

MEC – SETEC
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS – CAMPUS FORMIGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE GLENDON
SIDERÚRGICO A PARTIR DE CONTROLE PID PARA
CONTROLE DE VÁLVULAS DE GÁS E AR

Rafael Silva Mateus

Orientador: Profº. Me. Felipe de Sousa Silva

FORMIGA – MG
2022

RAFAEL SILVA MATEUS

INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE GLENDON SIDERÚRGICO A
PARTIR DE CONTROLE PID PARA CONTROLE DE VÁLVULAS DE GÁS
E AR

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto Federal de
Minas Gerais Campus Formiga, como
requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Profº. Me. Felipe de Sousa
Silva

Mateus, Rafael Silva
M425i Instrumentação e Automação de Glendon Siderúrgico a partir de Controle PID
para Controle de Válvulas de Gás e Ar.
/ Rafael Silva Mateus -- Formiga : IFMG, 2022.
64p. : il.

Orientador: Prof. MSc. Felipe de Sousa Silva
Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Glendons Siderúrgicos. 2. Instrumentação. 3. Automação.
4. Processos Industriais. 5. Controle de Processo. I. Silva, Felipe de Sousa. II.
Título.

CDD 621.3

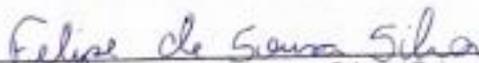
RAFAEL SILVA MATEUS

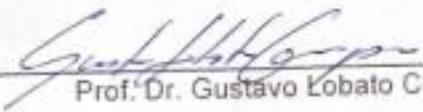
INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE GLENDON SIDERÚRGICO A PARTIR DE CONTROLE PID PARA CONTROLE DE VÁLVULAS DE GÁS E AR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Formiga como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: 02 de Dezembro de 2022
Nota: 81,6

BANCA EXAMINADORA


Prof. Me. Felipe de Sousa Silva (Orientador)


Prof. Dr. Gustavo Lobato Campos


Prof. Me. Marcus Vinicius de Paiva

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por me mostrar que todas as minhas decisões foram boas escolhas e que toda batalha pode ser ganha. Ao meu pai, Vantuil Mateus, que está presente, apoia e incentiva em todos os momentos da vida, que me fez crescer, evoluir, amadurecer e me tornar quem sou. À minha mãe, Selma Ap. Silva Mateus, que assim como meu pai, porém com um pouco mais de lágrimas, me apoiou e apoia em todas as minhas partidas, que de longe, me vendo sumir ao horizonte, mesmo querendo que eu não fosse, sabe que a minha casa é o mundo e os lugares incríveis que temos a alcançar. À minha irmã, Paula Silva Mateus, que sempre me motivou a continuar, mesmo que os dias não estivessem tão azuis, que me faz ver a cada dia que a vida não é sobre ter, é sobre ser. À família Equitroppa, lugar e pessoas que ajudaram de certa forma a moldar quem sou hoje, que me ajudaram a construir caráter e personalidade, a desenvolver competências e sabedorias, que sempre me apoiaram e acompanharam o meu crescimento. Aos meus amigos, que dividiram casa, dividiram angústias, alegrias, tristezas, conhecimento, sabedoria, conquistas, dividiram principalmente tempo, um dos bens mais valiosos a serem dedicados a alguém.

Aos docentes do Instituto Federal de Minas Gerais Campus Formiga que me instruíram durante toda a minha caminhada, dividindo sabedoria, conhecimento e intelecto. Aos amigos que fazem parte da minha carreira, em especial ao Eder Ramos que além de primo e companheiro me abriu as portas para o mercado de trabalho, ao Leandro Borges que me mostrou que a amizade é questão de sintonia e que sempre se mantem apesar do tempo e da distância e ao João Victor V. que abraçou um desconhecido meio perdido e me mostrou que a cada novo recomeço existem pessoas boas a serem conhecidas.

Agradeço a todos que de certa forma contribuíram a cada passo da minha caminhada, a todos que se importam. A todos que, de alguma maneira, passaram pela minha vida, meu muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar a importância e a eficiência da instrumentação e automação em processos siderúrgicos, tendo como foco específico os Glendons, bem como explicar a necessidade de sua aplicação, assim como a sua participação na qualidade do sistema. Em processos industriais, o alto nível de um processo é necessário e os equipamentos operam em tempo integral e muitas vezes em locais agressivos. Assim, um controle automático para sua operação será estudado a partir da medição da grandeza de temperatura dentro de sua câmara refratária. Todos os instrumentos do processo industrial são importantes, assim, a partir de uma malha de controle, podem ser controlados por CLP's, em um supervísório, por exemplo. Pode-se então citar como exemplo de instrumentos os termopares que medem a temperatura por meio de duas diferentes ligas metálicas, os quais serão os elementos primários de medição dos Glendons. Como controles de processos temos o controle PID, que será aplicado para o desenvolvimento em questão. Então, o trabalho tem o intuito de mostrar o alto nível de eficiência dos instrumentos de medição e a precisão do controle PID para a operação.

Palavras-Chave: Glendons Siderúrgicos, instrumentação, automação, processos industriais, controle de processo.

ABSTRACT

This course completion work aims to analyze the importance and efficiency of instrumentation and automation in steelmaking processes, with a specific focus on the Glendons, as well as explaining the need for its application, as well as its participation in the quality of the system. In industrial processes, the high level of a process is required and the equipment operates full time and often in aggressive locations. Thus, an automatic control for its operation will be studied from the measurement of the temperature magnitude inside its refractory chamber. All instruments of the industrial process are important, thus, from a control loop, they can be controlled by PLCs, in a supervisory, for example. One can therefore cite as an example of instruments the thermocouples that measure the temperature by means of two different metallic alloys, which will be the primary measuring elements of the Glendons. As process controls we have the PID control, which will be applied to the development in question. So, the work has the intention of showing the high level of efficiency of the measuring instruments and the precision of the PID control for the operation.

Key words: Steel Glendons, instrumentation, automation, industrial processes, process control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Malha de controle com realimentação	15
Figura 2 - Estrutura dos sistemas supervisórios	19
Figura 3 - Arquitetura de um CLP.....	21
Figura 4 - Estrutura da linguagem Ladder.....	23
Figura 5 - Diagrama de Controle PID	25
Figura 6 - Estrutura de um Alto Forno.	27
Figura 7 - Glendon Siderúrgico.....	28
Figura 8 - Esquemático interior de um Glendon.	29
Figura 9 - Atuador elétrico.	30
Figura 10 - Layout painel CCM dos Glendons.	32
Figura 11 - Diagrama de potência do atuador.	33
Figura 12 - Ligações elétricas dos atuadores.....	34
Figura 13 - Diagrama de potência da <i>Soft-Stater</i>	35
Figura 14 - Diagrama de interligações elétricas no equipamento.	36
Figura 15 - Layout painel CLP dos Glendons.....	37
Figura 16 - Alimentação de Hardware.	38
Figura 17 - Entradas digitais.....	39
Figura 18 - Saídas digitais.	39
Figura 19 - Entradas analógicas para indicação de porcentagem de abertura de válvula.	40
Figura 20 - Entradas analógicas para leitura de termopares.....	41
Figura 21 - Disposição do hardware CLP.	42
Figura 22 - Alarmes de temperatura alta.	43
Figura 23 - Alarmes da diferença de abertura das válvulas.....	43
Figura 24 - Leitura de dados entradas analógicas.....	44
Figura 25 - Seleção local remoto ventilador de combustível.	45
Figura 26 - Alarmes ventilador ar de combustível.	45
Figura 27 - Comando de acionamento das válvulas dos Glendons.....	46
Figura 28 - Retornos de estados das válvulas de Glendon.	47
Figura 29 - Lógica de leitura de termopar.	47
Figura 30 - Simulação de abertura e fechamento das válvulas.....	48
Figura 31 - Cálculo matemático para abertura de válvulas.	49
Figura 32 - Chamada de funções.	49

Figura 33 - Chamada ciclica das válvulas com controle PID.....	50
Figura 34 - Blocos PID.....	50
Figura 35 - PID detalhado a partir do controle de temperatura.....	51
Figura 36 - Resposta automática ao PID nas válvulas de gás.....	52
Figura 37 - Representação geral dos Glendons.....	53
Figura 38 - Box de comando do soprador.....	53
Figura 39 - Box de comando da válvula de Glendon.....	54
Figura 40 - Box de controle PID.....	54
Figura 41 - Janela de Gráficos.....	55
Figura 42 - Janela de serviços e aplicativos.....	56
Figura 43 - Janela de ajustes de valores.....	56
Figura 44 - Janela de alarmes do supervisorio.....	57

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

CLP – Controlador Lógico Programável

PID – Proporcional Integral Derivativo

CCM – Centro de Comando de Motores

SCADA – *Supervisory Control And Data Acquisition*

RTU – Unidade Terminal Remota

CO – Monóxido de Carbono

GAF – Gás de Alto Forno

I/O – Entrada e Saída

DI/DO – Entrada Digital e Saída Digital

DO – Saída Digital

AI – Entrada Analógica

TI – Tecnologia de Informação

TA – Tecnologia de Automação

EIA – Elétrica, Instrumentação e Automação

OPEX - *Capital Expenditure*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Motivação.....	12
1.2 Objetivos	13
1.3 Estrutura do Trabalho.....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Instrumentação de processos industriais.....	14
2.2 Instrumentação crítica	16
2.3 Características gerais de instrumentos.....	17
2.4 Sistema supervisorio.....	18
2.5 CLP e Linguagem Ladder	20
2.6 Sistemas de Controle	23
2.7 Siderúrgicas.....	25
2.7.1 Glendons Siderúrgicos	26
3. METODOLOGIA.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1 Instrumentação dos Glendons	32
4.2 Programação de CLP	41
4.3 Controle PID e Funcionamento Geral.....	50
4.4 Telas de Supervisorio	52
4.5 Análise de viabilidade.....	57
5. CONCLUSÕES.....	61
5.1. Trabalhos Futuros	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos e com as mudanças existentes no mundo, o setor industrial e as fábricas estão se adaptando a então chamada Indústria 4.0. Nesse cenário, a automação vem sendo implementada cada vez mais com as facilidades oriundas da quarta revolução industrial.

Segundo Sacomano (2018), a Indústria 4.0 consiste na implementação de tecnologias de informação e comunicação que possibilitam o alcance de níveis elevados de produtividade, flexibilidade, qualidade e gerenciamento.

Com o avanço da tecnologia, técnicas de automação e controle estão atingindo uma vasta área de aplicação. De acordo com Garcia (2018), os processos industriais são destacados especialmente no: setor químico e petroquímico, papel e celulose, alimentícia e farmacêutica, siderúrgica e metalúrgica, naval, mineração e cimento, têxtil, tratamento de água e afluentes e nuclear.

Uma das técnicas de automação é o controle de processos. Controlar um processo é manipular suas variáveis para manter uma interação ordenada, fazendo-as trabalhar o mais perto possível de valores definidos como ideais. Em uma estratégia de controle, o problema central é saber quando, como e quanto alterar o valor de determinada variável para conseguir uma resposta mais efetiva do sistema (GARCIA, 2018).

Para realizar o controle de processo, dois elementos são fundamentais para o sistema, quais sejam: a instrumentação e os sistemas supervisórios.

Na instrumentação, os processos aplicados são variados e englobam muitos tipos de produtos que necessitam de um controle preciso dos produtos gerados. Nesses processos é indispensável controlar e manter constantes variáveis como: pressão, nível, vazão, temperatura, pH, condutividade, velocidade e umidade. Com a utilização dos instrumentos de medição e controle, as variáveis são controladas e mantidas em condições mais precisas do que se fossem controladas por um operador de forma manual (BEGA, 2011).

Em todo sistema de controle em malha fechada existe uma variável controlada (medida através de sensor-transmissor), uma variável manipulada (atuada a partir do elemento final de controle) e o controlador. Os sistemas de controle irão manter a variável controlada em um valor pré-definido pelo usuário ou pela programação e o valor da variável medida ou a condição a controlar será comparada em relação ao valor desejado, então fazendo os ajustes em relação ao desvio (erro) entre os dois valores (BEGA, 2011).

Abordando toda a estruturação de um sistema de controle em malha fechada, utilizando instrumentos para obter as variáveis do processo, com uma automação apurada convertendo os sinais necessários e transformando as informações em visualizações gráficas, é possível automatizar todo o processo de um Glendon Siderúrgico.

O processo em questão pode ser definido como um trocador de calor, onde através da combustão, realiza o aquecimento do ar ambiente contido dentro da sua câmara refratária. Este processo exige uma temperatura satisfatória em sua saída. Dessa maneira, a partir de medições de temperatura, será possível automatizar a combustão do processo.

Dessa maneira, esse projeto tem como finalidade realizar um estudo de caso embasado na instrumentação e nos sistemas de controle do processo industrial de Glendons Siderúrgicos para realizar um estudo de viabilidade da a automação dos mesmos a partir de variáveis controladas.

1.1 Motivação

Com a Indústria 4.0 se tornando cada vez mais forte no setor industrial, e com a produção sendo cada vez maior, os processos industriais estão cada vez mais conectados e administrados para evitar falhas e, conseqüentemente, perdas de produção.

Dessa forma, a área da manutenção tem sido cada vez mais monitorada, pois as áreas de instrumentação, controle de processos e sistemas supervisórios, têm agregado inúmeros benefícios para as tomadas de decisões.

Com o monitoramento em tempo integral do processo, as paradas de equipamentos podem ser estudadas e reduzidas. Os problemas podem ser identificados com maior rapidez, o que possibilita uma solução mais rápida e ágil. Dessa forma, as paradas programadas contribuem para um tempo maior de máquina disponível, permitindo uma atividade mais produtiva e menos interruptiva (ANDRADE, 2018).

Mesmo com a quarta revolução industrial, algumas indústrias ainda se negam a implementar instrumentos e sistemas de controle para otimizar os processos. O custo de implementação e as infraestruturas que devem ser instaladas são alguns dos obstáculos para as indústrias realizarem tal adequação.

Com base nisso, esse trabalho tem como motivação apresentar um sistema de controle automatizado através de variáveis medidas do processo de Glendons Siderúrgicos e identificar as melhorias e benefícios advindas de sua implementação, tais como, em um ambiente agressivo, a diminuição de acidentes, a qualidade de serviço dos técnicos de área, bem como a

importância de um controle de processo dentro das áreas como o Planejamento e Controle de Produção e Manutenção.

1.2 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo de caso de um processo industrial para analisar a viabilidade da automação de um processo utilizando sistemas de controle a partir da instrumentação de variáveis medidas.

Como objetivos específicos, pode-se listar:

- Analisar as instrumentações instaladas no chão de fábrica de determinado fluxo de processo industrial;
- Analisar o controle de processo e quais variáveis estão sendo controladas e quais equipamentos estão instalados;
- Analisar o sistema supervisor e os comandos gráficos operacionais para controle de processos;
- Compreender o processo operacional de uma Siderúrgica, assim como dos elementos primários do processo de Alto Forno, os Glendons Siderúrgicos e a importância de sua perfeita utilização.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é estruturado em cinco capítulos. No capítulo 1, são apresentados a introdução, a motivação e os objetivos do trabalho. No capítulo 2, são apresentados os estudos teóricos e as revisões bibliográficas abordando os temas de instrumentação, controle de processos, sistemas supervisórios e o ramo siderúrgico. Na sequência, o capítulo 3 contém a metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho, para então, no capítulo 4, apresentar os resultados obtidos a partir do estudo de caso. Para finalizar, no capítulo 5, são realizadas as conclusões destacando a importância do trabalho desenvolvido e possíveis trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

As técnicas de controle em processos industriais evoluíram muito nos últimos anos e os principais fatores responsáveis são: as necessidades do usuário e os avanços tecnológicos. O aumento no tamanho e na complexidade das indústrias influenciou nas necessidades do usuário, assim como o custo da matéria-prima e da energia para executar o processamento da mesma. A evolução dos sistemas de otimização integrados de uma planta industrial se deu através dos inúmeros avanços tecnológicos (GARCIA, 2018).

Para atender o objetivo desse projeto, uma breve revisão dos principais conceitos relevantes para o desenvolvimento deste trabalho é apresentada nesse capítulo.

