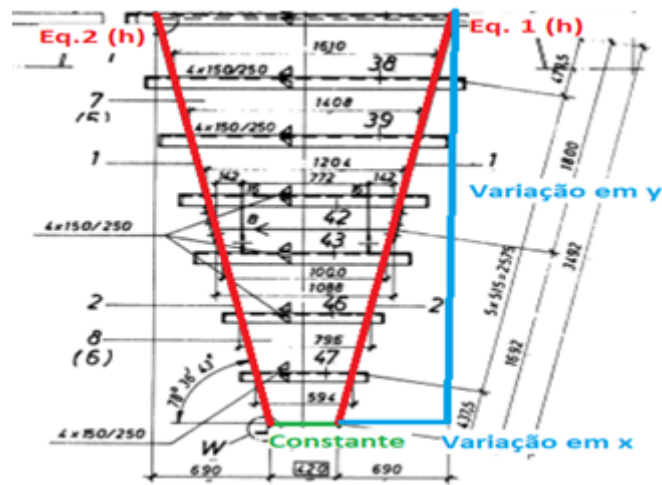
$$C (h) = Eq. 1 (h) + Eq. 2 (h) + Constante \quad (3)$$

A equação (3) descreve como obter a expressão C (h). Soma-se a Eq. 1 (h) com Eq. 2 (h) mais o valor da constante presente na Figura 22.

$$C (h) = 1,133177 h + 0,401$$

Após a obtenção da expressão C (h), para se levantar a expressão L (h), segue a mesma estrutura e sequência utilizada anteriormente.

Figura 23 - Frontal da região A



Fonte: Adaptado de: Acervo interno da Aperam (2024).

Portanto, tem-se a expressão de $L(h)$:

$$L(h) = 0,403037h + 0,401 \quad (4)$$

A última expressão indicada na Figura 22, $A(h)$, é a própria variável altura.

$$A(h) = h \quad (5)$$

O objetivo de se obter as funções $C(h)$ e $L(h)$ é que estas descrevem o comprimento e largura da região A para qualquer altura inserida na função. Assim como os demais sólidos, o produto entre o comprimento e a largura resulta em um valor de área, no caso, ainda em função da altura em qualquer ponto.

$$\text{Área}(h) = C(h) \times L(h) \quad (6)$$

$$\text{Área}(h) = 0,456712h^2 + 0,616022h + 0,160801$$

E ao se integrar a área em relação à altura, é possível expressar o volume para qualquer valor de altura dentro da região A. A equação ficaria da seguinte forma:

$$\int_0^{\text{Altura}} \text{Área}(h) = \int_0^{\text{Altura}} (0,456712h^2 + 0,616022h + 0,160801)dh \quad (7)$$

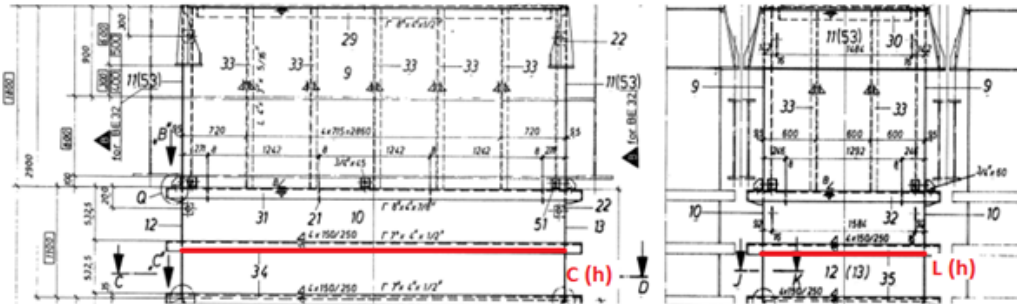
$$\text{Vol. A}(h) = \int_0^h (0,456712h^2 + 0,616022h + 0,160801)dh$$

$$\text{Vol. A}(h) = 0,152237h^3 + 0,308011h^2 + 0,160801h \quad (8)$$

A Equação 8 descreve o valor de volume, em metros cúbicos, para qualquer valor de altura dentro da região A. Devido a essa limitação, tem se a necessidade de levantar as funções de volume para a região B e C e definir seus intervalos de atuação.

Partindo para a região B, Figura 19, o silo tem um formato de bloco sólido, o que simplifica a aquisição da função volume região B. Da mesma forma que a região A, é necessário se obter comprimento e largura em função da altura, como ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Região B.



Fonte: Adaptado de: Acervo interno da Aperam (2024).

Tais equações são descritas da seguinte forma:

$$C(h) = 4,281 \quad (9)$$

$$L(h) = 1,781 \quad (10)$$

Ambas as equações apresentam valores constantes pois não há variação do comprimento e largura em função da altura. Da mesma forma que a região A, o

produto entre o comprimento e a largura resulta em um valor de área, constante para toda a região B, como descrito na equação (11) a seguir.

$$\text{Área}(h) = C(h) \times L(h) \quad (11)$$

$$\text{Área}(h) = 7,624461$$

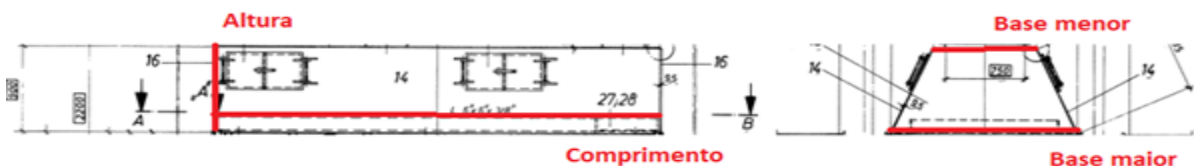
Prosseguindo com a sequência de operações, integrando ambos os lados, a fim de obter volume, a função resulta em:

$$\text{Vol. } B(h) = 7,624461h \quad (12)$$

Com a função de volume da região A e B em posse, resta agora definir a função referente à região C e os intervalos de atuação.

Para a região C, o formato do silo se assemelha a um prisma trapezoidal, ilustrado na Figura 25, o que simplifica a aquisição da função de volume.

Figura 25 - Região C.



Fonte: Adaptado de: Acervo interno da Aperam (2024).

A primeira etapa é encontrar a variação da largura em função da altura, como feito anteriormente, demonstrado abaixo:

$$\text{Variação de largura} = \frac{\text{Base menor} - \text{Base maior}}{\text{Altura final} - \text{Altura inicial}} \times h \quad (13)$$

$$\text{Variação de largura} = -0,888889h$$

Em função da altura:

$$L(h) = -0,888889h + \text{Base maior} \quad (14)$$

$$L(h) = -0,888889h + 1,781$$

O comprimento por sua vez não apresenta variação em função da altura, sendo constante em qualquer ponto. A área dessa região do silo é dada por:

$$\text{Área}(h) = C(h) \times L(h) \quad (15)$$

$$\text{Área}(h) = 4,3 \times (-0,888889h + 1,781)$$

$$\text{Área}(h) = -3,822223h + 7,6583$$

Com a função de área em mãos, basta integrar em relação a altura para resultar na função volume.

$$\text{Vol. } C(h) = -1,911112h^2 + 7,6583h \quad (16)$$

Por fim, com as funções de cada região adquirida, se define os limites de aplicação de cada função. Para facilitar a visualização, a Tabela 3 apresenta as funções, região de aplicação para alguns silos do AOD-L.

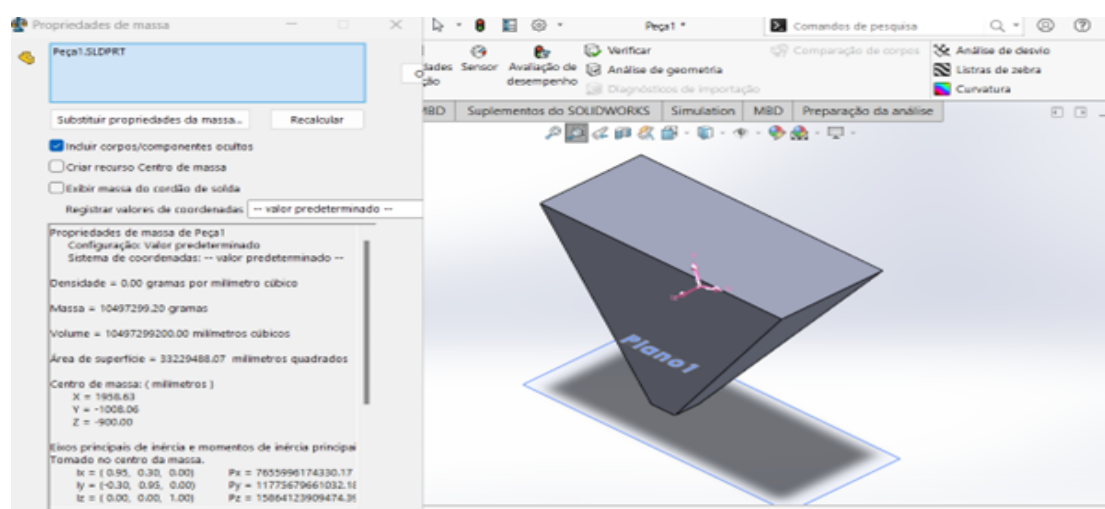
Tabela 3 - Funções das regiões de alguns silos do AOD-L.

Silo	Região A	(h) em metros	Região B	(h) em metros	Região C	(h) em metros
30	$0,2137h^3 + 0,641h^2 + 0,3525h$	0 a 2,75	$1,1315h^2 + 9,46h$	2,75 a 4,9	$14,405h$	4,9 a 8,2
31	$0,152237h^3 + 0,308011h^2 + 0,160801h$	0 a 3,424	$7,624461h$	3,424 a 6,4	$-1,911112h^2 + 7,6583h$	6,4 a 7,3
39	$0,035338h^3 + 0,262206h^2 + 0,337561h$	0 a 1,8	$1,6254h$	1,8 a 7,5	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A modelagem matemática foi validada com o software de desenho *SolidWorks*. Comparando o volume obtido através das funções matemáticas e o volume absoluto encontrado na representação 3D do desenho. Esta validação assegurou a precisão do cálculo, fornecendo uma verificação sólida da metodologia empregada para determinar o volume dos silos. Essa abordagem, combinada com a modelagem precisa no *SolidWorks*, Figura 26, garantiu uma análise confiável do volume dos silos.

Figura 26 - Montagem da região A do silo 31 no *SolidWorks*.



Fonte: *SolidWorks*, 2025

Para fins de averiguação, a comparação de volume encontrado no cálculo para a região A e o valor encontrado no *SolidWorks* em alguns silos está apresentado na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 - Comparação do valor calculado com o *SolidWorks*.

Silo	Região A Volume Calculado (m³)	Região A Volume Solid Works (m³)	Erro %
31 a 33	10,27276	10,497299	-2,139016903
41 a 44	2,11856	2,097619	0,9983223836

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

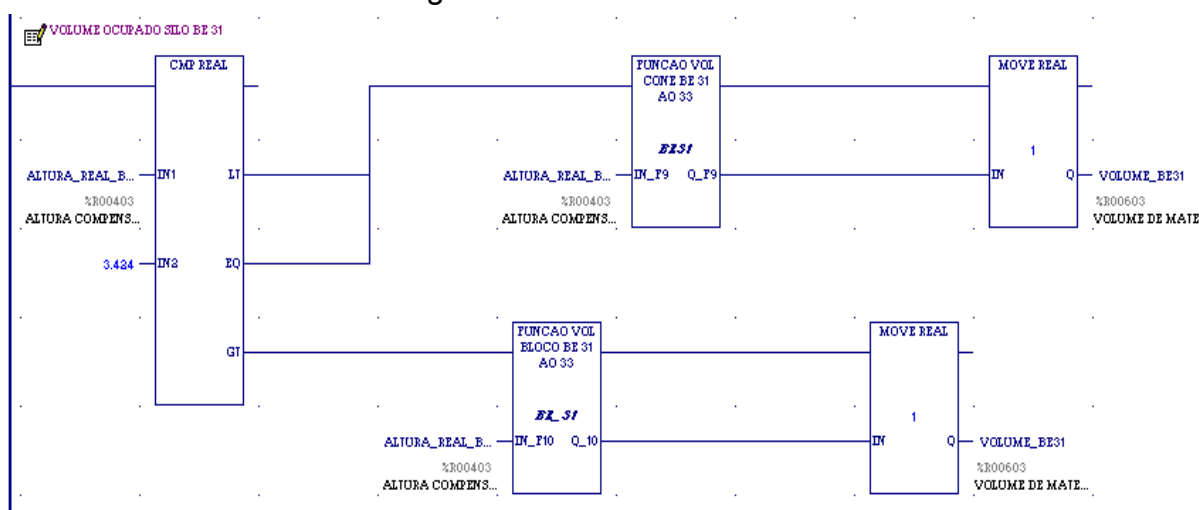
Como mostrado na Tabela 4, o valor de erro encontrado para alguns silos na comparação é menor que 3 %, o que para a aplicação é aceitável.

Após o levantamento e validação das funções, a próxima etapa é a implementação das funções para cada silo na lógica.

3.3.4 Implementação da função de volume

Para a definição do volume de material presente em cada silo, utiliza-se o limite de aplicação de cada função através de comparação de valores, como mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Bloco de volume.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Na Figura 17, o bloco “CMP REAL”, é responsável por comparar o valor de altura proveniente da variável de altura da etapa anterior, com o valor ajustado que delimita a região A. Caso o valor de altura seja maior, habilita a linha de lógica do bloco de função, que contém os cálculos referentes às regiões acima da região A. Caso o valor de altura seja menor ou igual a 3,424, no caso do silo 31, habilita a linha de lógica que contém o bloco de função que calcula o volume da região A.

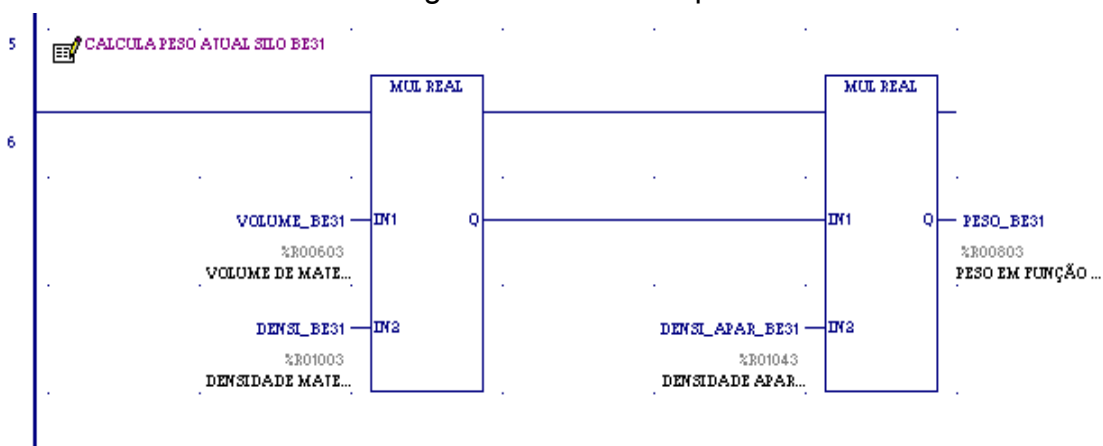
Internamente, o bloco de função possui uma sequência de operações que resultam no valor de volume de material presente no silo, com base na altura e na implementação da função da região A.

O objetivo nessa lógica é fazer com que a linha que está habilitada substitua o valor na variável de volume do silo, para que dessa forma, utilize-se apenas uma variável que contenha o valor de volume para qualquer ponto do silo.

3.3.5 Peso

A etapa peso é responsável por entregar o valor de peso de material para cada silo. Para tal, realiza-se a multiplicação de três variáveis, a densidade do material, fornecida pelo sistema via comunicação com outros CLP's, o volume de material e a densidade aparente em relação a densidade fornecida, esta que é obtida por testes e retrata com precisão o valor de densidade, conforme mostra a Figura 28.

Figura 28 - Bloco de peso



Fonte: Adaptador de: *Proficy Machine Edition 9.5*, 2025.

A variável “VOLUME_BE31” é o resultado de todas as etapas realizadas anteriormente, que abriga o valor de volume de material em metros cúbicos. A variável “DENSI_APAR_BE31” é um valor ajustável de inserção manual, que terá seu valor definido no capítulo de implementação e ajustes. A variável “DENSI_BE31” é obtida via comunicação com outros CLP's.

Para o sistema a ser implementado, o interesse em ser realizar uma comunicação, para obter o valor de densidade, com outro sistema que já está em execução, é pela dinâmica de alteração de material nos silos, ou seja, os valores de densidade podem ser alterados no sistema já em execução, que também serão alterados no sistema a ser implementado.