2.1 Instrumentação de processos industriais

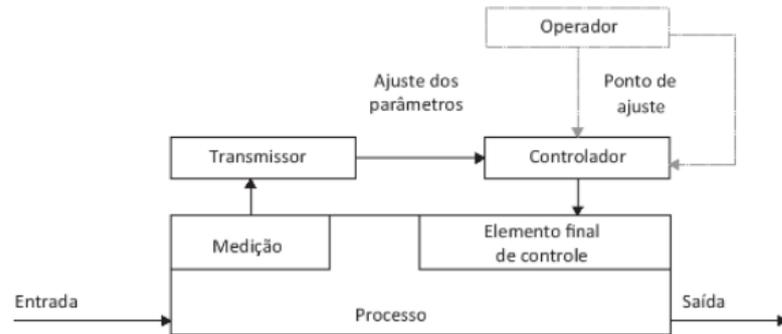
Em 1930, com a instrumentação analógica, o controle de processos industriais se baseava em tentativas isoladas e individuais, sem seguir a teoria ou princípios definidos, devido ao fato da falta de interesse da maioria das indústrias no tema. Na época, o controle era distribuído, ou seja, os operadores e os instrumentos eram todos distribuídos na planta e todos os ajustes eram manuais (GARCIA, 2018).

O termo “controle distribuído” surgiu com o fato de que os controladores eram fisicamente dispostos em toda a planta de maneira espalhada. Próximo aos equipamentos que eram controlados, existiam os elementos individuais de controle, tais como reguladores mecânicos. Todas as ações de controle eram realizadas localmente pelos operadores. Naquela época, esse tipo de procedimento era viável, pois as plantas ainda eram geograficamente pequenas e os processos mais simples (GARCIA, 2018).

No início da década de 1940, os processos se tornaram mais complexos e as plantas começaram a expandir. Dessa forma, surgiu uma necessidade de otimizar a operação global da planta, onde se deu início às mudanças para as salas de controle centralizadas. Tal mudança só foi possibilitada pelo surgimento da transmissão pneumática (GARCIA, 2018).

Em 1960, surgiram então os primeiros sistemas digitais de controle. Até meados de 1980, a instrumentação digital era do tipo controle centralizado, onde o computador, com um único processador, abrigava todas as suas tarefas (GARCIA, 2018). A Figura 1 ilustra um típico sistema de controle digital por realimentação.

Figura 1 - Malha de controle com realimentação



Fonte: Figura extraída de (GARCIA, 2018).

Com a evolução da tecnologia, com as plantas crescendo cada vez mais e com os processos se tornando cada vez mais complexos, o controle de processo foi tendenciado a se adaptar. Foi então que surgiram os CLP's, também conhecidos como PLC's (Controlador Lógico Programável), que serviram para substituir painéis com relés com a finalidade de diminuir o alto consumo de energia e a difícil manutenção. Os CLP's podem substituir milhares de relés e temporizadores e apresentam uma ampla gama de tarefas de automação (GARCIA, 2018).

Atualmente, a instrumentação industrial consiste em realizar medições a partir de sensores e transmissores de uma variável controlada do processo para fornecer uma informação a respeito do valor da grandeza física em questão e todos seus periféricos envolvidos, como circuitos, cabos, visores, equações e programas de computadores (AGUIRRE, 2014).

Em 1989, surgiu o protocolo HART, protocolo de comunicação que é utilizado até hoje na grande maioria dos instrumentos. Sua utilização é muito comum na comunicação entre dispositivos de campo inteligentes e alguns sistemas de controle. O HART foi o protocolo digital pioneiro de comunicação bidirecional a não interferir no sinal analógico de controle (ALTUS, 2020).

A comunicação é feita a partir de dois canais simultâneos: um sinal digital e outro sinal analógico de 4 a 20mA. O sinal digital serve para levar informações como padrões de configuração, calibragem, parametrização, TAGs, *range*, etc. O sinal analógico transmite a variável medida a partir de um instrumento utilizando uma malha 4 a 20mA (ALTUS, 2020).

2.2 Instrumentação crítica

Os sistemas de controle monitoram o processo controlado enquanto o seu funcionamento estiver dentro das condições normais para a qual foi projetado, realizando controles automáticos para manter a variável nos parâmetros estabelecidos. Quando o processo controlado sai das condições normais de funcionamento e atinge níveis fora do padrão, o sistema de segurança deve atuar para não ocasionar riscos operacionais, pessoais ou ambientais (BEGA, 2011).

Quando se fala em instrumentação, a qualidade e a tecnologia aplicada nos instrumentos são de extrema importância para manter um controle de variável bem acompanhado ao longo de toda a vida útil da planta, sendo essa variável crítica ou não. Segundo os fornecedores e muitos usuários, a definição de uma variável crítica depende do processo em questão. A variável crítica pode ser definida como aquela em que qualquer anomalia pode ocasionar uma instabilidade no processo que não é desejada, sendo necessário um alto nível de controle para manter tal estabilidade (VALETE, 2006).

Na maioria das vezes, as variáveis críticas estão relacionadas aos sistemas de segurança de uma planta. Dessa forma, necessitam de prioridade na aquisição de dados, assim como de um sistema digital com maior confiabilidade e disponibilidade. Considera-se que, em processos industriais, a redundância é um item básico quando se trata de variáveis críticas. A necessidade de uma outra forma de medir indiretamente a variável é fundamental numa eventual falha de algum equipamento ou quando, por alguma razão, a primeira forma de medição não surta efeito (VALETE, 2006).

A variável crítica pode interferir de diversas formas no processo. Existem variáveis críticas que necessitam de uma série de outras alterações no processo, como uma combinação entre outras variáveis, para que o controle perceba que a variável crítica atingiu um valor de desarme, obtendo essa informação por indicação de componentes que são correlacionados com a variação dessa variável. Em outros casos, a alteração da variável crítica pode ocorrer a partir de um disparo na temperatura, ou em uma variação de pressão e, em alguns casos, a variável crítica pode levar a planta a uma condição de parada (VALETE, 2006).

2.3 Características gerais de instrumentos

Os instrumentos podem ser divididos em quatro categorias: transdutores passivos, transdutores ativos, instrumentos analógicos e instrumentos digitais.

Os transdutores ativos são componentes onde a energia do sinal de saída é dada absolutamente pelo sinal da entrada, ou pelo meio que gerou tal sinal. Os transdutores passivos também são chamados de geradores. Um exemplo desse tipo de sensor é o termopar: instrumento que mede a temperatura a partir da diferença de temperatura entre a junta ativa e a junta de referência, produzindo uma tensão elétrica (AGUIRRE, 2014).

Os transdutores passivos, ao contrário dos transdutores ativos, não têm a energia de sua saída proveniente do sinal de entrada. Com o sinal de entrada, o transdutor manipula a energia da fonte. Os transdutores ativos também podem ser chamados de moduladores. Um exemplo desse tipo de sensor é o transdutor de pressão: a partir da pressão aplicada em seu diafragma é capaz de manipular a energia da fonte proporcionalmente com a pressão lida (AGUIRRE, 2014).

Os instrumentos analógicos são dispositivos que tanto o seu processamento e condicionamento, quanto o sensor em si, são de origem analógica. Os instrumentos analógicos, na maioria das vezes, são de aplicações específicas e menos flexíveis, bem como possuem uma complexidade muito grande em seus projetos de circuitos e são mais caros. Esse tipo de instrumento é mais rápido, porém, sensível a ruído (AGUIRRE, 2014).

Quando se trata de instrumentos em geral, seu elemento primário sempre será analógico, o que pode variar é a maneira como o sinal é tratado. Sendo assim, os instrumentos digitais são caracterizados por apresentar processamento, condicionamento e a representação do sinal de forma digital (AGUIRRE, 2014).

O instrumento tem a função de transformar uma grandeza física em um sinal de medição. Tem-se, então, que o instrumento é o meio entre a variável de interesse física e o sinal da variável transmitido. Este, deve ser selecionado de modo a ser transmitido em circuitos elétricos e que possam ser facilmente manipulados, possibilitando leitura direta e armazenamento de sinal (ROURE, c2022).

As principais grandezas físicas de interesse em um processo são: pressão, vazão, temperatura, nível, pH, condutividade, velocidade e umidade. Estas, em função de condições internas ou externas ao processo, podem sofrer alterações espontâneas em seus valores, necessitando de controle (ROURE, c2022).

2.4 Sistema supervisório

Os sistemas supervisórios tiveram seu início em meados das décadas de 70 e 80. Naquela época, os computadores ainda possuíam pouco poder operacional e também apresentavam alto custo de implementação (SOUZA, 2016).

Com o passar do tempo e com a evolução dos computadores, os mesmos tiveram um aumento considerável de produção e os preços começaram a reduzir. Foi então que, surgiram de fato, os primeiros *softwares* SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) ou os chamados sistemas supervisórios. Em 1992, a evolução dos sistemas supervisórios atingiu uma rápida ascendência e mais de 120 diferentes fornecedores já estavam disputando o mercado que ainda era recente (SOUZA, 2016).

Para que os sistemas supervisórios funcionem nos computadores é necessário a presença de um sistema operacional. Com isso, as disputas entre os concorrentes de sistemas supervisórios também envolviam a escolha do sistema operacional. Sendo assim, diferentes sistemas operacionais começaram a surgir oferecendo diversas características (SOUZA, 2016).

Os módulos e as terminologias de cada supervisório eram muito diferentes umas das outras e não havia a possibilidade de se obter uma ferramenta padrão. Foi então que no final da década de 80 que começaram a surgir os primeiros produtos com projeção de mercado (SOUZA, 2016).

As versões que surgiram antigamente não se assemelham em nada com o que são as versões atuais. As versões antigas eram muito limitadas e apresentavam poucas funcionalidades, alguns supervisórios também não permitiam o comando do operador e a parte visual era somente um painel com luzes para indicar o *status* de funcionamentos dos equipamentos (SOUZA, 2016).

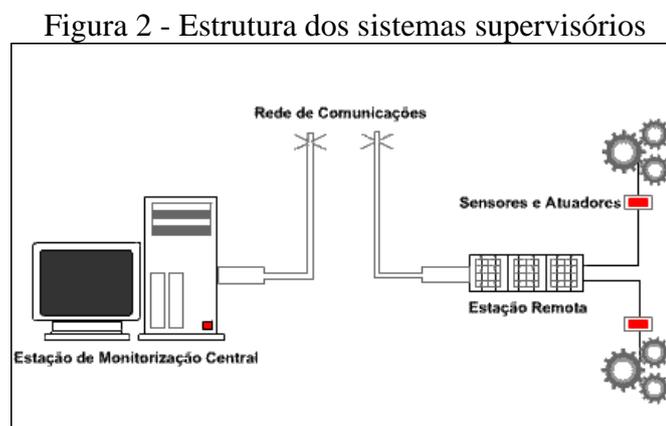
Os supervisórios, desde então, expandiram seus recursos, sendo os principais (SOUZA, 2016):

- Desempenho/capacidade: antigamente, os primeiros *softwares* endereçavam poucas variáveis de controle. Atualmente eles suportam milhares de variáveis, podendo chegar a mais de 400.000;
- Conectividade e redundância: os sistemas supervisórios pararam de ser estações de operação isoladas e começaram a ser arquiteturas complexas em rede, além de terem mais segurança e escalabilidade;

- Facilidade de uso: as interfaces visuais, as chamadas GUI, trouxeram benefícios como ferramentas de desenho e definição de banco de dados e a integração dos supervisórios com os CLP's, que foram bem facilitadas;
- Integração com outros ambientes: os sistemas supervisórios passaram a ser um ambiente aberto e de fácil conexão com outros sistemas, tais como: o campo ou chão de fábrica, ou o sistema de qualidade e manutenção;
- Uso da WEB: desde um simples uso para monitoramento de processo até o uso para manutenção e monitoramento remoto de aplicações, as estações WEB passaram a fazer parte.

De maneira geral, os supervisórios são estruturados ao redor de um núcleo. Neste núcleo, toda a aquisição de dados dos CLP's, dos instrumentos e dos medidores é coordenada a partir de *drivers* de comunicação (SOUZA, 2016).

Em tese, os sistemas supervisórios possuem subdivisões, conforme exemplificadas na Figura 2, as quais caracterizam o seu funcionamento. São elas: os sensores e atuadores, as estações remotas, a rede de comunicação, a estação de monitoramento central e a geração de alarmes industriais.



Fonte: Figura extraída de (ELIPSE, c2019).

Os sensores e atuadores são dispositivos encontrados no campo e estão ligados direto aos equipamentos. O sensor é responsável por converter os parâmetros físicos em analógicos e digitais que são enviados para as remotas. Esses parâmetros podem ser, temperatura, pressão, nível, status de funcionamento de máquina, dentre outros. Os atuadores são dispositivos que executam ações sobre o processo, podendo ligar, desligar, movimentar, ou modificar determinadas ações dos equipamentos (ELIPSE, 2019; ANDRADE, 2018).

A estação remota é onde se tem o início da aquisição de dados. São utilizados CLP's ou RTU's (Unidade Terminal Remota). Esses dois são dispositivos eletrônicos que possibilitam a comunicação entre a estação de monitoramento central e os equipamentos monitorados. Eles também captam os dados vindos dos sensores assim como realizam cálculos, execuções e apresentações de saída. Eles também são capazes de armazenar todos os dados que são adquiridos no processo (ELIPSE, 2019; ANDRADE, 2018).

A rede de comunicação é a plataforma que realiza o fluxo das informações de uma estação remota para a estação de monitoramento central. Para implementar as redes de comunicação tem que analisar alguns requisitos do sistema e também a distância. Ela pode ser implementada através de cabos Ethernet, fibras ópticas, linhas *dial-up*, linhas dedicadas e rádio (ELIPSE, 2019; ANDRADE, 2018).

As estações de monitoramento central cuidam do monitoramento e da supervisão do sistema. Elas pegam as informações que vem das estações remotas e agem de acordo com os eventos que são apresentados. Essas estações podem ser centralizadas, mostrando tudo em um só computador ou podem ser distribuídas em vários computadores numa rede de compartilhamento de dados (ELIPSE, 2019; ANDRADE, 2018).

2.5 CLP e Linguagem Ladder

Quando se fala em automação industrial e otimização de processos, o CLP é peça fundamental para esse processo. Tendo como funcionalidade controlar, monitorar, executar rotinas, gerar alarmes e muitas outras funcionalidades, tem-se que o CLP é o cérebro de uma indústria.

No início dos anos 70, devido a problemas nas linhas de produção, a indústria automobilística iniciou o desenvolvimento do CLP. Com a complexidade no processo fabril de carros e com a necessidade de produzir modelos diferentes de veículos, foi necessário o desenvolvimento de um equipamento de fácil programação e manutenção, além de apresentar maior resistência ocupando um volume menor de espaço (SIEMBRA, c2022).

Com o passar do tempo e ao passo em que a tecnologia evoluiu, os CLP's acompanharam o desenvolvimento e se tornaram dispositivos cada vez mais sofisticados. Hoje, o CLP é composto por (MARINHO, c2022):

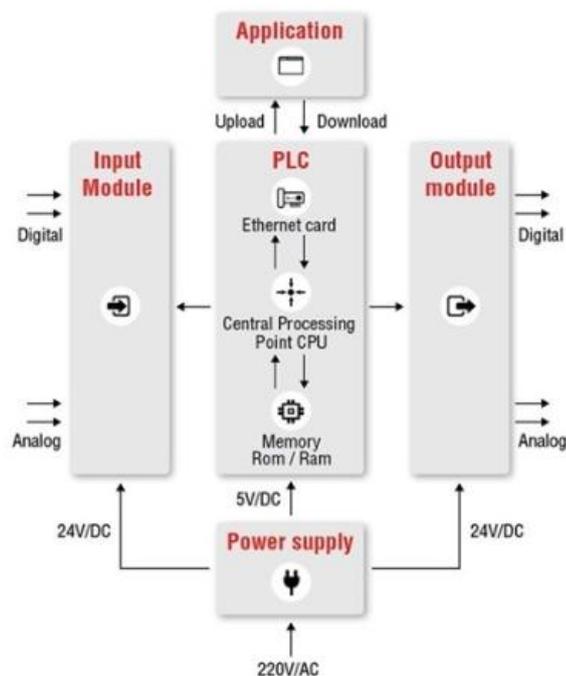
- Fonte de alimentação: onde qualquer parada inesperada pode gerar custos de produção e em alguns casos até danificar equipamentos, tem-se a necessidade de

uma operação em alto nível durante 24 horas por dia. Dessa maneira, a alimentação constante do CLP é crucial e em muitos casos redundâncias de alimentação são utilizadas para evitar a falta de energia;

- CPU ou processador: é a parte do CLP responsável por realizar as operações de programação lógica, executando programas e realizando comunicações entre outros dispositivos;
- Memória: consiste em armazenar todas as informações necessárias para realizar as lógicas de programação, tais como: valores de entradas e saídas, valores comparados em malhas de controle, variáveis de processo e o programa criado pelo usuário;
- Entradas e saídas: podendo ser analógicas ou digitais, são responsáveis por conectarem o CLP com os equipamentos e máquinas, onde coletam informações de sensores, transmissores, instrumentos e realizam ações como modular válvulas, relés, acionarem motores e comandarem processos;
- Comunicação: serve para estabelecer conexões entre uma malha de CLP's, denominados de "Nós", além de exportar dados para sistemas supervisórios de controle.