Essa dinâmica de comunicação é feita do CLP que será implementado para o CLP em uso utilizando uma comunicação de leitura de variáveis interessadas.

Com os valores obtidos da densidade de material de cada silo, a etapa peso é facilmente realizada, esta que realiza os cálculos individualmente para cada silo e atribui esse valor a variável peso correspondente.

Após a obtenção do peso de material em cada silo, as etapas consideradas cruciais estão concluídas, dando abertura para outras funções complementares, como intertravamento por nível e peso, incremento e decremento de peso, e erro da sonda.

3.3.6 Intertravamento por Nível.

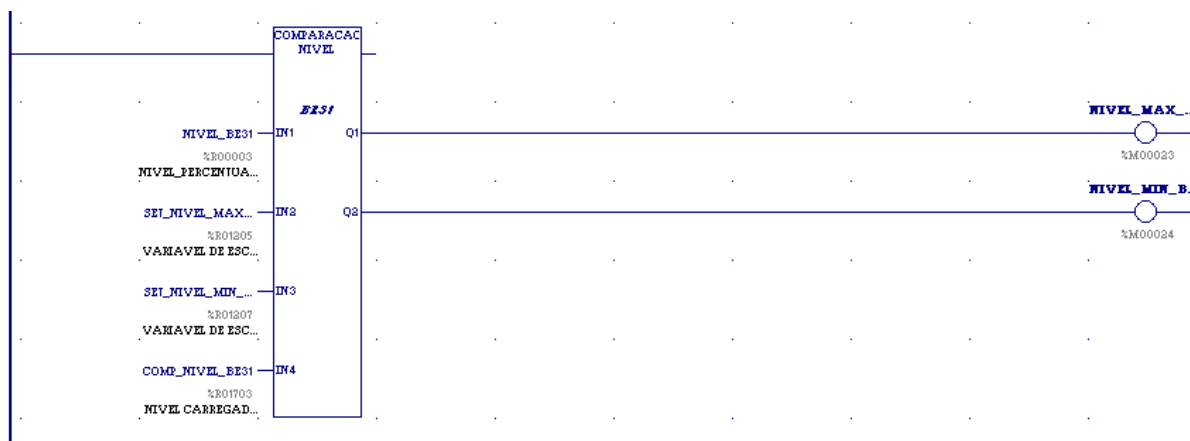
A etapa complementar intertravamento por nível tem como objetivo solicitar a parada de carregamento seguindo alguns critérios, além de solicitar o carregamento do silo.

Para realizar a solicitação de parada de carregamento, os critérios utilizados serão o valor máximo de nível no silo, definido pelo usuário, seguido de uma compensação de nível que visa compensar a dinâmica de parada da TC 1.

A solicitação de carregamento do silo obedece a um valor, também definido pelo usuário, de nível mínimo de material do silo, que quando atingido entrega ao sistema de abastecimento externo que o silo está em nível mínimo.

Estas duas solicitações, nível máximo e nível mínimo, são atribuídas a duas variáveis na etapa de intertravamento, ver Figura 29.

Figura 29 - Etapa de intertravamento de nível.



Fonte: Adaptador de: *Proficy Machine Edition 9.5*, 2025.

O bloco de comparação é o bloco de função responsável por realizar os ajustes e comparações necessárias para habilitação das indicações de nível máximo ou mínimo. Exteriormente a esse bloco, existem quatro entradas onde são inseridos registros necessários ao bloco de função: o de nível atual do silo; o nível máximo e

mínimo desejado pelo usuário e o nível de compensação da dinâmica de parada da TC 1.

A compensação da dinâmica de parada da TC 1 ocorre pelo fato de que a correia transportadora ainda carrega material mesmo após o pedido de parada, ou seja, para não ficar com material sobre a correia, esta realiza uma volta completa em seu percurso e por se tratar de um percurso considerável, esse material remanescente sobre a correia pode causar transbordamento caso o nível máximo configurado do silo esteja próximo de 100%.

Para evitar tais ocorrências, se subtrai um valor de nível obtido em testes para essa compensação, ou seja, caso o usuário insira um valor de nível máximo de 90%, ao se subtrair a compensação, o nível que irá ocorrer o pedido de parada será 85%, por exemplo, para que desta forma os 5% restante sejam carregados na volta que a correia realiza após o pedido de parada.

Além disso, internamente ao bloco de comparação, existem etapas e correções que visam acertar alguns erros que possam ocorrer durante a inserção do valor definido pelo usuário do supervisório, por exemplo, correção para valores abaixo de 0% ou acima de 100% automaticamente são substituídos por valores aceitáveis.

3.3.7 Intertravamento por peso

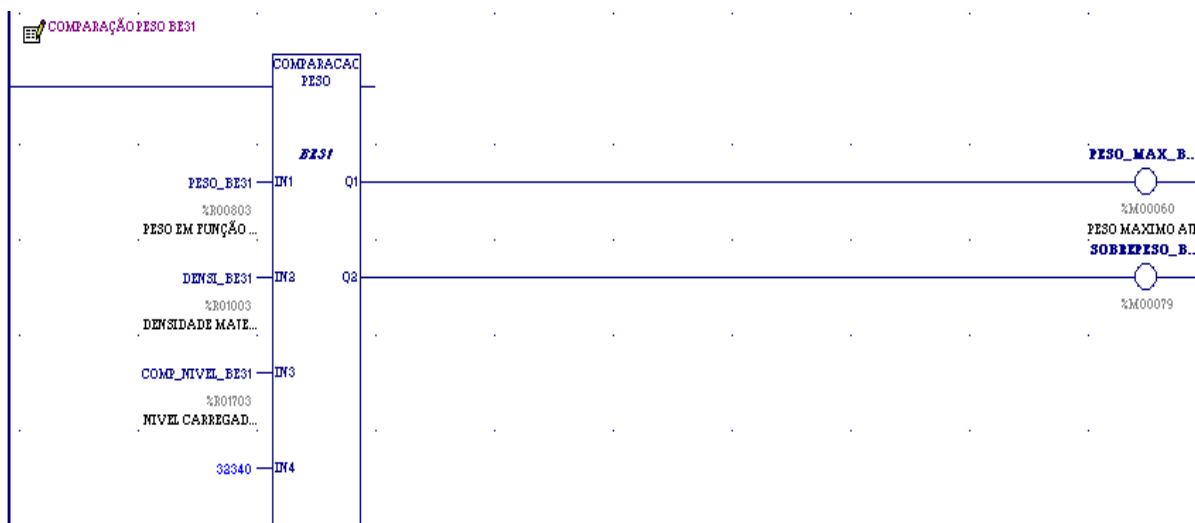
Outro intertravamento implementado é o intertravamento por peso de material do silo, impedindo que o silo supere o peso máximo do projeto e o peso desejado. Para tal objetivo a seguinte estrutura foi implementada na lógica, conforme mostra a Figura 30.

Exteriormente ao bloco, em suas quatro entradas estão as variáveis de peso atual do silo, densidade de material, compensação de nível, e peso máximo de projeto do silo. Essas quatro variáveis são utilizadas internamente ao bloco para cálculos e definição de parâmetros.

Nas duas saídas do bloco estão conectadas a variável indicadora de peso máximo do silo atingido e outra variável indicadora de sobrepeso no silo. A variável indicadora de peso máximo atingido é um endereço a ser lido pelo CLP do abastecimento externo, de tal forma que execute a parada de abastecimento quando

a bobina for energizada. A bobina de sobrepeso é um aviso a ser mostrado para o operador, indicando necessidade de ajuste da compensação de nível.

Figura 30 - Etapa de intertravamento de peso.



Fonte: Adaptador de: *Proficy Machine Edition 9.5*, 2025.

A fim de evitar sobrepeso ou peso acima do desejado, internamente ao bloco se realiza uma compensação de peso para a dinâmica de parada da TC 1. De forma análoga ao mostrado anteriormente, utilizando a mesma variável de compensação de nível, será utilizada para se obter um valor de peso batente.

O peso do batente definido será comparado ao peso atual, quando este for atingido será enviado o pedido de parada de carregamento.

Além disso, o peso atual do silo será constantemente comparado com o peso máximo de projeto do silo, na ocasião em que ocorrer sobrepeso, será enviado um aviso requisitando ajustes na compensação.

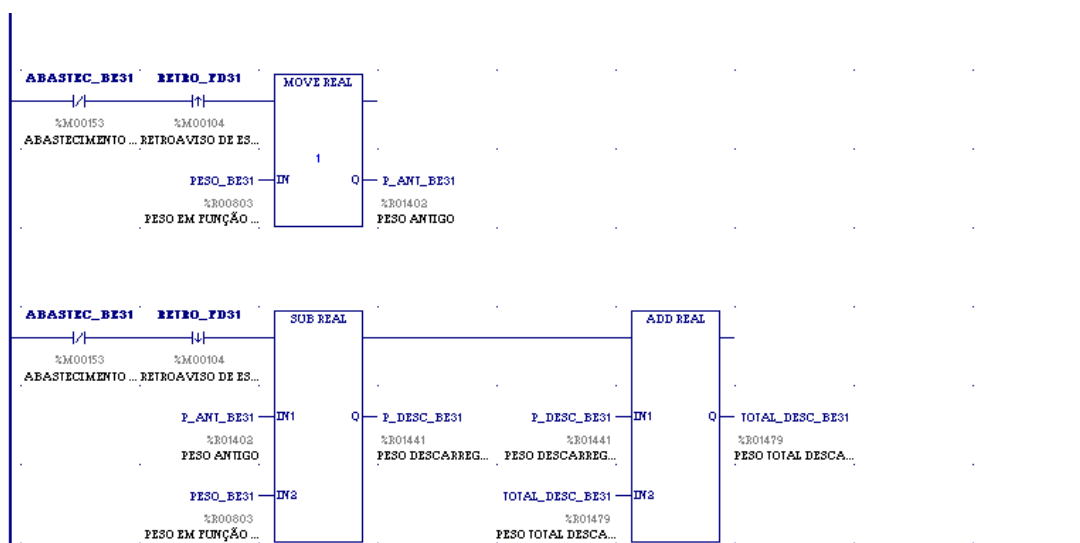
Por fim, os intertravamentos por nível e peso realizam um controle e proteção do uso do silo, cercando possíveis cenários que coloquem a integridade estrutural do silo em risco, contribuindo para uma melhor eficiência em seu uso.

Em etapas complementares, outra função a ser realizada pela sonda é o incremento e decremento de peso. Essa função irá auxiliar o processo de produção diretamente, pois irá apresentar dados de interesse da empresa. Por se tratarem de lógicas semelhantes, o incremento e decremento serão detalhados simultaneamente.

3.3.8 Incremento e decremento de peso

O objetivo desta etapa é obter o valor carregado e descarregado dos silos, assim como um acumulativo por período que pode ser zerado de acordo com o interesse do usuário. Para tal objetivo, a seguinte estrutura é implementada na lógica, como mostra a Figura 31.

Figura 31 - Bloco de decremento de peso



Fonte: Adaptador de: *Proficy Machine Edition 9.5*, 2025.

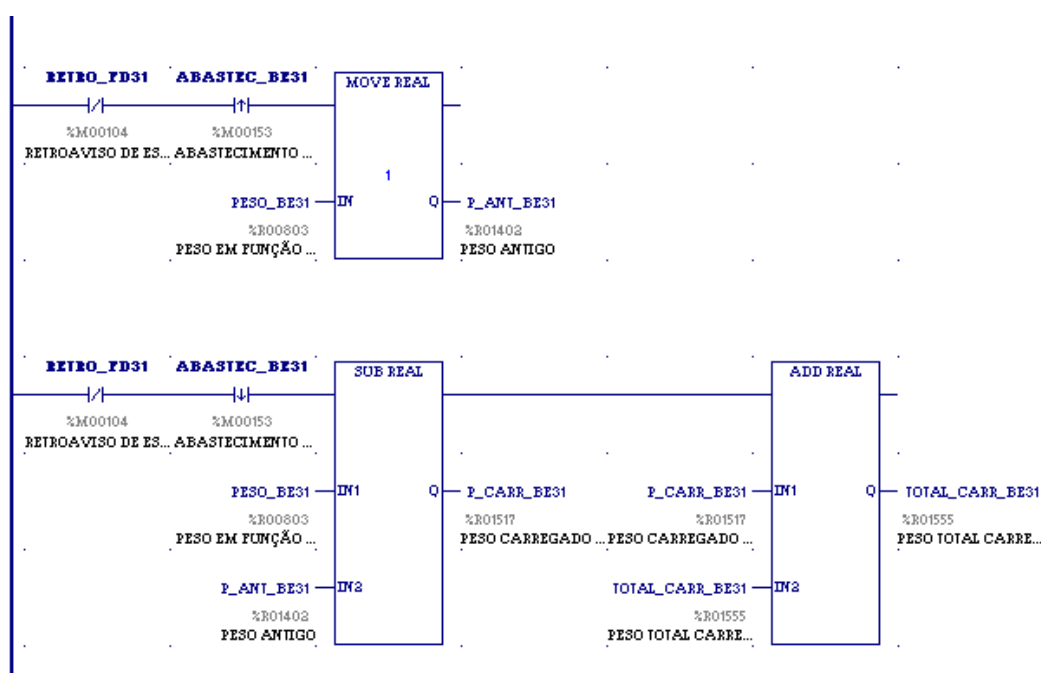
Para tal implementação é necessário a aquisição da variável de estado “em carregamento” do silo e a variável de “descarregamento do silo”, ambas adquiridas via comunicação com outros CLP’s. A primeira variável citada se refere ao abastecimento do silo em andamento, emitido pelo CLP do abastecimento externo. A segunda variável se refere ao retroaviso de estado ligado do vibrador de descarga do silo. Essas variáveis definem as condições de funcionamento da lógica, indo de acordo com as limitações de uso.

As limitações que esta função traz é a impossibilidade de mensurar o peso em um cenário onde se descarrega e abastece o silo simultaneamente, cenário este onde a sonda não computa as variações de nível, o que é primordial para esta função.

A lógica da Figura 31, realiza o armazenamento do peso atual do silo em uma variável auxiliar no início do descarregamento do silo, definido pela energização do vibrador de descarga que está atrelado a um contato de borda de subida. A

escolha do contato de borda de subida ou descida é para que no instante da mudança de estado todas as ações da linha da lógica sejam realizadas. Ao fim da descarga de material, desligamento do vibrador, atrelado a um contato de borda de descida, realiza-se a diferença entre o peso atual e o peso guardado na variável auxiliar. Esta diferença se refere ao peso descarregado no silo, que será adicionado ao montante de total descarregado. Seguindo a mesma estrutura, o incremento de material é implementado, ver Figura 32.

Figura 32 - Bloco de incremento de peso.



Fonte: Adaptador de: *Proficy Machine Edition 9.5*, 2025.

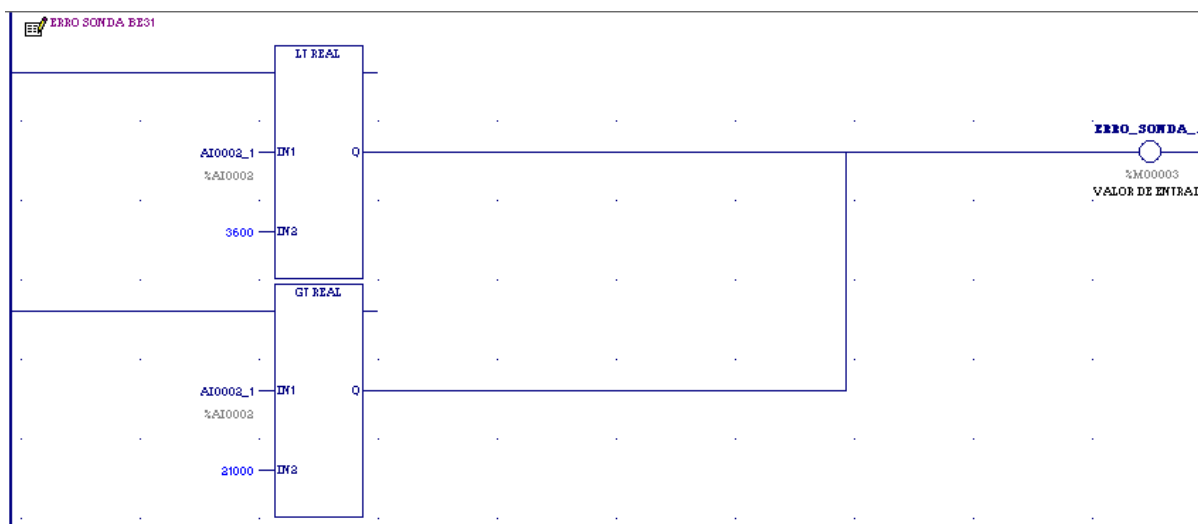
Para se apagar o total acumulado, será disponibilizado ao usuário um registro que permite acionar essa função. Na lógica, a ação que ocorre é a movimentação da constante 0 para o registro de total acumulado, reiniciando assim o valor.