A arquitetura de um CLP pode ser exemplificada de acordo com a Figura 3.

Figura 3 - Arquitetura de um CLP



Fonte: Figura extraída de (MARINHO, c2022).

Atualmente, a utilização de um CLP no setor industrial se tornou essencial para o controle e otimização do processo fabril, desse modo, apresentando inúmeros benefícios como (ELLER, s.d.):

- Possibilidade de monitoramento em tempo real de uma malha de CLP's integrados de maneira *on-line*;
- Apresentam fácil configuração e programação, sendo possível realizar alterações em processos sem demandar espaço, aceitando a inclusão ou extração de módulos de entradas e saídas de acordo com a demanda do processo;
- A partir da programação, é possível a indicação de erros ou falhas ao usuário, como por exemplo quando é perdido o sinal de alguma entrada, é possível que exista alguma lógica conflitante em sua configuração;
- Possui uma resposta rápida para realizar controles e coletar informações.

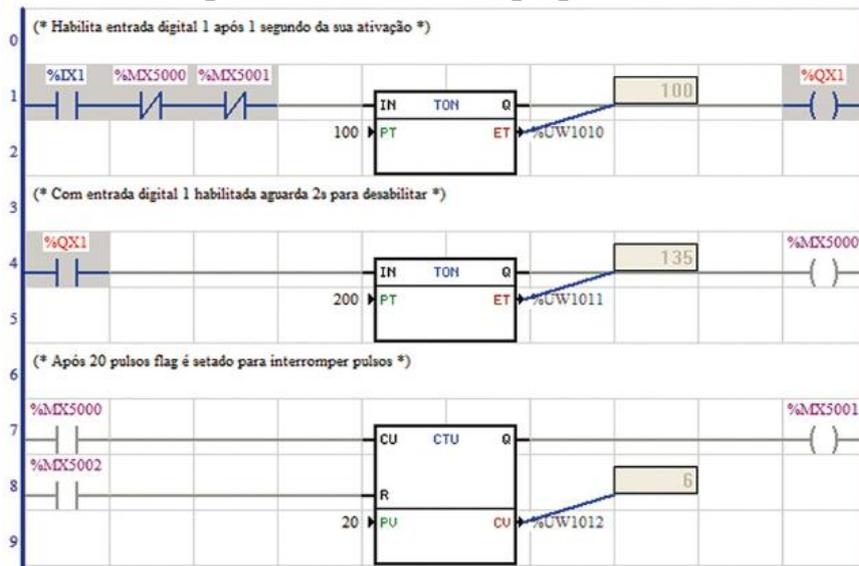
Para o funcionamento de um CLP, a parte principal é a programação realizada pelo usuário. Junto com a criação do equipamento surgiu então a linguagem *Ladder* de programação. Essa linguagem foi a primeira a ser desenvolvida e tem sido a mais utilizada até nos dias de hoje (MARTINS, 2020).

Basicamente, a linguagem *Ladder* apresenta três tipos de elementos que realizam o controle do sistema, sendo eles (MARTINS, 2020):

- Entradas ou contatos: responsáveis por coletarem valores de variáveis físicas ou virtuais, podendo ser normalmente abertas ou normalmente fechadas;
- Saídas ou bobinas: onde podem escrever o valor das variáveis de entrada ou ativarem uma memória;
- Blocos funcionais: são dispositivos que proporcionam funções avançadas, como temporizadores, blocos de leitura analógica, contadores, etc.

A linguagem *Ladder* é exemplificada pela Figura 4, onde por meio de linhas de programação (“escadas”), é possível visualizar os três elementos utilizados na programação.

Figura 4 - Estrutura da linguagem Ladder



Fonte: Figura extraída de (WEG, 2022).

2.6 Sistemas de Controle

Atualmente, para realizar a automatização de uma planta e a programação de CLP, muito se utiliza do termo “Sistemas de controle”. Este, baseia-se em um conjunto de partes e componentes conectados onde configuram um todo e são capazes de obter um desempenho desejado pelo sistema (MARUYAMA, 2017).

Tratando-se então do Sistema de controle industrial, podem ser obtidas as seguintes definições (UFRN, 2003):

- Sistema: refere-se ao conjunto de equipamentos, sensores, atuadores, produtos que compõe determinado sistema de produção;
- Controle: define-se em agir e controlar de maneira a alcançar o resultado desejado de determinado sistema de produção;
- Controlador: é o dispositivo responsável por realizar o controle;
- Sistema de controle: trata-se do conjunto entre o sistema de produção que necessita ser controlado e o controlador aplicado;
- Sistema de controle em malha aberta: um sistema em malha aberta tem como característica não possuir realimentação, dessa maneira, sua saída não interfere na entrada;
- Sistema de controle em malha fechada: um sistema em malha fechada possui sistema de realimentação. Desse modo, a saída é comparada com o sinal de

entrada de forma a obter a saída ideal desejada, fazendo com que a saída interfira no sinal de entrada.

No meio industrial, um dos controles mais utilizados denomina-se controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID).

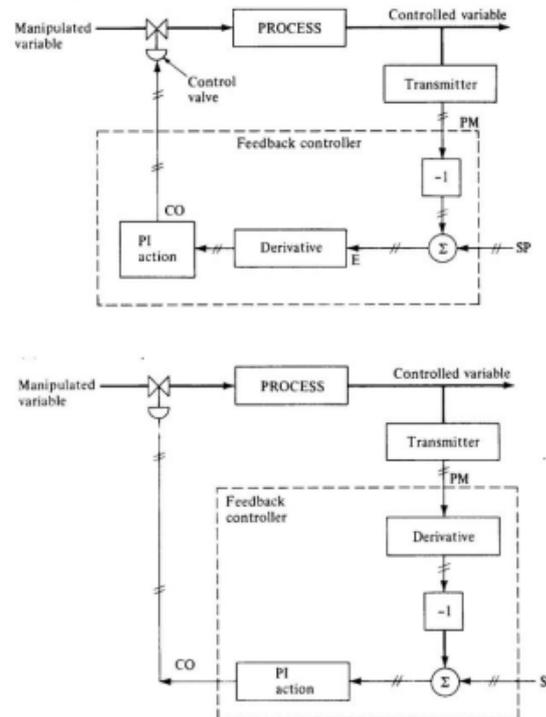
O termo “proporcional” tem como função simplesmente multiplicar o sinal de erro pelo ganho proporcional (K_p) para obter a saída do controlador. Utilizar somente o controle proporcional faz com que o aumento do ganho deixe o sistema mais instável, melhorando o regime permanente e piorando o estado transitório, sendo considerado muito limitado (UFRN, 2003).

O significado para “integral” é o ganho que serve para atingir o valor da variável desejada de forma mais precisa e obtendo um ganho mais suave do que apenas proporcionalmente. Utiliza-se o controle proporcional e integral quando existe uma resposta transitória satisfatória e a resposta em regime permanente ainda não está adequada (UFRN, 2003).

Já a função do “derivativo” é agir de maneira a diminuir a oscilação em torno de um *setpoint* estabelecido, tornando-a a menor possível. Possui a característica de além de minimizar a grandeza do erro, também antecipa a tendência do mesmo para instantes futuros. Utiliza-se o controle proporcional e derivativo quando a resposta em regime permanente é satisfatória e a resposta transitória ainda não é adequada (UFRN, 2003).

Unindo as três características, cria-se então o controle PID, sendo utilizado quando a resposta transitória e em regime permanente são insatisfatórias. A Figura 5 demonstra dois diagramas PID, nota-se que o controle derivativo é feito separadamente do controle PI, em uma ocasião, atuando sobre o sinal de erro e em outra, atuando sobre a variável de processo (UFRN, 2003).

Figura 5 - Diagrama de Controle PID



Fonte: Figura extraída de (UFRN, 2003).

Por fim, é possível relacionar o controle PID com a programação *Ladder* de um CLP. Um ponto considerável é que cada fabricante de CLP possui suas particularidades na programação, então utilizar a mesma lógica de programação de um fabricante em outro não é uma das atividades mais simples; na maioria das vezes, a lógica deve ser reescrita de acordo com os padrões do determinado fabricante. O desenvolvimento do controle PID pode ser feito todo a partir da lógica *Ladder*, o que algumas vezes é mais suscetível ao erro do programador, podendo ser desenvolvida a partir do bloco PID presente no *software*, ou também a partir do desenvolvimento de equações em forma de algoritmo (MARUYAMA, 2017).

2.7 Siderúrgicas

Um processo siderúrgico é responsável basicamente pela transformação do minério de ferro em aço. No ramo das usinas siderúrgicas, as mesmas são classificadas de duas maneiras: as usinas integradas e as semi-integradas. As usinas integradas consistem em executar todo o processo industrial até a produção do aço em uma mesma unidade industrial. As usinas semi-integradas, realizam somente algumas partes do processo.

De acordo com o Instituto Aço Brasil (c2022), o processo industrial é dividido em quatro etapas:

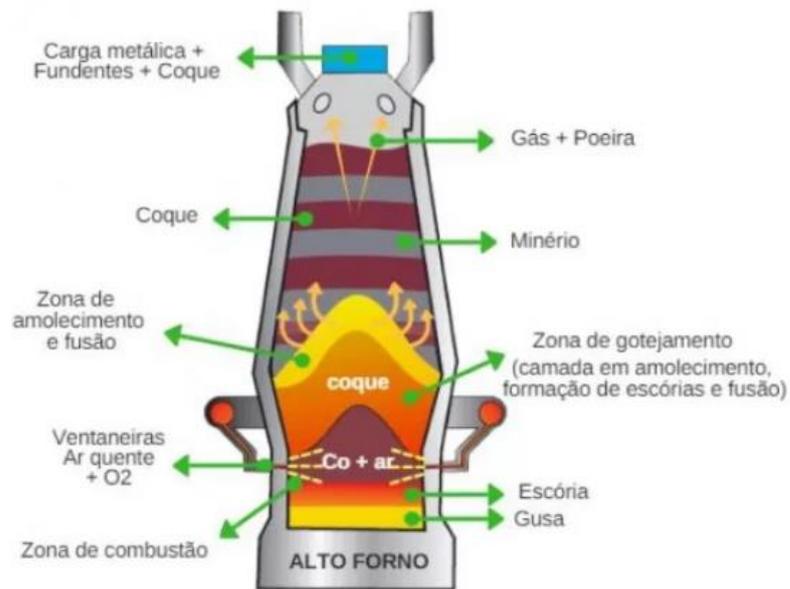
- Preparação de carga: onde o minério de ferro, passando pela injeção de finos, é juntado à cal e coque, resultando no sinter;
- Redução: após a preparação da carga, as mesmas são dispostas e realizam o carregamento do Alto Forno. O Alto Forno possui a sala de máquinas e os Glendons que realizam a função de aquecer o ar para alimentar as ventaneiras que ficam na parte inferior do forno. A partir da coroa de ar quente, o ar é distribuído entre as ventaneiras e soprado para dentro do forno a temperaturas próximas de 1000°C. Misturando a carga e as altas temperaturas do Alto Forno, o calor produzido funde a carga metálica realizando o processo de redução do minério de ferro no conhecido ferro-gusa;
- Refino: saindo do Alto Forno, o ferro-gusa é transportado até as aciarias, onde recebem o gusa líquido e misturam com as sucatas de ferro para obter o aço líquido. O aço líquido é então solidificado em lingotes e blocos;
- Laminação: a laminação é responsável por transformar os lingotes e blocos provenientes do refino em uma grande variedade de produtos siderúrgicos.

2.7.1 Glendons Siderúrgicos

Quando diz respeito ao ramo siderúrgico, é compreendido sobre ser um cenário muito agressivo, onde todos os processos são muito robustos e de características extremamente perigosas.

Em relação ao processo de refino abordado, encontra-se um dos ambientes mais perigosos do setor siderúrgico. A Figura 6 apresenta a forma estrutural de um Alto Forno.

Figura 6 - Estrutura de um Alto Forno.



Fonte: Figura extraída de (Conexão Mineral, 2018).

O Alto Forno pode ser considerado como um reator de contracorrente e tem como princípio básico de funcionamento através da combustão do monóxido de carbono (CO) com o ar quente rico em oxigênio que é inserido no interior do Alto Forno em grande velocidade a partir das ventaneiras. O CO é considerado um gás redutor, no qual, juntamente com o processo de aquecimento, os gases sobem em contracorrente ao material que é inserido pelo topo do forno e reduz o minério de ferro em ferro gusa e escória (VIEIRA, 2016).

Abordando então o ar quente injetado no interior do Alto Forno através das ventaneiras, tem-se, como elemento primário, os trocadores de calor, conhecidos como Glendons Siderúrgicos, retratados na Figura 7. Tratando-se da elevada temperatura no interior do Alto Forno, se o ar inserido possuir temperatura ambiente, o consumo de combustível como o coque seria muito maior. Dessa forma, o Gás de Alto Forno (GAF), é purificado e reutilizado na combustão das câmaras de Glendon para aquecer o ar (RIZZO, 2009).

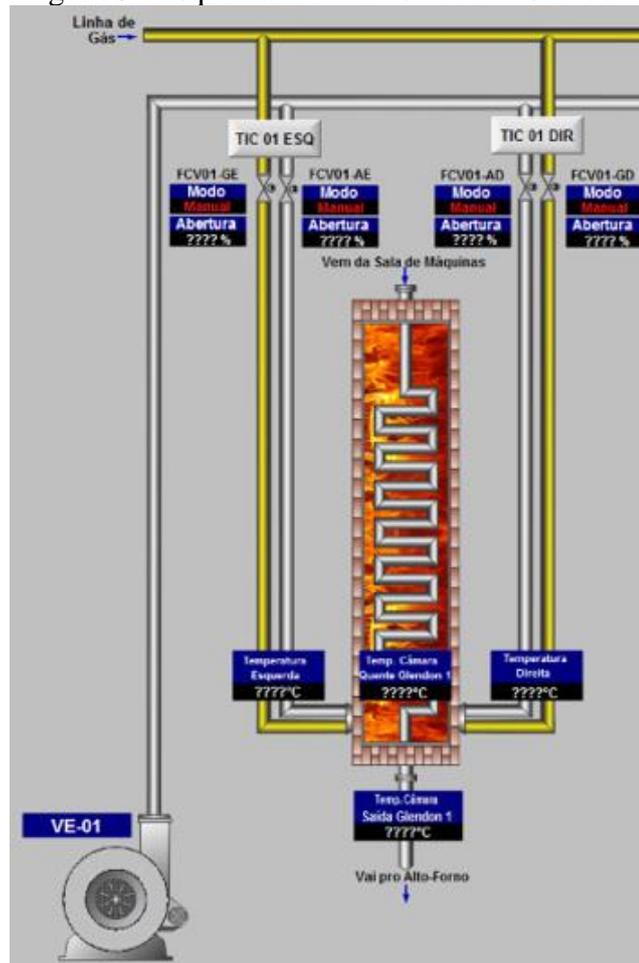
Figura 7 - Glendon Siderúrgico.



Fonte: Próprio autor.