Por fim, as variáveis de peso incrementado e decrementado, assim como seus acumulados, contribuem diretamente ao controle de processo, sendo uma fonte de informação do total de material carregado e descarregado em determinado período.

3.3.9 Erro de Sonda

A etapa complementar erro de sonda visa detectar erros de funcionamento da sonda. De acordo com o manual do fabricante da sonda VEGA (2025), em caso de erro, a corrente de saída da sonda apresenta valores abaixo de 3,6 mA e acima de 21 mA. Com essa informação, e a fim de atingir o objetivo da etapa, a lógica implementada compara o valor de corrente recebido pela sonda com esses dois limites definidos. Caso o valor de corrente esteja fora do intervalo assume-se um cenário de erro da sonda, atuando a variável que está atrelada a indicação de erro de sonda.

Figura 33 - Bloco de erro da sonda.



Fonte: Adaptador de: *Proficy Machine Edition 9.5*, 2025.

A indicação de erro será uma variável disponível ao usuário para indicação de erro em alguma sonda, sendo necessária a atuação da manutenção.

Portanto, as etapas que foram detalhadas visam realizar as funções requisitadas utilizando o sinal proveniente da sonda para tal. Essas funções apresentam variáveis pertinentes a serem utilizadas pela empresa para uso e conhecimento do usuário que esteja operando.

3.4 Dimensionamento do circuito de alimentação

Todos os componentes utilizados serão instalados em painel presente em área, além dos dispositivos já citados, nesse painel também contará com uma tomada de serviços, um ponto de iluminação, um transformador de 220/110 V para suprir as cargas em 110 V.

O dimensionamento do circuito de alimentação das sondas foi realizado a partir das cargas a serem alimentadas. Ao total, para a fonte de 24 Vcc serão 34 sondas e 3 cartões analógicos IC694ALG233, a fim de aproveitamento, o projeto elétrico engloba a instalação das sondas de outro equipamento adjacente. As cargas a serem consideradas para cálculo estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Quadro de cargas para a fonte de 24 Vcc

Quadro de cargas - Fonte 24 Vcc			
Componente	Quantidade	Potência Nominal (VA)	Potência Total (VA)
Cartão analógico	3	1,56	4,68
Sondas	34	0,485	16,49
			21,17

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A potência nominal do cartão analógico foi verificada no Manual GFK-2718A, da fabricante PAC Systems (2025), que traz dados técnicos referentes à instalação e uso do cartão analógico IC694ALG233. Para as sondas, a potência nominal foi verificada no manual de instruções Vegapuls 31, fornecido pela fabricante VEGA.

Portanto, considerando os cartões e as sondas, a potência a ser fornecida pela fonte de 24 Vcc será de 21,17 VA. Por oportunidade, a fonte 24 Vcc a ser utilizada será de 75 VA de saída, que supre os 21,17 VA previstos e permite expansões futuras.

Após a definição da fonte 24 Vcc, o próximo a ser definido é a potência do trafo de 220/110 V que irá alimentar a fonte de 24 Vcc e outros componentes. A seguir, na Tabela 6, estão apresentadas as cargas a serem supridas pelo trafo.

A fonte de 24 Vcc, possui potência de entrada de 276 VA, em 110 V, dados de placa da fonte.

A fonte do CLP, modelo IC695PSA140H, da fabricante GE, possui potência de entrada de 70 W. Considerando um fator de potência de 0,85, o valor de potência solicitada pela fonte do CLP seria de 82,4 VA, valor utilizado para dimensionar o fornecimento.

A instalação de uma tomada de serviços, visa contribuir com o uso de equipamentos para a realização de serviços, assim como a iluminação para uma melhor visualização e realização de serviços dentro do painel. Para a tomada de serviços, a escolha de 1100 VA está de acordo com a ABNT (2008), que prevê, no mínimo, um ponto de tomada de 1000 VA. A iluminação considerada de 100 VA prevê a instalação de lâmpada no painel.

Tabela 6 - Quadro de cargas para o Trafo

Quadro de cargas - Trafo 220/110 V			
Componente	Quantidade	Potência Nominal (VA)	Potência Total (VA)
Fonte 24 Vcc	1	276	276
Fonte CLP	1	82,4	82,4
Tomada de serviços	1	1100	1100
Iluminação	1	100	100
			1.558,4

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Portanto, a potência a ser fornecida pelo trafo será a soma de todos os componentes, no valor de no mínimo 1558,4 VA.

O trafo a ser utilizado será de 2000 VA de potência de saída, visto que supre a potência e permite expansão caso necessário.

3.4.1 Dimensionamento de condutores e proteção.

Para o dimensionamento de condutores, os critérios utilizados foram de ampacidade, capacidade de curto-circuito e queda de tensão quando cabível.

Para curto-circuito, utilizou o valor de corrente de curto-circuito presumida no secundário do trafo 220 / 110V. Por não ter o modelo de transformador definido, o valor de impedância considerado será de 3%, sendo um valor para conhecimento da corrente de falta.

De acordo com Mamede (2017), a corrente de curto-circuito presumida no secundário do trafo pode ser definida por:

$$I_{cc} = \frac{I_n}{Z_{pt\%}} \times 100 \text{ (A)} \quad (17)$$

Onde:

I_{cc} = Corrente de curto presumida (A)

I_n = Corrente nominal de saída do trafo (A)

$Z_{pt\%}$ = Impedância percentual do trafo

Portanto, para um trafo de 2000 VA, a corrente nominal I_n será de 18,18 A, com uma impedância de 3%, sendo uma estimativa, resulta em uma corrente de curto-circuito presumida de 606,06 A. Sendo assim, todos os dispositivos de proteção devem ter a capacidade de interrupção de no mínimo 3 kA, um valor bem superior à corrente estipulada e um valor comercial.

Os condutores utilizados para a alimentação e sinal das sondas radar serão selecionados com base na proteção de curto-circuito e a capacidade de condução de corrente nos métodos de instalação.

A corrente nominal de cada sonda é aproximadamente 20 mA, portanto um fusível rápido de 32 mA modelo FRD1000.032, e capacidade de interrupção de 35 A, fusível escolhido do catálogo da fornecedora DCA IRTA (2024), será suficiente para a proteção da sonda radar. A capacidade de corrente de saída da fonte de 24 Vcc é de 3,125 A e, em caso de curto-circuito em alguma das sondas, essa corrente de 3,125 A atuará em um tempo máximo de 20 ms.

Para a escolha do condutor, o critério de curto-circuito utilizado será de acordo com a NBR 5410, que apresenta a seguinte fórmula:

$$I^2 \times t \leq k^2 \times S^2 \quad (18)$$

Onde:

I = corrente de curto-circuito (A)

t = tempo que estará submetido o condutor a essa corrente (s)

K = constante que depende da isolação do condutor

S = seção do condutor em mm²

A corrente utilizada será de 3,125 A, corrente de saída da fonte 24 Vcc, em um tempo de 20 ms, tempo de atuação do dispositivo de proteção, a constante K de 115, valor fornecido pela ABNT (2008), para tal, a seção mínima do condutor deve ser de 0,004 mm².

Outro critério analisado será o de capacidade de condução de corrente nas condições de instalação.

$$I_B = \frac{I_p}{K_1 \times K_2 \times K_3} \quad (19)$$

Onde:

I_B = Corrente equivalente (A)

I_p = Corrente de projeto (A)

K₁ = Fator de correção de temperatura

K₂ = Fator de agrupamento de circuitos

K₃ = Fator de resistividade do solo

Para uma corrente de 20 mA, com fator de correção de temperatura para 40° C, 0,87, e fator de agrupamento de circuitos de 0,38 para 34 circuitos. O outro fator de resistividade do solo será considerado 1, pois não há interferência do solo.

Portanto, para fins de seleção, a corrente de 0,06 A, terá de ser suportada pelo condutor no método de instalação B1.