O Glendon consiste em receber o ar ambiente em alta velocidade proveniente da sala de máquinas, onde dentro de sua câmara refratária, as garrafas de ferro fundido conduzem o ar, que é aquecido a partir da inserção de ar gerado pelo ventilador de combustão e GAF, conforme esquemático da Figura 8. Após o ar percorrer todo o percurso das garrafas do Glendon, é inserido no forno a partir da coroa de ar quente que distribui o ar nas ventaneiras a temperaturas entre 1000°C e 1500°C (VIEIRA, 2016).

Figura 8 - Esquemático interior de um Glendon.



Fonte: Próprio autor.

A partir do princípio de funcionamento do Glendon, nota-se ser um processo agressivo e perigoso. A temperatura elevada dentro das câmaras, a alta pressão existente e o GAF que é um gás tóxico, torna o ambiente inseguro e em determinadas siderúrgicas considerado como espaço confinado.

Para o controle de vazão de ar e gás utilizados para a combustão, faz-se uso de válvulas borboletas, onde em alguns lugares, são controladas manualmente pelos operadores de campo. Para o controle de temperatura, utiliza-se de instrumento denominado termopar, em sua maioria, contendo dois tipos: K e S.

3. METODOLOGIA

Considerando a importância de um Glendon Siderúrgico no processo industrial de fabricação de ferro gusa, as temperaturas elevadas, a alta pressão dentro das câmaras, e todo o ambiente agressivo periférico, tem-se necessidade de um funcionamento automático para o controle de válvulas reguladoras de vazão de gás e ar. Dessa forma, este capítulo consiste em abordar o processo de desenvolvimento de uma automação completa de Glendon.

A primeira etapa de desenvolvimento consiste no projeto da instrumentação e pirometria para o controle de temperatura ao longo de todas as câmaras. Na parte inicial, próximo a entrada de ar proveniente da sala de máquinas, são utilizados termopares do tipo K, pois funcionam melhor para a temperatura em questão naquela região. À medida que o ar circula, passa a ser utilizado o termopar tipo S, mais robusto e melhor para a temperatura mais elevada.

Em seguida, para a automação das válvulas borboletas, faz-se uso de um atuador elétrico conforme a Figura 9, para otimizar seu funcionamento.

Figura 9 - Atuador elétrico.



Fonte: Figura extraída de (SMAR).

Este recebe os comandos elétricos do Centro de Comando de Motores (CCM) e abre ou fecha a válvula reguladora de vazão. Em sua estrutura elétrica, possui mecanismo que transmite sua porcentagem de abertura.

Dando continuidade ao projeto, todas as entradas e saídas (I/O's) utilizadas para o desenvolvimento são levantadas após a finalização do projeto elétrico, definindo os endereços a serem utilizados e dando início a programação e estruturação das lógicas de CLP.

As entradas analógicas do CLP são responsáveis por receber as variáveis: temperatura das câmaras e porcentagem das válvulas. As entradas digitais recebem informações dos seguintes estados: equipamento aberto, equipamento fechado, limite de torque aberto, limite de torque fechado e defeito elétrico. As saídas digitais realizam os comandos: abre válvula e fecha válvula.

O desenvolvimento da lógica baseia-se em absorver as informações coletadas pelo CLP e realizar comandos, acionamentos e sistemas de controle para que o funcionamento de determinado processo opere de forma automática.

Com isso, a partir dos valores de temperatura medidos no interior das câmaras do Glendon, a lógica construída realiza o sistema de controle Proporcional Integral Derivativo (PID) dos atuadores das válvulas de ar e gás de combustão, regulando a temperatura de entrada do Alto Forno.

Com toda a parte de campo e programação executada, por fim, são criados os sistemas supervisórios, de onde extraem as informações do CLP e transmitem de forma visual e interativa as informações aos operadores de painel. A partir da comunicação *Profinet* utilizada, o sistema supervisório transmite os comandos de abrir e fechar as válvulas, onde o operador consegue solicitar valores específicos desejados de porcentagem de abertura das válvulas. A partir de valores solicitados e da temperatura requerida no forno, o controle PID realiza o sistema de controle automático dos Glendons Siderúrgicos.

O capítulo a seguir apresenta todos os resultados obtidos através dos procedimentos de desenvolvimento descritos nesse capítulo.

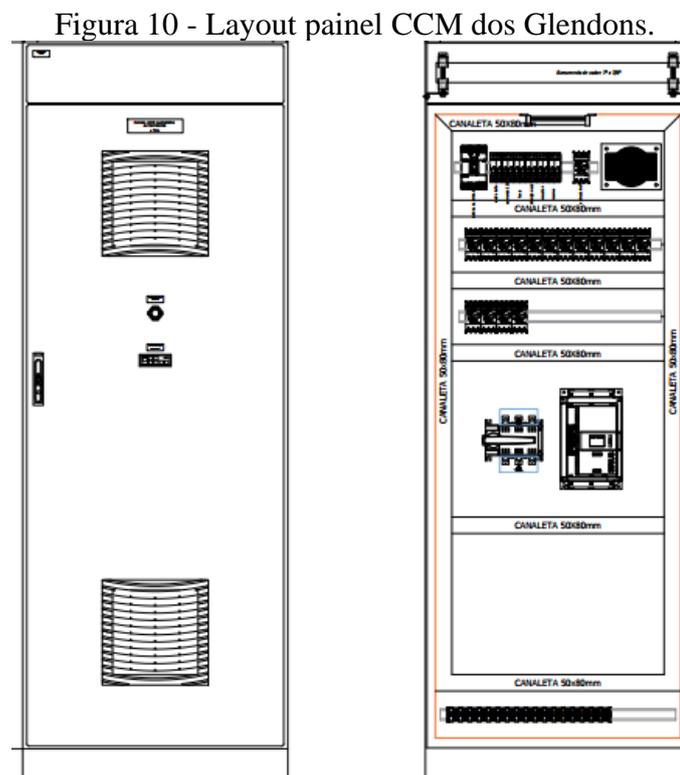
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para atender aos objetivos do trabalho, as etapas de projeto elétrico e de instrumentação, desenvolvimento de lógica de automação e telas de supervisor foram desenvolvidas para analisar a viabilidade da automação do processo industrial de Glendons Siderúrgicos. Este capítulo apresenta o desenvolvimento de todas as etapas do projeto em questão e as análises de viabilidade de implementação.

4.1 Instrumentação dos Glendons

Tratando-se da instrumentação dos Glendons, contemplando a pirometria e os atuadores, fez-se necessário o desenvolvimento de um projeto elétrico de um painel CCM e de um painel CLP.

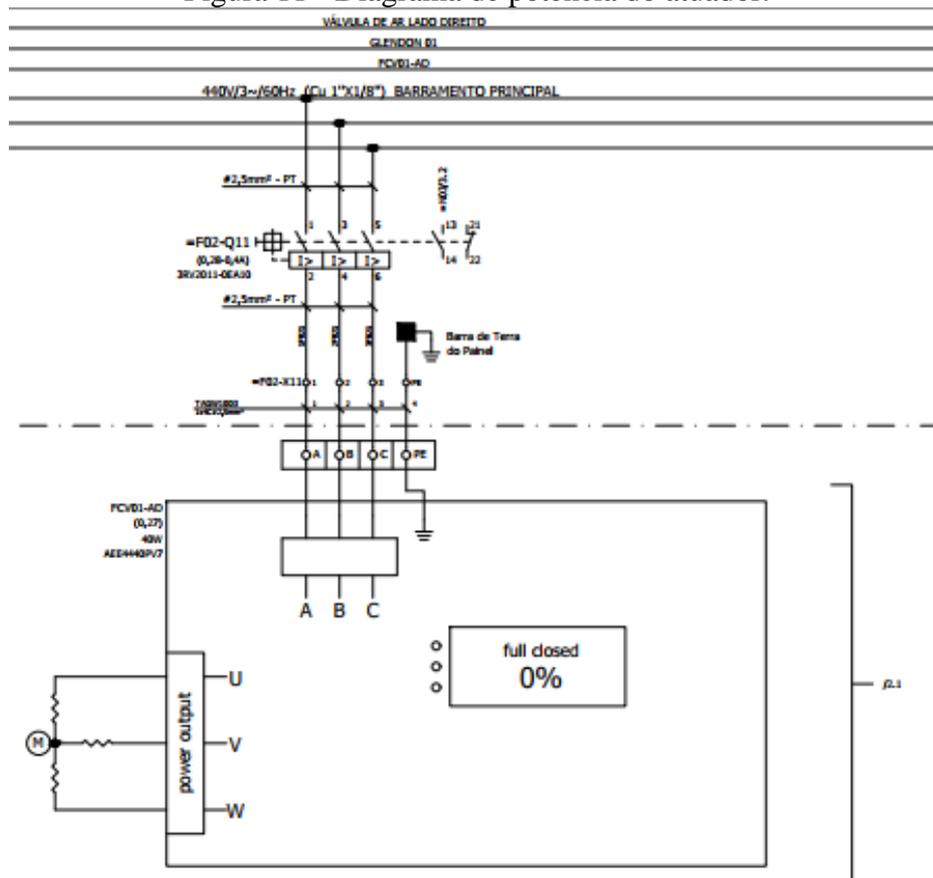
A Figura 10 apresenta o layout do painel CCM, responsável por receber alimentação 440V em um disjuntor geral e alimentar os circuitos de potência de cada atuador motorizado para abertura e fechamento das válvulas passando por disjuntores e proteções específicas para cada circuito.



Fonte: Próprio autor.

Para o desenvolvimento do projeto, foi considerado um conjunto de quatro Glendons Siderúrgicos, dessa maneira, o projeto contempla 16 atuadores motorizados para controle das válvulas de gás e ar. Todos os acionamentos utilizam disjuntor motor para realizar a proteção do circuito. A Figura 11 demonstra parte do projeto elétrico exemplificando as ligações elétricas de potência nos atuadores.

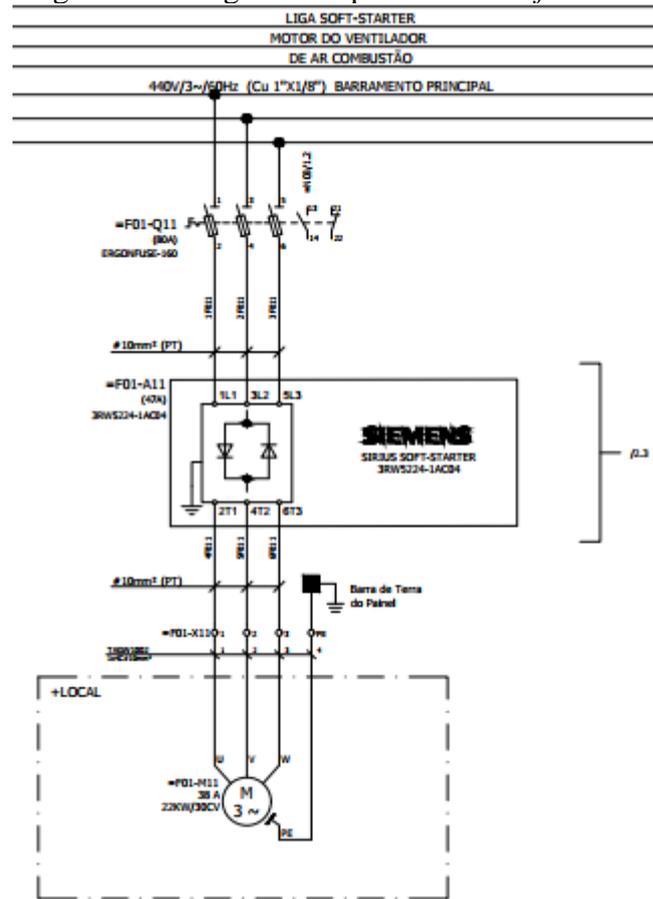
Figura 11 - Diagrama de potência do atuador.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 12 exemplifica o restante das ligações elétricas nos atuadores, sendo elas as ligações de comando para abertura e fechamento da válvula e os sinais que são enviados para o CLP, tais como válvula aberta, válvula fechada, falha elétrica e porcentagem de abertura.

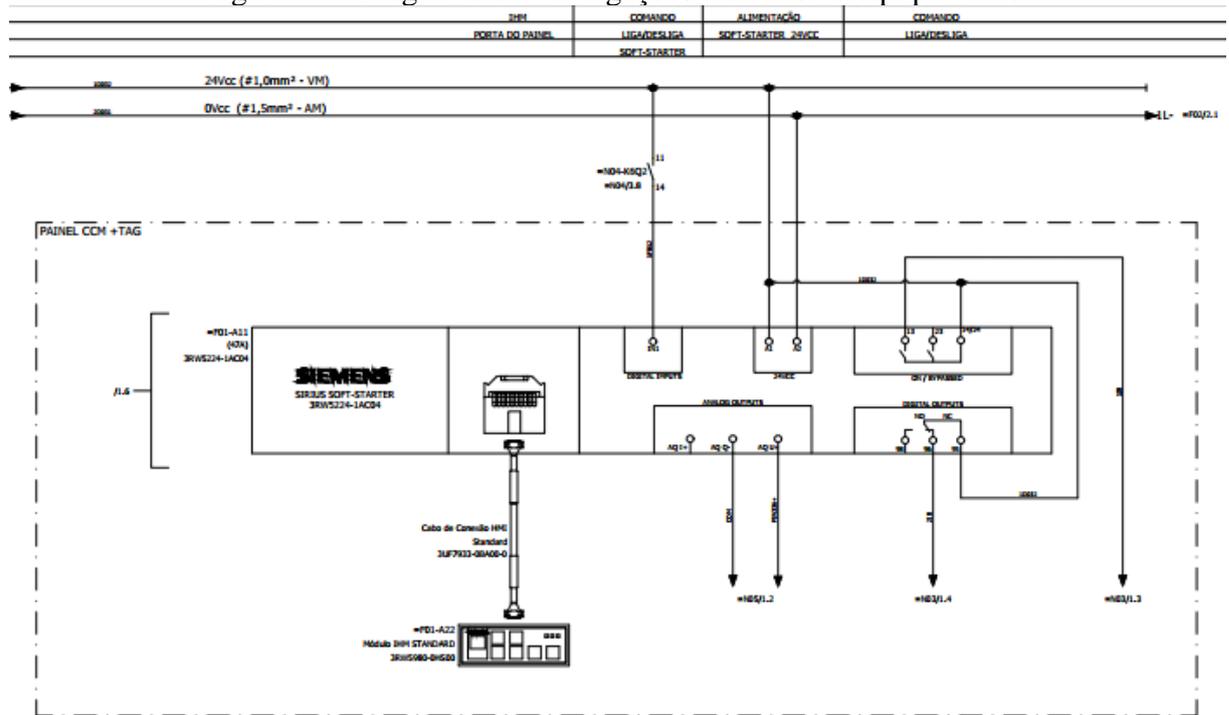
Figura 13 - Diagrama de potência da *Soft-Stater*.



Fonte: Próprio autor.

Para o acionamento remoto da *Soft-Stater*, foi utilizado uma entrada digital do equipamento para receber o comando liga/desliga. O equipamento também possui saída analógica para referência de velocidade e saídas digitais para retro avisos de equipamento ligado e equipamento com defeito. A Figura 14 demonstra o projeto elétrico das interligações na *Soft-Starter*.