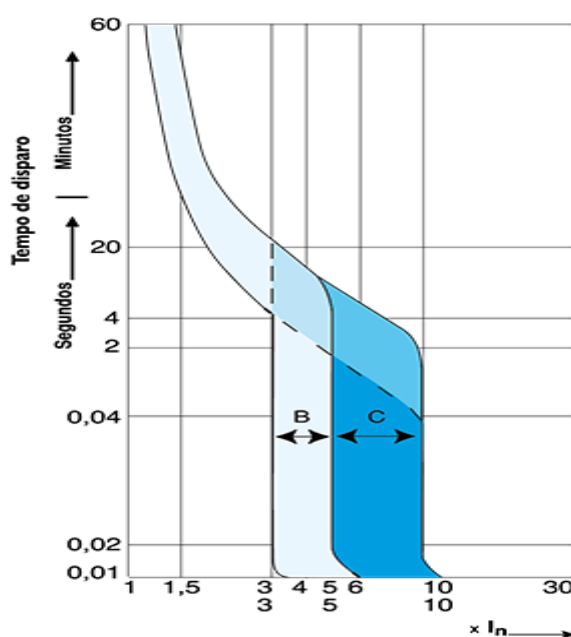
O condutor escolhido será de 1 mm^2 , que está de acordo com a seção mínima de condutores de sinalização e controle exigido pela ABNT (2008), e se trata de um padrão utilizado pela empresa.

A queda de tensão nesse circuito será desconsiderada pois o funcionamento da sonda permite uma tensão de 12 a 24 V para funcionamento.

Os cartões analógicos, assim como as sondas, também serão alimentados pela fonte de 24 Vcc. O condutor escolhido será de 1 mm^2 , seguindo os mesmos parâmetros de escolha para as sondas.

A fonte de 24 Vcc possui corrente nominal de entrada de 2,51 A em 110 Vca. O disjuntor bipolar escolhido será de 4 A de corrente nominal, curva B e capacidade de interrupção de 3 kA. A curva dos disjuntores está apresentada na Figura 34.

Figura 34 - Curva de atuação de disjuntores.



Fonte: WEG (2025).

Para a definição da seção mínima de condutor através da corrente de curto-circuito, utilizando a equação (18), a corrente de curto será de 20 A, valor de 5 vezes a nominal do disjuntor (Figura 34), por um período de 5 segundos, considerando a curva B de atuação do disjuntor, a constante K sendo 115, o valor de seção mínima encontrado será de $0,388 \text{ mm}^2$.

O critério de capacidade de condução de corrente para este caso, com a equação (19), considera o fator de correção de temperatura em 40° C, agrupamento de 4 circuitos, 0,65, e resistividade do solo sendo 1. Portanto, o condutor terá de suportar uma corrente equivalente a 4,44 A, utilizando o método de instalação B1 o condutor escolhido seria de no mínimo 0,5 mm², mas de acordo com a ABNT (2008) o condutor mínimo será de 2,5 mm² para circuito de força.

A corrente nominal da fonte do CLP é de 0,75 A, o disjuntor selecionado será de 1 A, curva C, e capacidade de interrupção de 3 kA. A curva C foi selecionada pois a corrente de impulso da fonte do CLP, de acordo com a fabricante, é de 4 A em 250 ms. Isso pode sensibilizar a curva B de atuação do disjuntor e desarmá-lo.

Para a definição da seção mínima de condutor através da corrente de curto-circuito, utilizando a equação (18), a corrente de curto será de 10 A, por um período de 5 segundos, considerando a curva C do disjuntor, a constante K sendo 115, o valor de seção mínima encontrado será de 0,194 mm².

O critério de capacidade de condução de corrente para este caso, com a equação (19), considera o fator de correção de temperatura em 40° C, agrupamento de 4 circuitos, 0,65, e resistividade do solo sendo 1. Portanto o condutor terá de suportar uma corrente equivalente a 1,326 A, utilizando o método de instalação B1 o condutor escolhido seria de no mínimo 0,5 mm², mas de acordo com a ABNT (2008) o condutor mínimo será de 2,5 mm² para circuito de força.

A corrente nominal da tomada presente no quadro de componentes é de 10 A, o disjuntor selecionado será de 10 A, curva B, e capacidade de interrupção de 3 kA.

Para a definição da seção mínima de condutor através da corrente de curto-circuito, utilizando a equação (18), a corrente de curto será de 50 A, por um período de 5 segundos, considerando a curva de atuação do disjuntor, a constante K sendo 115, o valor de seção mínima encontrado será de 0,97 mm².

O critério de capacidade de condução de corrente para este caso, com a equação (19), considera o fator de correção de temperatura em 40° C, agrupamento de 4 circuitos, 0,65, e resistividade do solo sendo 1. Portanto, o condutor terá de suportar uma corrente equivalente a 17,68 A, utilizando o método de instalação B1 o condutor escolhido seria de no mínimo 2,5 mm² de acordo com a ABNT (2008).

A corrente nominal da lâmpada presente no quadro de componentes é de 0,9 A, o disjuntor selecionado será de 1 A, curva B, e capacidade de interrupção de 3 kA.

Para a definição da seção mínima de condutor através da corrente de curto-circuito, utilizando a equação (18) , a corrente de curto será de 5 A, por um período de 5 segundos, considerando a curva de atuação do disjuntor, a constante K sendo 115, o valor de seção mínima encontrado será de 0,194 mm².

O critério de capacidade de condução de corrente para este caso, com a equação (19), considera o fator de correção de temperatura em 40° C, agrupamento de 4 circuitos, 0,65, e resistividade do solo sendo 1. Portanto, o condutor terá de suportar uma corrente equivalente a 1,6 A, utilizando o método de instalação B1 o condutor escolhido seria de no mínimo 0,5 mm², mas de acordo com a ABNT (2008) o condutor mínimo será de 1,5 mm² para circuito de iluminação.

Para o cálculo de condutores e proteção que estão a jusante do secundário do trafo 220/110 V será considerada a potência nominal das cargas alimentadas por ele. O conjunto de cargas resulta em 1558,4 VA, em 110 V essa potência equivale a 14,17 A. O disjuntor escolhido será de 16 A, valor imediatamente após aos 14,17 A, sendo o disjuntor de curva B, 3 kA de capacidade de interrupção.

Para a definição da seção mínima de condutor através da corrente de curto-circuito, utilizando a equação (18) , a corrente de curto será de 80 A, por um período de 5 segundos, considerando o pior caso de atuação do disjuntor, a constante k sendo 115, o valor de seção mínima encontrado será de 1,55 mm².

O critério de capacidade de condução de corrente para este caso, com a equação (19), considera o fator de correção de temperatura em 40° C. Portanto o condutor terá de suportar uma corrente equivalente a 16,3 A, utilizando o método de instalação B1 o condutor escolhido seria de no mínimo 1,5 mm², mas de acordo com a ABNT (2008) o condutor mínimo será de 2,5 mm² para circuito de força.

Para o cálculo de condutores e proteção que estão a montante do primário do trafo 220/110 V será considerado a potência nominal do trafo com uma rendimento de 80%, ou seja, um trafo de 2000 VA de potência de saída teria um potência de entrada de 2500 VA. Considerando então 2500 VA, em 220 V, essa potência equivale a 11,36 A. O disjuntor escolhido será de 20 A, curva C. A capacidade de interrupção do disjuntor será de 6 kA, valor escolhido de forma arbitrária pois não se conhece a corrente de curto-circuito a montante do trafo.

Para a definição da seção mínima de condutor através da corrente de curto-circuito, utilizando a equação (18), a corrente de curto será de 200 A, por um período de 5 segundos, considerando a curva de atuação do disjuntor, a constante K sendo 115, o valor de seção mínima encontrado será de 3,8 mm².

O critério de capacidade de condução de corrente para este caso, com a equação (19), considera o fator de correção de temperatura em 40° C e fator de agrupamento de até 4 circuitos, 0,77. Portanto, o condutor terá de suportar uma corrente equivalente a 29,85 A, utilizando o método de instalação F, pois o cabo será instalado em bandeja perfurada, o condutor escolhido será de no mínimo 4 mm².

O critério utilizado para queda de tensão será com a função fornecida por Creder (2018) que considera potência, distância, tensão e resistividade do condutor para definir a seção do cabo.

$$S = 2\rho \frac{1}{e(\%)V^2} \times (P_1 l_1 + P_2 l_2 + \dots) \quad (20)$$

Onde:

S = seção mínima do condutor (mm²)

ρ = resistividade do cobre ($\Omega \cdot m$)

P = potência consumida (VA)

e% = queda de tensão percentual

V = tensão aplicada (V)

Portanto, para este caso o objetivo é conhecer qual a seção do condutor, para uma distância de 125 m de comprimento, ida e volta, maior valor possível de distância de alimentação do projeto, tensão de linha 220 V, resistividade 1/58 $\Omega \cdot m$, potência de 2500 VA, e queda de tensão admissível de 4 %. Então, o valor de seção mínima é de 5,56 mm², o que leva a escolha de um condutor de 6 mm².

A relação de condutores e dispositivos de proteção está apresentada nas tabelas 7 e 8 a seguir.

Tabela 7 - Relação de condutores mínimos.

Circuito	Critérios utilizados			Condutor escolhido
	Capacidade de condução	Curto-circuito	Queda de tensão	
Sondas	0,5 mm ²	0,004 mm ²	-	1 mm ²
Cartão Analógico	0,5 mm ²	-	-	1 mm ²
Fonte 24 Vcc	0,5 mm ²	0,388 mm ²	-	2,5 mm ²
Fonte CLP	0,5 mm ²	0,194 mm ²	-	2,5 mm ²
Tomada de serviços	1,5 mm ²	0,97 mm ²	-	2,5 mm ²
Iluminação	0,5 mm ²	0,194 mm ²	-	1,5 mm ²
Secundário do Trafo	1,5 mm ²	1,55 mm ²	-	2,5 mm ²
Primário do Trafo	4 mm ²	3,88 mm ²	5,56 mm ²	6 mm ²

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Tabela 8 - Dispositivos de proteção.

Dispositivos de Proteção	Corrente Nominal (A)	Corrente Comercial (dimensionado) (A)	Curva de atuação
Disjuntor Geral Sec Trafo	14,17	16	B
Disjuntor Geral Pri Trafo	11,36	20	C
Disjuntor CLP	0,75	1	C
Disjuntor Fonte 24Vcc	2,51	4	B
Disjuntor Tomada	10	10	B
Disjuntor Iluminação	0,9	1	B
Fusível Rápido	20 m	32 m	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Ao fim da definição dos condutores e proteção a serem utilizados no projeto, utiliza-se a informação desses condutores para o levantamento dos eletrodutos necessários para a acomodação.

3.4.2 Eletrodutos

O local de instalação das sondas requer conduto fechado para acomodação dos cabos de sinal no trajeto entre o painel do CLP e as sondas, portanto será utilizado eletroduto de metal, padrão já utilizado pela empresa para tal aplicação.

A ABNT (2008) prevê ocupação de até 40% da área de seção transversal do eletroduto utilizado, portanto a escolha do eletroduto será com base no somatório das áreas de seção transversal dos cabos acomodados.

O cabo utilizado para as sondas será de 1 mm², para cálculo de ocupação o cabo de referência será de 2 x 16 AWG fornecido pela Conducamp (2024). O valor 16 AWG equivale a uma seção de 1,3 mm², ou seja, ligeiramente superior ao requisito, o que atende ao cálculo de ocupação de eletrodutos.

O cabo de referência 2x16 AWG possui diâmetro externo, considerando malha e capa de proteção, de 7,68 mm. A seção transversal do condutor é equivalente á 46,32 mm². A princípio, o eletroduto principal irá acomodar 34 circuitos, portanto o somatório de seções transversais dos condutores resulta em 1575,04 mm².

Ao longo do caminho do eletroduto, existem trechos com alguns conjuntos de condutores, podendo então realizar uma redução da seção do eletroduto nesses trechos.

Para auxiliar na escolha da seção do eletroduto, a Tabela 9 apresenta o valor de 40% de área de seção de eletrodutos comerciais.

Tabela 9 - Seleção de ocupação de eletrodutos.

Eletroduto comercial	40 % de área de ocupação
1/2"	50,67 mm ²
3/4"	114,01 mm ²
1"	202,68 mm ²
2"	810,73 mm ²
3"	1824,15 mm ²

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Em resumo, os eletrodutos escolhidos serão apresentados na Tabela 10, considerando trecho a trecho.

Tabela 10 - Seleção de eletrodutos.

Trecho	Número de circuitos	Área total ocupada	Eletroduto escolhido
Principal	34	1575,04 mm ²	3"
Trecho A	14	648,48 mm ²	2"
Trecho B	9	416,88 mm ²	2"
Trecho C	11	509,52 mm ²	2"
Trecho D	6	277,92 mm ²	2"
Trecho E	5	231,6 mm ²	2"
Derivações sondas	1	46,32 mm ²	1"

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O dimensionamento do sistema de alimentação das sondas e dos demais componentes foi realizado com base em critérios conforme estabelecido pela empresa e as normas vigentes, principalmente a ABNT (2008). O cálculo da potência das cargas alimentadas pelo transformador 220/110 V garantiu a escolha adequada dos equipamentos, dimensionados com margem para futuras expansões.

O detalhamento dos condutores e dispositivos de proteção foi realizado considerando os critérios de capacidade de condução, curto-circuito e, quando aplicável, queda de tensão. Os condutores foram selecionados não apenas pela capacidade de corrente, mas também respeitando seções mínimas exigidas pelas normas para cada tipo de circuito, seja de força, sinalização ou iluminação.

Além disso, os dispositivos de proteção foram dimensionados com base nas correntes nominais e possíveis correntes de curto-circuito, garantindo segurança e seletividade para todo o sistema. A infraestrutura proposta, composta por

eletrodutos metálicos, assegura organização, proteção mecânica e facilidade de manutenção, respeitando as particularidades do ambiente e os padrões da empresa.

Portanto, o dimensionamento de componentes apresentado cumpre os requisitos técnicos e normativos, sendo adequado para garantir a segurança, a confiabilidade e a funcionalidade da instalação, com margem para expansões futuras e manutenção facilitada.

3.5 Levantamento do custo

O custo total de material e equipamentos para implementação do projeto no AOD-L foi avaliado junto com a empresa em aproximadamente 226 mil reais, conforme o APÊNDICE A. Neste levantamento inclui todos os componentes, incluindo CLP, fonte, transformadores e cabos. O valor do serviço de instalação não foi cotado para orçamento pois pode ser executado pelos próprios profissionais da empresa.

Outro ponto interessante ao custo é que ao expandir para equipamentos adjacentes ao AOD-L, como o VOD 1 e outros, haverá uma redução no custo com materiais, visto que pode se utilizar o mesmo CLP e componentes, além dos equipamentos de alimentação como o trafo e a fonte de 24 Vcc serem capazes de suprir uma expansão.

3.6 Resultados

Os resultados que serão apresentados servem para ter uma previsão do que se pode esperar quando o projeto for instalado de forma completa no conversor AOD-L. Os dados obtidos são com base em uma adaptação da lógica para ser executada em outro conversor presente na aciaria da empresa. Este outro conversor, MRP-L, tem o funcionamento e componentes semelhantes ao AOD-L, portanto, tudo que foi apresentado para o AOD-L, adição de ligas, abastecimento externo, modelo de silos e afins, pode ser considerado para o MRP-L.

O MRP-L, possuía, na data de desenvolvimento deste projeto, sondas radar instaladas em seus silos internos, resultado de um interesse anterior da empresa em aplicar esse tipo de medição. Portanto, as sondas não possuíam lógica

de programação para executar as funções requeridas. Para testar a viabilidade e funcionamento das medições elaboradas neste projeto, foi realizada uma adaptação da lógica e implementada no CLP do MRP-L, somente até a etapa de aquisição de peso de material.

A implementação e análise ocorreu em etapas da seguinte forma. Primeiro, foi realizado o levantamento da função que representa o volume do silo, da mesma forma que foi feito para os silos do AOD-,L e implementada a lógica até a etapa de peso, com o objetivo apenas de ler os valores de peso de material que o sistema da sonda radar entrega.

Em segundo, um acompanhamento do peso que foi descarregado pela balança de cada silo, localizada na saída de material. O ponto inicial de análise é quando o silo se encontrava sem material, onde a sonda radar indica nível percentual e peso 0 e a balança do silo não descarrega mais nenhum material, ou seja, nesse ponto tem-se a confiança de que os valores estão corretos e servem de ponto de partida.

A partir do ponto em que o silo está descarregado, foi feita uma análise de como o sistema se comportou até o descarregamento total. Na balança, é feita a amostragem do quanto de material foi descarregado até zerar. Se o último descarregamento, antes de zerar o material do silo, foi um peso de 1000 kg, para esse valor, se anota a amostra de qual peso de material registrado pela sistema da sonda radar, exemplo, 950 kg. Se o peso registrado pela balança no penúltimo descarregamento foi de 500 kg, significa que antes desse descarregamento acontecer o silo possuía 1500 kg e a sonda registrou um peso de 1477 kg. Em outras palavras, soma-se o decremento registrado pela balança antes do material acabar e se anota qual o peso registrado pela sonda nesses instantes.