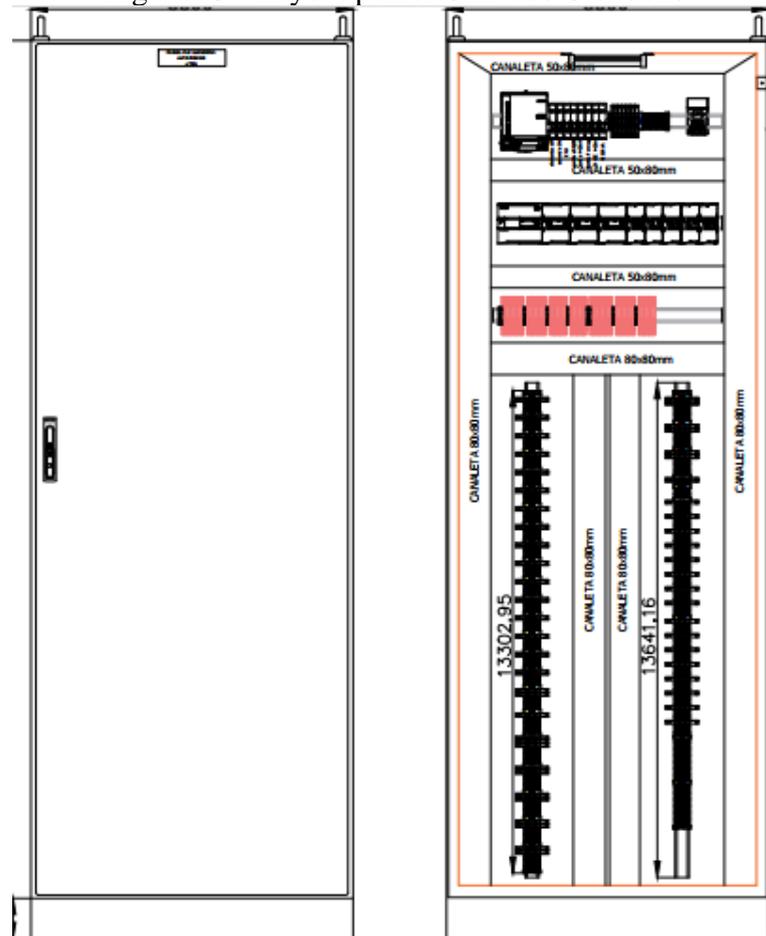
Figura 14 - Diagrama de interligações elétricas no equipamento.



Fonte: Próprio autor.

Com os acionamentos de potência concluídos, o projeto deu início ao desenvolvimento dos comandos de CLP. A Figura 15 apresenta o layout do painel CLP, responsável por receber todos os cabos de sinais digitais e analógicos e destiná-los as entradas e saídas corretas do CLP, realizando leituras de dados, comandos de válvulas e controles de processo.

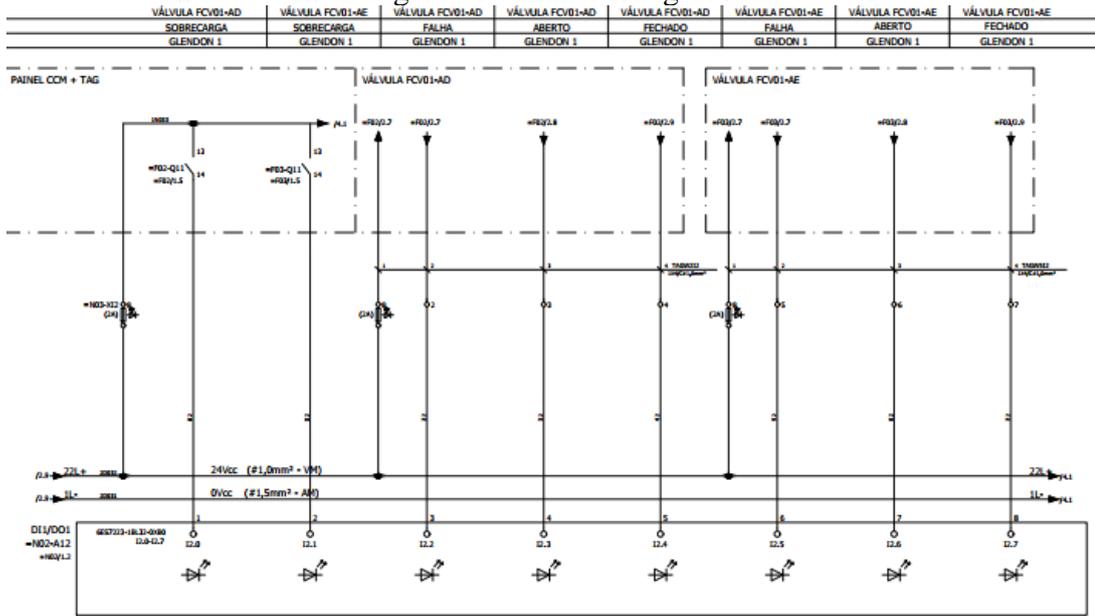
Figura 15 - Layout painel CLP dos Glendons.



Fonte: Próprio autor.

Para o projeto em questão, o CLP escolhido foi o modelo CPU S7-1200, da fabricante Siemens, juntamente com três cartões DI/DO, um cartão de DI e quatro cartões de AI. O dimensionamento do equipamento deve-se ao melhor tempo de resposta da memória ao exibir gráficos, ao tamanho do equipamento e a fabricante escolhida. A Figura 16 da continuidade no projeto com as interligações de alimentação do *hardware* CLP.

Figura 17 - Entradas digitais.



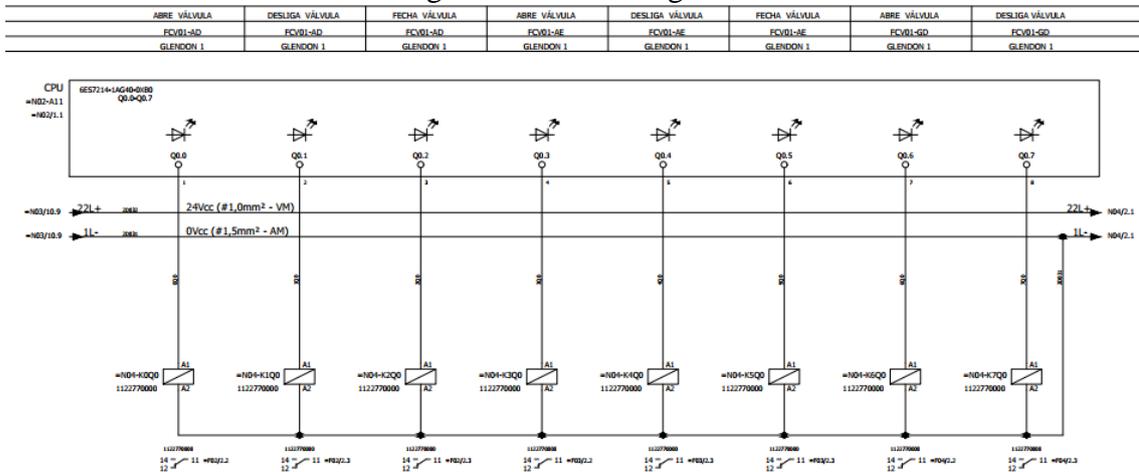
Fonte: Próprio autor.

Nas saídas digitais, tem-se os comandos:

- Abre válvula;
- Fecha válvula;
- Desliga válvula;
- Liga *Soft-Starter*;
- Liga sirene defeito geral.

A Figura 18 exemplifica uma parte das saídas digitais descritas nos tópicos acima.

Figura 18 - Saídas digitais.



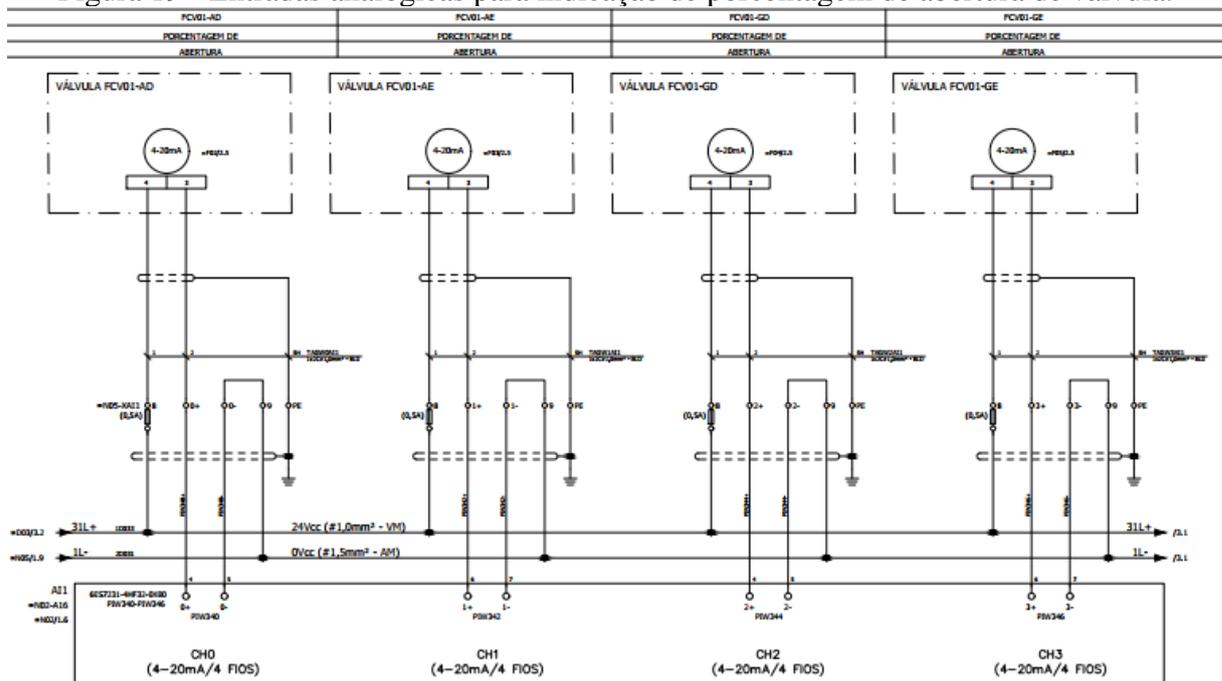
Fonte: Próprio autor.

Nas entradas analógicas, são lidos os sinais:

- Leitura de corrente da *Soft-Start*;
- Porcentagem de abertura de cada uma das válvulas de gás e ar;
- Temperatura do lado direito de cada Glendon;
- Temperatura do lado esquerdo de cada Glendon;
- Temperatura de saída de cada Glendon;
- Temperatura do teto de cada Glendon.

A leitura de corrente da *Soft-Start* vem a partir de uma saída analógica do equipamento e permite ter uma referência de velocidade. Os atuadores elétricos possuem um mecanismo que permitem a transmissão de sinal para identificar a porcentagem de abertura da válvula. Para as temperaturas, utilizando termopares e seus princípios de medição, o CLP consegue realizar a leitura dos valores medidos. A Figura 19 demonstra a ligação dos atuadores nas entradas analógicas do cartão.

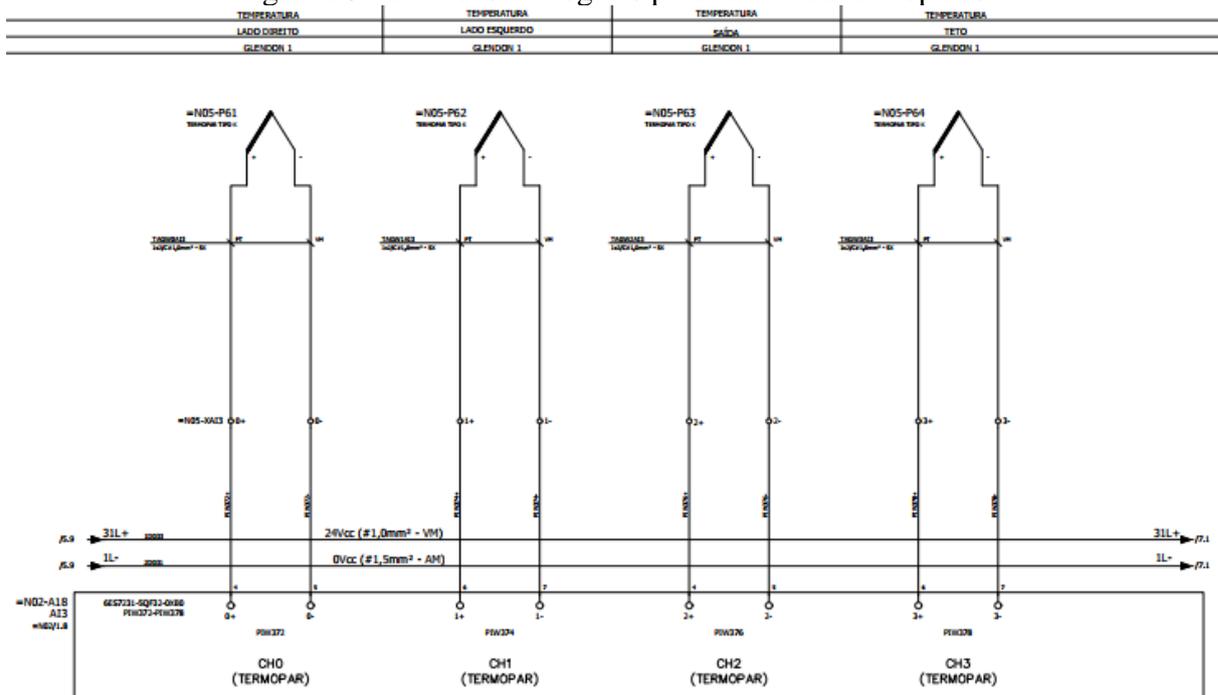
Figura 19 - Entradas analógicas para indicação de porcentagem de abertura de válvula.



Fonte: Próprio autor.

Para a leitura de temperatura, foram utilizados cartões próprios para a leitura de termopares, evitando, dessa maneira, a utilização de conversores. A Figura 20 apresenta as interligações de termopares.

Figura 20 - Entradas analógicas para leitura de termopares.



Fonte: Próprio autor.

Com as saídas analógicas concluídas, o projeto elétrico então foi finalizando contendo diagramas unifilares, diagramas trifilares, a parte de força e potência para acionamento das válvulas e toda a parte de lógica para leitura de sinais e execução de comandos e controle de processos.

4.2 Programação de CLP

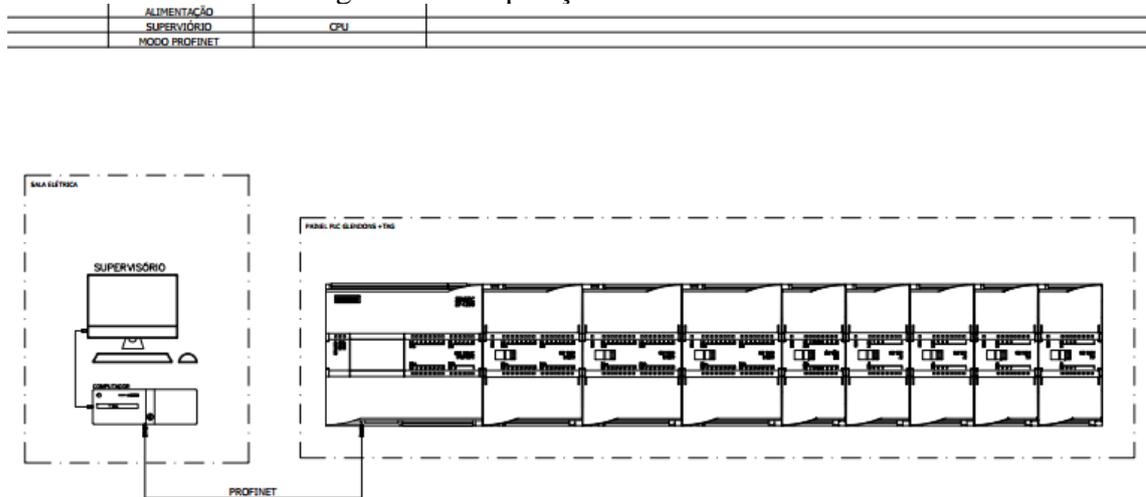
Com o projeto elétrico finalizado, o projeto da automação consiste em desenvolver toda a lógica do CLP, utilizando linguagem Ladder, blocos e contatos para realizar o controle do processo.

Com a lista de IO's elaborada no início do projeto, a quantidade de entradas e saídas utilizadas foram:

- Entradas digitais: 78;
- Saídas digitais: 58;
- Entradas analógicas: 34.

A partir da lista de IO's foi possível dimensionar o CLP utilizado para o desenvolvimento do projeto. A Figura 21 indica a disposição do *hardware* CLP e seus cartões dentro do painel elétrico.

Figura 21 - Disposição do hardware CLP.

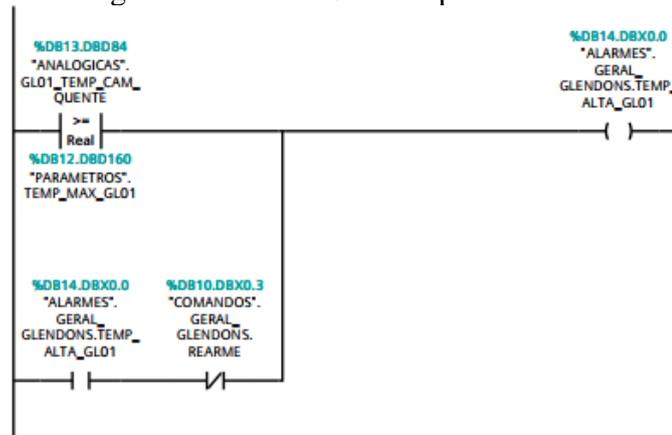


Fonte: Próprio autor.

Para a comunicação em rede e comunicação com os programas de supervisão, foi adotado o protocolo *Profinet*. Este protocolo é uma evolução da rede *Profibus*, possibilitando uma comunicação em alta velocidade, alto volume de transmissão de dados e possui o mesmo padrão elétrico das redes Ethernet, fazendo com que TI (Tecnologia de Informação) e TA (Tecnologia de Automação) comuniquem na mesma linguagem de suporte e engenharia.

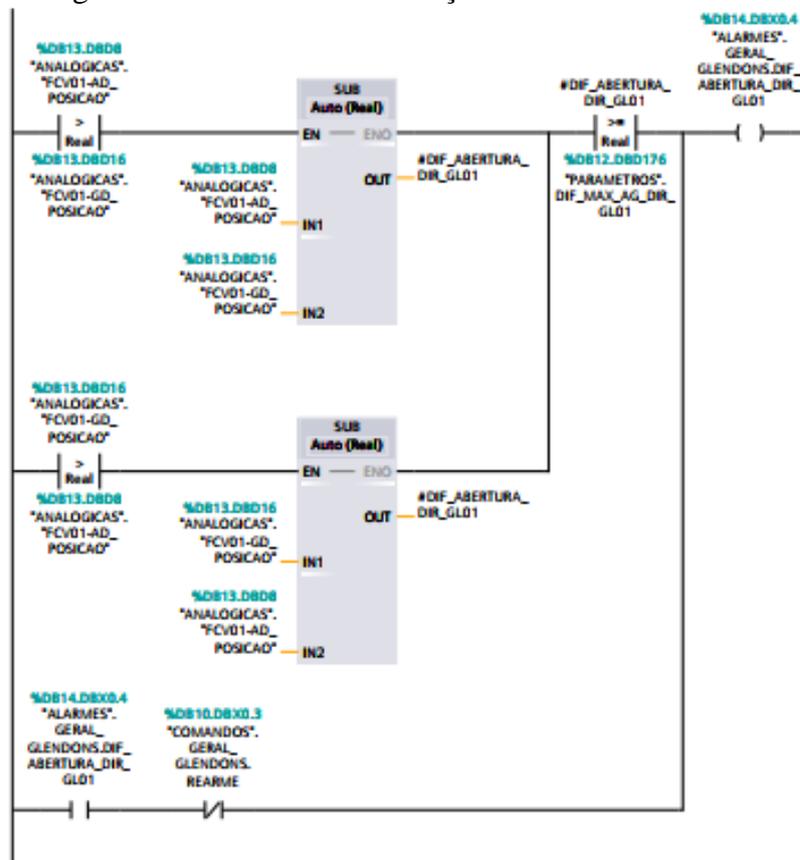
Para a quantidade de IO's requeridas, é necessário o desenvolvimento de uma lógica extensa de programação para atender ao projeto. Como ponto de partida, a programação abrange a elaboração de alarmes gerais e a criação de leitura de dados das entradas analógicas representadas pelas Figuras 22, 23 e 24.

Figura 22 - Alarmes de temperatura alta.



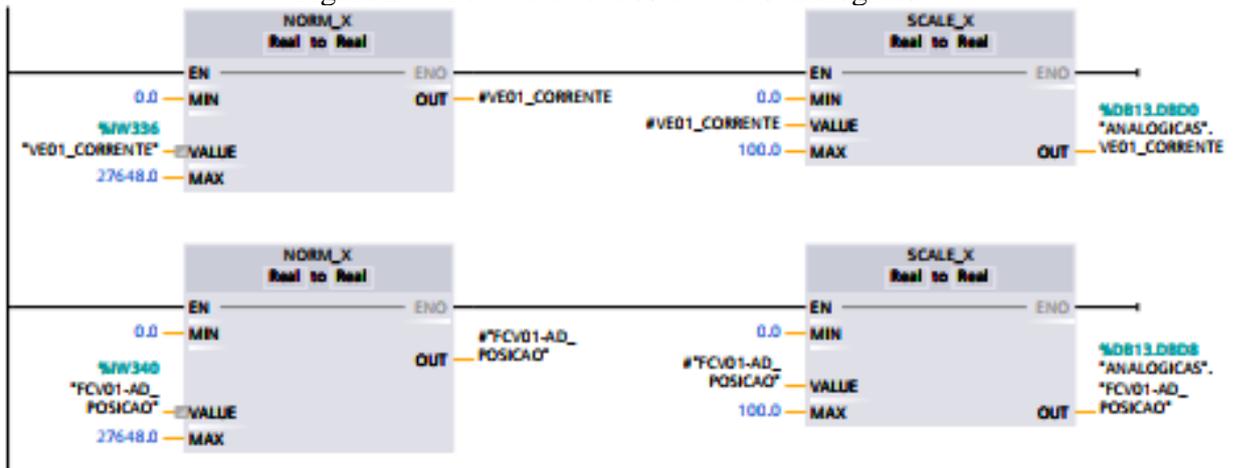
Fonte: Próprio autor.

Figura 23 - Alarmes da diferença de abertura das válvulas.



Fonte: Próprio autor.

Figura 24 - Leitura de dados entradas analógicas.

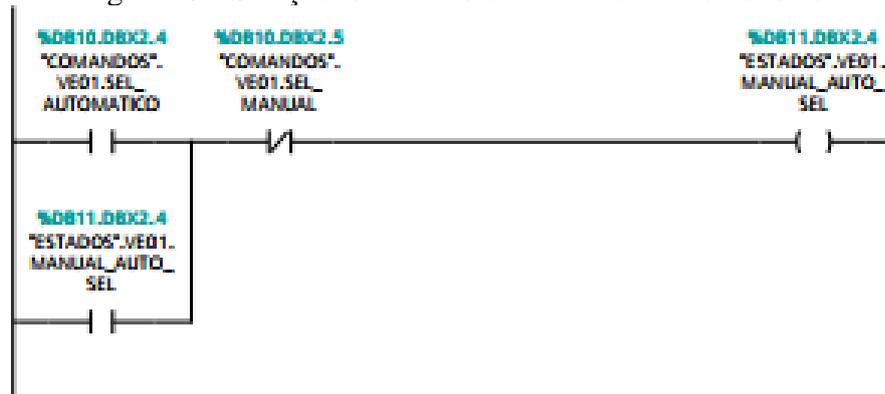


Fonte: Próprio autor.

Dando continuidade à lógica, a programação passa individualmente por cada equipamento, onde é exemplificada pelas Figuras 25, 26, 27 e 28, começando pelo ventilador de ar de combustão e depois com as válvulas dos Glendons, abrangendo:

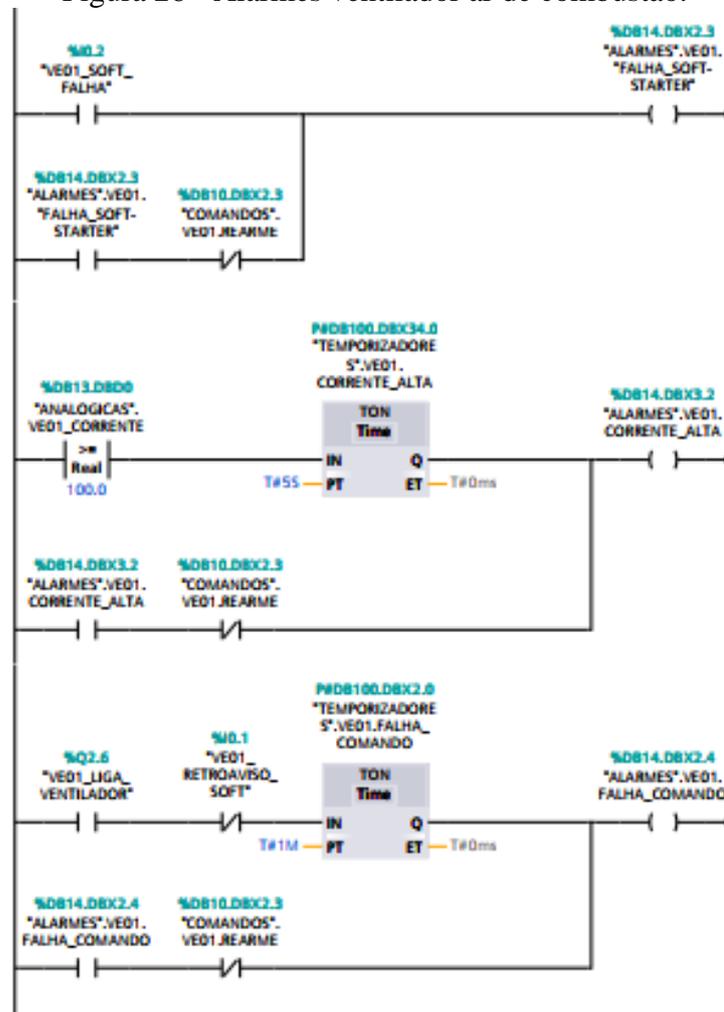
- Seleção local/remoto;
- Abre e fecha em modo manual;
- Comandos de liga e desliga;
- Retornos de equipamento ligado e desligado;
- Falha de *Soft-Starter*;
- Corrente alta;
- Falha de comando;
- Válvula abrindo e válvula aberta;
- Válvula fechando e válvula fechada;
- Defeito;
- Sobrecarga;
- Incoerência de sinais;
- Defeito no módulo de controle da válvula;
- Falha de movimentação da válvula.

Figura 25 - Seleção local remoto ventilador de combustão.



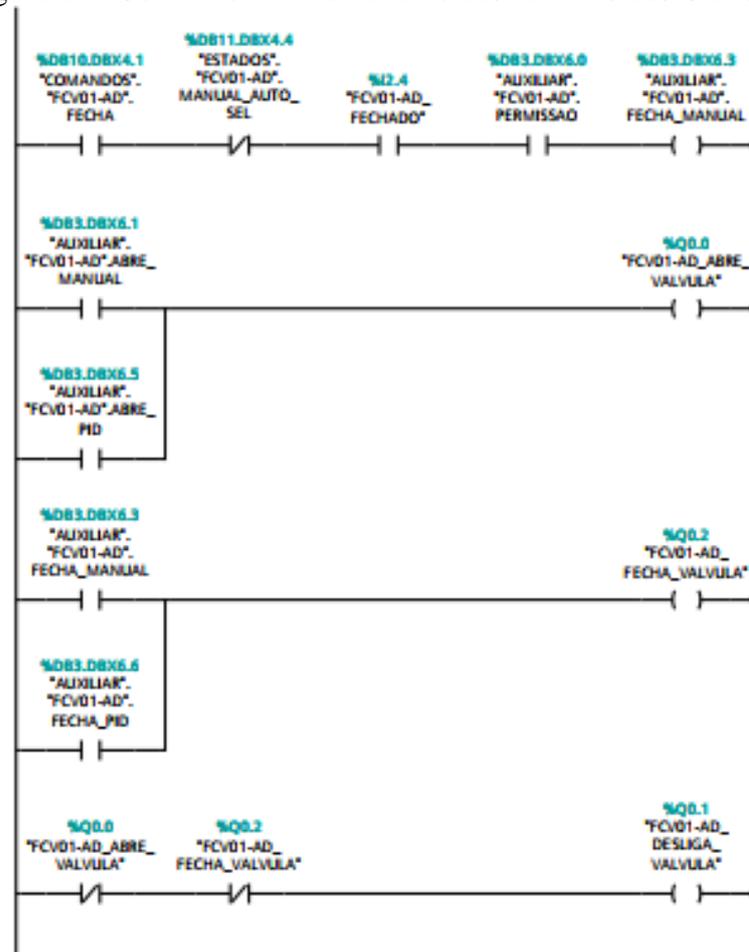
Fonte: Próprio autor.

Figura 26 - Alarmes ventilador ar de combustão.



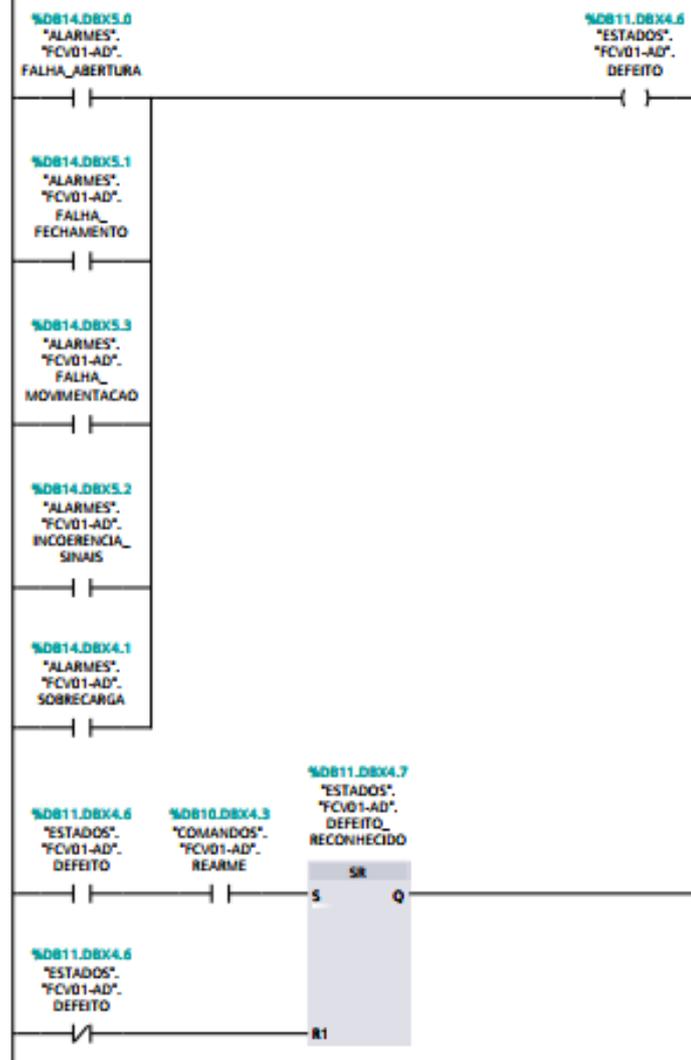
Fonte: Próprio autor.

Figura 27 - Comando de acionamento das válvulas dos Glendons.



Fonte: Próprio autor.

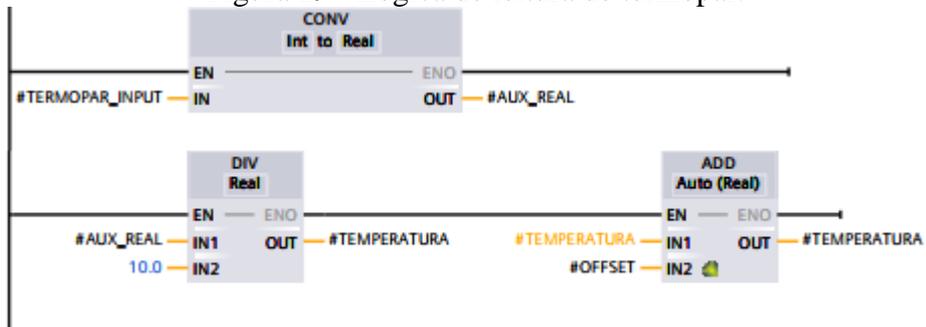
Figura 28 - Retornos de estados das válvulas de Glendon.



Fonte: Próprio autor.

Após a programação individual dos equipamentos, é desenvolvida a lógica para a leitura de temperatura dos termopares conforme Figura 29.

Figura 29 - Lógica de leitura de termopar.