A análise se baseia no erro do peso fornecido da lógica utilizando a sonda radar e o peso obtido através da balança de descarga do silo que é uma fonte confiável de peso.

Serão abordados os resultados obtidos em dois silos do MRP-L, o silo 53 e o 61, que apresentaram resultados interessantes para discussão.

A Tabela 11 traz a análise dos resultados no silo 53 comparando o nível registrado pela sonda, o peso em kg baseado na balança do silo, o peso registrado pela sonda e o erro entre o peso feito pela balança e o peso encontrado através do sistema da sonda radar.

Tabela 11- Análise do silo 53.

Nível (%)	Peso registrado pela balança (kg)	Peso registrado pela sonda (kg)	Erro (%)
0	0	0	0
19	1310	1199	8,51
25,5	3329	3415	2,59
31,2	5048	4716	6,58
33,0	6861	7578	10,45
35,58	8268	9205	11,33
38,97	9287	9361	0,80
41	10301	10228	0,71
44	11813	11989	1,49
46,2	13365,9	14487	8,39
49	14788,9	16556	11,95
56	16599,9	17883	7,73
64,1	18411,9	18881	2,55
66,528	19429,9	20170	3,81

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O menor erro encontrado na análise do silo 53 foi de 0,71% em 41% de ocupação, valor aceitável para a aplicação. O maior erro encontrado foi de 11,95% aos 49% de nível, portanto, visto que é uma sonda já instalada, ou seja, sem conhecimento de ângulo de instalação e ajustes necessários, além disso, o valor de densidade aparente do material foi aproximado, não realizado os testes no material para averiguação, o que pode implicar em erros na obtenção do peso.

A média do erro encontrado é 5,91%, o que é um valor interessante com base nas condições do teste.

Outra análise que trouxe resultados relevantes para o projeto foi no silo 61, apresentado na Tabela 12.

Na análise do silo 61 percebe-se uma redução acentuada do erro percentual do nível 20% para o 35%, saindo de 24% para 0,11%. A suspeita desse fenômeno é o posicionamento errado da sonda radar no silo, provavelmente não está direcionada para o fundo do silo de forma correta, trazendo consigo uma falsa

leitura de material. Considerando somente os outros resultados, a partir do nível 35%, a média do erro percentual é de 0,685%, o que é um resultado promissor mesmo nas condições do teste.

Tabela 12 - Análise do silo 61.

Nível (%)	Peso registrado pela balança (kg)	Peso registrado pela sonda (kg)	Erro (%)
0	0	0	0
8,59	1610	2030	26,10
20,19	2326	1752	24,66
35,36	10057	10046	0,11
53,69	15003	14761	1,61
56,19	16012	16071	0,37
57,25	16321	16388	0,41
58,94	16730	16728	0,01
59,65	16785	16639	0,87
60,90	17109	16936	1,01
61,69	17464	17420	0,25
64,58	18122	17923	1,10
66,01	18937	19147	1,11

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Portanto, com os ajustes necessários, reposicionamento da sonda radar, a obtenção da densidade aparente do material com maior precisão, entre outros ajustes, mesmo a adaptação de projeto para o MRP-L traz resultados interessantes quanto as medições e valores entregues pela sonda, visto que todas as demais funções são baseadas nessas medições. Além disso, traz um panorama geral do que se pode esperar do sistema depois de implantado no AOD-L e demais equipamentos futuros.

4 CONCLUSÃO

O sistema aumenta consideravelmente a previsibilidade e segurança do sistema de adição de ligas do equipamento. Sendo possível ter em tempo real o nível de ocupação do silo e também o peso do material, além de trazer segurança operacional com as funções que o sistema possui.

A previsibilidade do sistema de medição por meio de sonda radar reduz consideravelmente as paradas por falta de material nos silos, visto que é possível ter a informação em tempo real do nível de material com precisão, pode se prever os gastos de material antes de intervenções no sistema de abastecimento, além de solicitar o carregamento do silo com antecedência.

A segurança que o sistema implica no processo é a capacidade de evitar sobrepeso de material nos silos o que traz riscos estruturais ao silo, além de transbordamento de materiais o que acarreta paradas de longa duração e traz riscos aos andares inferiores.

O controle de material no silo também recebe melhorias: é possível estabelecer qual o nível e peso de material desejado no silo; realizar pedidos de abastecimento de forma automática ao abastecimento externo, assim como a parada de carregamento; contribuir com o levantamento do inventário de ligas com o sistema incremento e decremento de peso de material.

Com os testes realizados, fica nítido que com os ajustes necessários, a sonda radar é capaz de obter valores precisos de retorno de peso. Pois, no cenário em que foi testado, o sistema trouxe resultados extremamente promissores.

Para trabalhos futuros, verificar se o acúmulo irregular de material durante o carregamento influencia na precisão do sistema, assim como a criação de um método para a correção da limitação que a função de incremento e decremento de peso possui.

REFERÊNCIAS

APERAM SOUTH AMERICA. **Aperam South America**. Disponível em: <<https://brasil.aperam.com/institucional/aperam/aperam-south-america/>>. Acesso em: 4 jun. 2025.

APERAM SOUTH AMERICA. **Silo de adição de ligas**. Timóteo, MG: Aperam, 2024. Arquivo da empresa.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5410: 2008 - Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

BOLOTA, José Roberto. **Siderurgia: uma visão geral**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2024. 576 p. (Coleção de livros ABM).

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; ARAÚJO, Elizio Damião G. de. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.41 , p. [181]-236, mar. 2015.

CASSIOLATO, César. **Medição de nível. SMAR Technology Company**, s.d. Disponível em: <https://www.smar.com.br/pt/artigo-tecnico/medicao-de-nivel>. Acesso em: 13 jul. 2025.

CONDUSCAMP. **Cabo AFT 2x16 AWG blindado em malha de cobre estanhado – preto**. Campinas: Conduscamp, [s.d.]. Disponível em: <https://loja.conduscamp.com.br/produto/cabo-aft-2x16-awg-blindado-em-malha-de-cobre-estanhado-preto/5415666?idSku=5423390>. Acesso em: 4 jun. 2025.

CREDER, Hélio. **Instalações elétricas**. 16. ed. São Paulo: LTC, 2018.

DCA IRTA. **Fusível cartucho cilíndrico terminal virola**. Disponível em: <https://www.dcairta.com.br/site/detalhes.asp?produtoid=339>. Acesso em: 4 jun. 2025.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Processo produtivo**. Disponível em: <<https://www.acobrasil.org.br/site/processo-siderurgico/>>. Acesso em: 4 jun. 2025.

MAMEDE, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. São Paulo: LTC, 2017.

MENDES, Rafael Manfrin. **Programação de CLPs: métodos e técnicas**. 1. ed. São Carlos: SCIENZA, 2021.

PAC SYSTEMS AND SOLUTIONS. **PAC Systems And Solutions**. Disponível em: <http://pacsys.in/#>. Acesso em: 4 jun. 2025.

PETRUZELLA, Frank D. **Controladores lógicos programáveis**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

VEGA GRIESHABER KG. **VEGAPULS 31: sensor radar compacto para medição contínua de nível**. Disponível em: <https://www.vega.com/pt-br/produtos/catalogo-de-produtos/nivel-continuo/radar/vegapuls-31>. Acesso em: 4 jun. 2025.

WEG S.A. **Minidisjuntores MDW**. Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controls/Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Circuitos-El%C3%A9tricos/Disjuntores/Minidisjuntores/Minidisjuntores-MDW/Minidisjuntores-MDW/p/MKT_WDC_BRAZIL_PRODUT_CIRCUIT_BREAKER_MDW. Acesso em: 4 jun. 2025.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Tabela de levantamento de preços do projeto.

COMPONENTE	QUANTIDADE	PREÇO TOTAL (R\$)
COMPONENTES DO CLP	-	R\$ 50.921,00
TRAFO MONOFÁSICO 220 / 110 V - POTÊNCIA DE 2000 VA	1	R\$ 1.650,00
SONDA RADAR ATÉ 15m	18	R\$ 151.967,88
FONTE DAKE 24 Vcc 75 W	1	R\$ 93,10
FUSÍVEL RÁPIDO 32 mA, 5X20 mm.	40	R\$ 24,80
MINI DISJUNTORES	6	R\$ 981,26
CONDUTORES	-	R\$ 6.320,00
ELETRODUTOS	-	R\$ 6.209,00
DEMAIS COMPONENTES	-	R\$ 7.966,00
TOTAL		R\$ 226.133,04