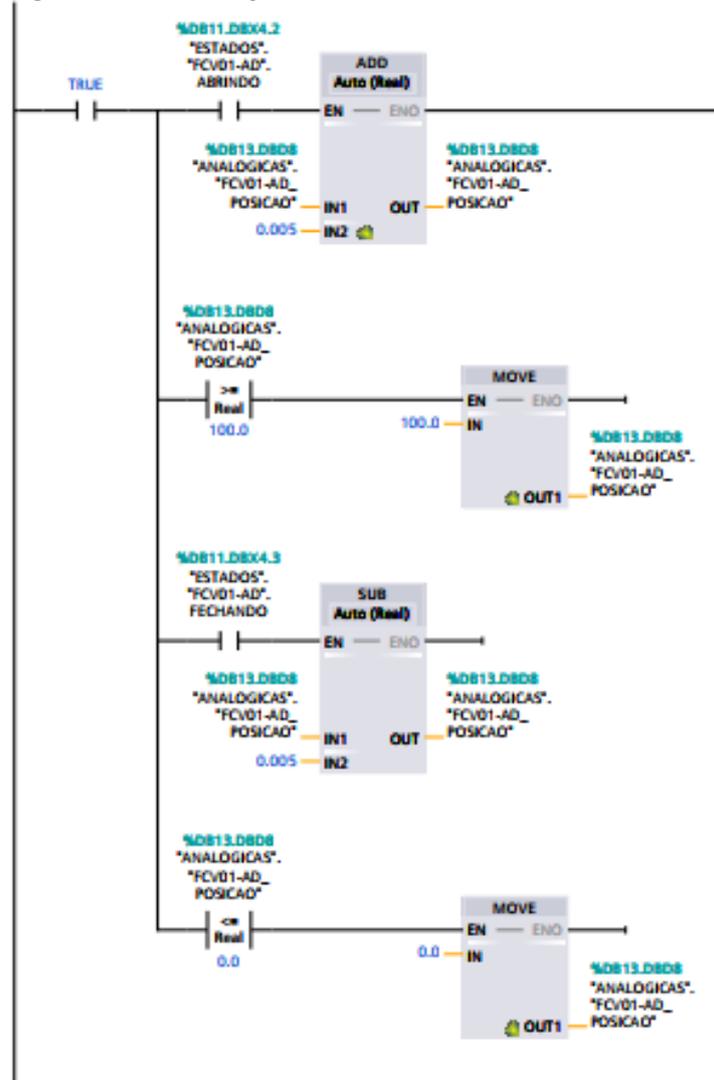


Fonte: Próprio autor.

Com a utilização do cartão específico para leitura de termopar, a lógica consistiu em definir o tipo de termopar e transformá-lo em um número real e uma casa decimal para a saída, além da possibilidade de ajuste por *offset*.

Com todas as lógicas individuais criadas, são então criadas as funções para unir as lógicas e criar o *loop* de execução das mesmas. A Figura 30 demonstra a função de simulação.

Figura 30 - Simulação de abertura e fechamento das válvulas.



Fonte: Próprio autor.

Para realizar determinados controles dentro da lógica, são necessários blocos matemáticos. A Figura 31 apresenta o cálculo de relação de abertura das válvulas de gás e ar.

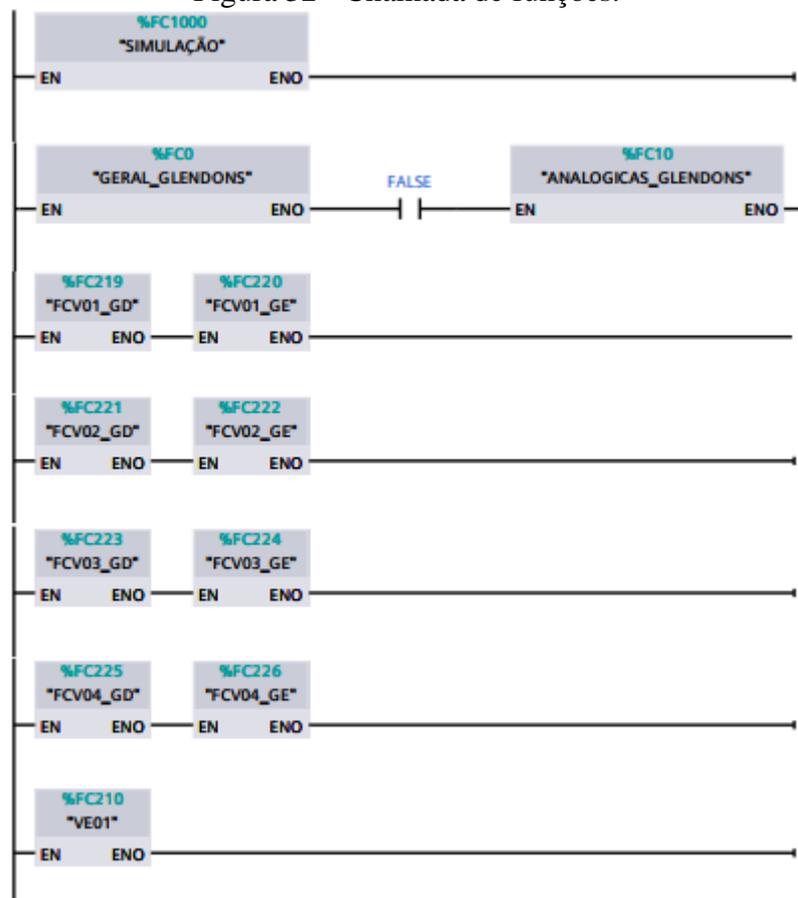
Figura 31 - Cálculo matemático para abertura de válvulas.



Fonte: Próprio autor.

Por fim, para manter toda a lógica operante, foram criadas as funções *Main* e *Cyclic interrupt*, sendo que, na primeira, são chamadas as funções de simulação, gerais, válvulas de gás dos Glendons 1, 2, 3 e 4, e ventilador, de acordo com a Figura 32.

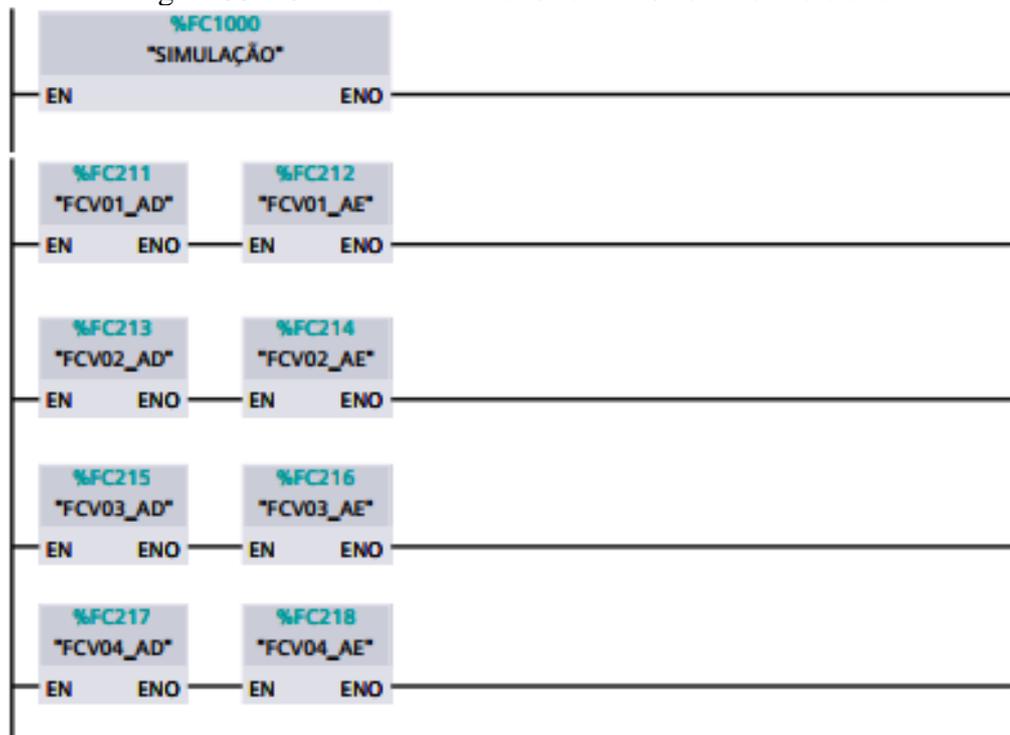
Figura 32 - Chamada de funções.



Fonte: Próprio autor.

Já a segunda função, *Cyclic interrupt*, realiza a chamada das funções simulação e as válvulas de ar com o controle PID, disposta na Figura 33.

Figura 33 - Chamada cíclica das válvulas com controle PID.



Fonte: Próprio autor.

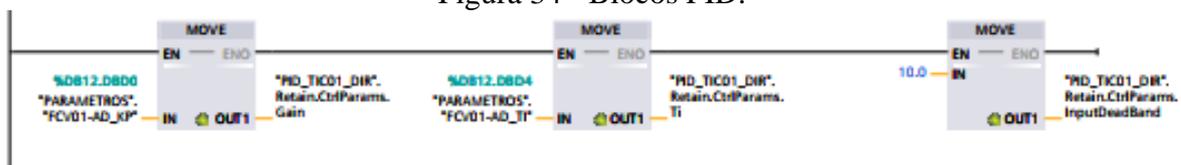
4.3 Controle PID e Funcionamento Geral

Ao desenvolver toda a lógica geral do processo, a lógica individual de cada equipamento, para o ajuste fino do controle automático, foi utilizado o controle PID nas válvulas de Glendon.

O controle PID para o processo industrial em questão consiste no controle de abertura e fechamento das válvulas de gás e ar, a partir do controle de temperatura das câmaras dos Glendons. Dessa forma, a partir da temperatura medida no processo, o ajuste do controle PID é realizado nas válvulas de Ar e através dos blocos de cálculos matemáticos da relação de abertura das válvulas, a válvula de Gás realiza um controle automático.

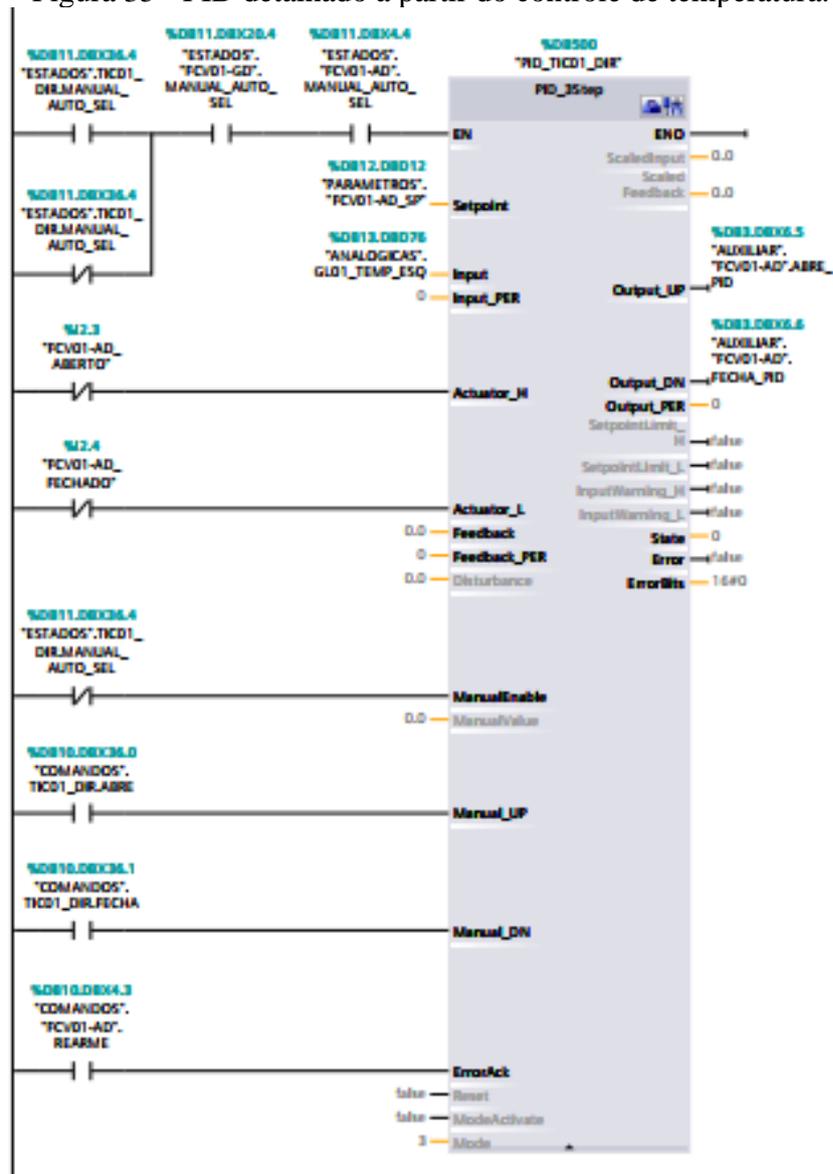
As Figuras 34 e 35 apresentam o controle PID programado para as válvulas de ar.

Figura 34 - Blocos PID.



Fonte: Próprio autor.

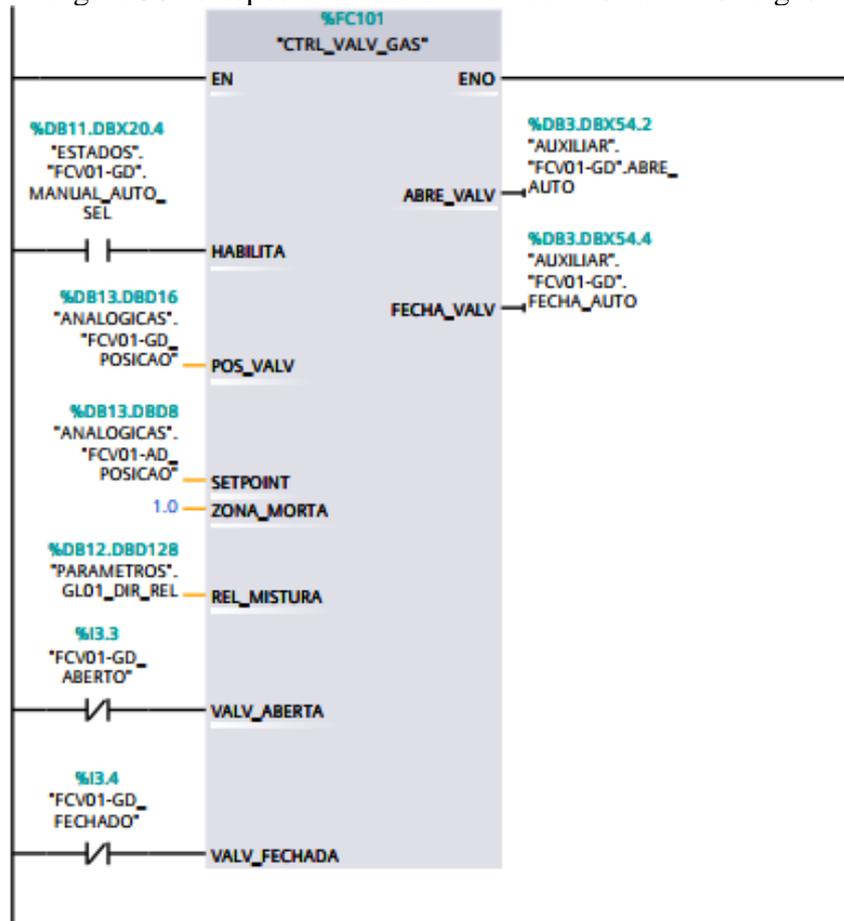
Figura 35 - PID detalhado a partir do controle de temperatura.



Fonte: Próprio autor.

Com o controle PID aplicado, a Figura 36 exemplifica o controle automático da válvula de gás a partir da sua posição de abertura e da relação de abertura entre a válvula de gás e de ar.

Figura 36 - Resposta automática ao PID nas válvulas de gás.



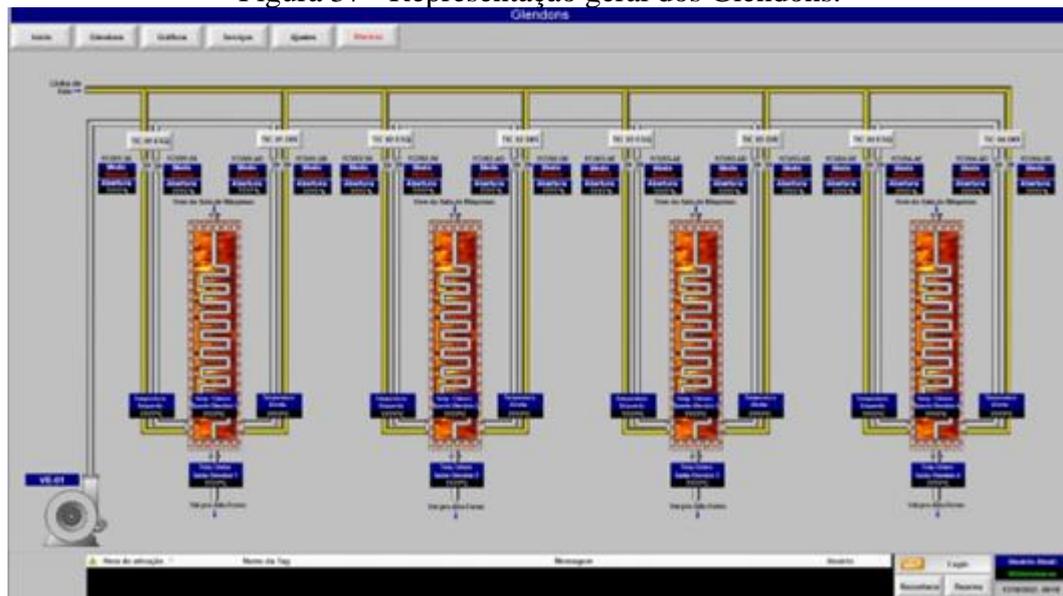
Fonte: Próprio autor.

4.4 Telas de Supervisório

Seguindo a ordem de execução do desenvolvimento do projeto, após o projeto elétrico e as lógicas de automação concluídos, a automação passou para a etapa de desenvolvimento das telas de supervisório, onde todas as informações de histórico de alarmes, monitoramento, gráficos, comandos ficam de forma clara para os operadores.

Conforme a Figura 37, o desenvolvimento partiu da tela geral dos Glendons.

Figura 37 - Representação geral dos Glendons.



Fonte: Próprio autor.

Na tela de representação geral dos Glendons, demonstrada na Figura 37, é ilustrado todo o processo dos Glendons, desde a geração de ar de combustão do ventilador, a linha de gás de Alto Forno, a entrada de ar proveniente da sala de máquinas que circula dentro das garrafas e a saída de ar quente para o Alto Forno. Além do processo, é possível visualizar indicadores de porcentagem de abertura de cada válvula, seu estado de aberto ou fechado e as temperaturas de lado direito, lado esquerdo e saída dos Glendons.

A partir da tela geral, são desenvolvidos os boxes de comando. A Figura 38 representa o box de comando do ventilador de ar de combustão.

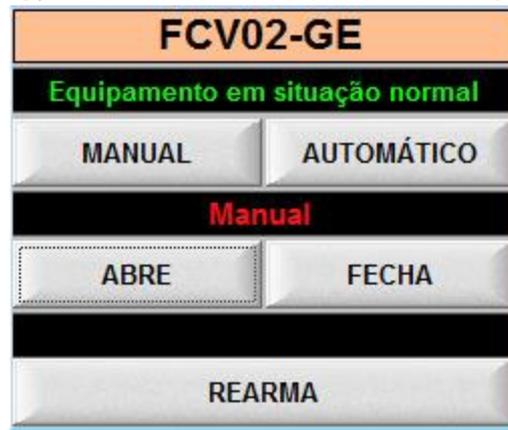
Figura 38 - Box de comando do soprador.



Fonte: Próprio autor.

Para o ventilador, tem-se os comandos de liga, desliga e rearme de equipamento. Para as válvulas de gás e ar, a Figura 39 apresenta seu box de comando.

Figura 39 - Box de comando da válvula de Glendon.



Fonte: Próprio autor.

Para realizar o controle das válvulas, existem duas condições, manual ou automático. Quando o equipamento é operado a partir do modo manual, o box de comando permite abrir e fechar as válvulas; quando sua operação é controlada através do modo automático, o box permite somente o comando de rearmar a válvula, realizando seu controle de abertura e fechamento a partir da lógica PID.

Para a operação em modo automático, é necessário o desenvolvimento de um box de comando para cada controle PID, conforme a Figura 40.

Figura 40 - Box de controle PID.

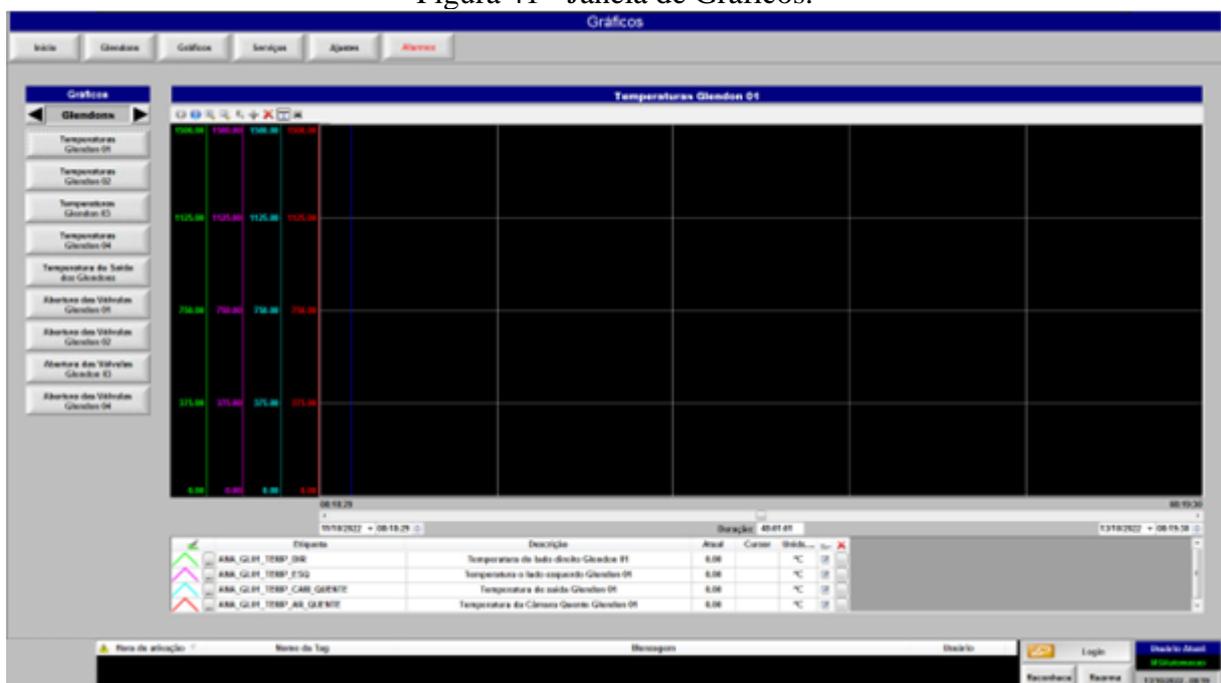


Fonte: Próprio autor.

Para o controle PID, existe a possibilidade de operação em modo manual ou em modo automático. Em modo automático, o processo permite um *setpoint* de saída de temperatura onde através do ganho proporcional e do tempo integral de resposta, a variável de saída é controlada. Dessa maneira, o controle PID atua sobre as válvulas de gás e ar de combustão para realizar o controle.

Para estudos e acompanhamentos, foi desenvolvida a janela de gráficos, possibilitando monitorar os sinais das entradas analógicas armazenados em memória, conforme Figura 41.

Figura 41 - Janela de Gráficos.



Fonte: Próprio autor.

Na janela de gráficos são visualizadas as temperaturas de cada Glendon, assim como as temperaturas gerais de saída. A partir dos gráficos de temperatura é possível acompanhar o desgaste dos refratários, assim como a identificação de um possível equipamento danificado. Com os gráficos de abertura das válvulas, é possível monitorar e acompanhar possíveis “Agarramentos” das válvulas, entender uma repetibilidade de processos e eficiência de queima do gás do Alto Forno.

Uma pequena janela de serviços foi desenvolvida para interação com o usuário, conforme observado na Figura 42.

Figura 42 - Janela de serviços e aplicativos.



Fonte: Próprio autor.

A janela de serviços e aplicativos possibilita ajustes de data e hora, gerenciar algumas tarefas, configurar e fechar aplicação e uma calculadora interativa.

Posteriormente, desenvolveu-se a janela de ajustes conforme a Figura 43. Na aba “Ajustes”, são controlados os valores desejados de proporção de abertura das válvulas de gás e ar, recebendo o retorno de porcentagem real, assim como o ajuste de temperatura máxima de cada Glendon.

Figura 43 - Janela de ajustes de valores.

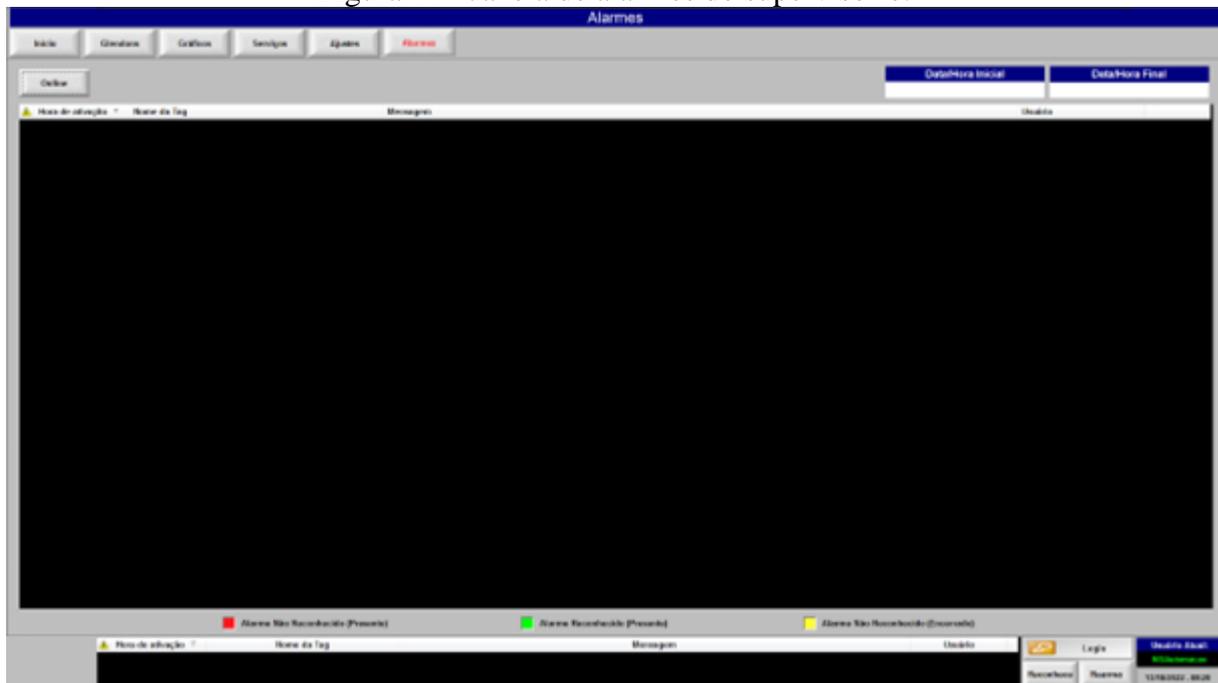
Área	Aplicação	Descrição	Valor Atual
Glendons	Queimador Esquerdo Glendon 01	Proporção de Abertura entre as Válvulas de Ar e Gás	?????
Glendons	Queimador Direito Glendon 01	Proporção de Abertura entre as Válvulas de Ar e Gás	?????
Glendons	Queimador Esquerdo Glendon 02	Proporção de Abertura entre as Válvulas de Ar e Gás	?????
Glendons	Queimador Direito Glendon 02	Proporção de Abertura entre as Válvulas de Ar e Gás	?????
Glendons	Queimador Esquerdo Glendon 03	Proporção de Abertura entre as Válvulas de Ar e Gás	?????
Glendons	Queimador Direito Glendon 03	Proporção de Abertura entre as Válvulas de Ar e Gás	?????
Glendons	Queimador Esquerdo Glendon 04	Proporção de Abertura entre as Válvulas de Ar e Gás	?????
Glendons	Queimador Direito Glendon 04	Proporção de Abertura entre as Válvulas de Ar e Gás	?????
Glendons	Câmara de Combustão Glendon 01	Limite Máximo de Temperatura	?????? [°C]
Glendons	Câmara de Combustão Glendon 02	Limite Máximo de Temperatura	?????? [°C]
Glendons	Câmara de Combustão Glendon 03	Limite Máximo de Temperatura	?????? [°C]
Glendons	Câmara de Combustão Glendon 04	Limite Máximo de Temperatura	?????? [°C]
Glendons	Válvulas de Ar/Gás Direitas Glendon 01	Diferença Máxima de Abertura	???? [°]
Glendons	Válvulas de Ar/Gás Esquerdas Glendon 01	Diferença Máxima de Abertura	???? [°]
Glendons	Válvulas de Ar/Gás Direitas Glendon 02	Diferença Máxima de Abertura	???? [°]
Glendons	Válvulas de Ar/Gás Esquerdas Glendon 02	Diferença Máxima de Abertura	???? [°]
Glendons	Válvulas de Ar/Gás Direitas Glendon 03	Diferença Máxima de Abertura	???? [°]
Glendons	Válvulas de Ar/Gás Esquerdas Glendon 03	Diferença Máxima de Abertura	???? [°]
Glendons	Válvulas de Ar/Gás Direitas Glendon 04	Diferença Máxima de Abertura	???? [°]
Glendons	Válvulas de Ar/Gás Esquerdas Glendon 04	Diferença Máxima de Abertura	???? [°]

Fonte: Próprio autor.

Por fim, tem-se a janela de Alarmes. Nessa janela, tem-se o controle e monitoramento dos alarmes acusados na planta. São possíveis duas visualizações: a visualização online, que acompanha os alarmes em tempo real; e a visualização em histórico, que possibilita acompanhar o histórico dos alarmes durante determinado tempo, podendo assim identificar repetibilidade

de alarmes e a identificação de falhas repetitivas e falhas pontuais. A figura 44 apresenta a tela de alarmes do supervisório desenvolvido.

Figura 44 - Janela de alarmes do supervisório.



Fonte: Próprio autor.

Ao realizar a construção da janela de alarmes, a automação dos sistemas supervisórios é concluída. Dessa forma, tem-se todo o projeto elétrico e de instrumentação, o layout dos painéis, a lógica de CLP e o sistema supervisório concluídos, sendo possível realizar a finalização do projeto e a análise de viabilidade de implementação do mesmo.

4.5 Análise de viabilidade

De forma resumida e organizada, as entregas do estudo são:

- Instrumentação dos Glendons:
 - Projeto elétrico contendo o acionamento de potência do ventilador de ar de combustão, 8 válvulas de ar e 8 válvulas de gás;
 - Layout de painel CCM;
 - Projeto elétrico de CLP contemplando *hardware* e todas as IO's necessárias;
 - Layout do painel CLP.

- Programação de CLP:
 - Toda a lógica de acionamento e controle para automação do processo;
- Controle PID:
 - Controle PID das válvulas de ar;
 - Controle automático das válvulas de gás;
 - Controle através da temperatura do Glendon.
- Telas de supervisão:
 - Desenvolvimento de todo um sistema supervisão para controle de processo;
 - Telas iterativas para o controle do operador;
 - Operação remota.

Analisando todo o ambiente do processo operacional dos Glendons Siderúrgicos, afirma-se ser um ambiente extremamente agressivo. Em operações manuais, onde os Glendons não são automatizados, a movimentação das válvulas borboletas são feitas manualmente pelos operadores de forno, sendo expostos a temperaturas elevadas e a incidência constante de GAF e CO. Além do risco à saúde do colaborador, uma movimentação manual das válvulas não garante porcentagens precisas de abertura, podendo apresentar variações no processo e impactando em saídas indesejadas. A pressão exercida pelo ar dentro dos Glendons é muito elevada, tornando o ambiente propício a explosões, onde uma operação manual errada pode impactar no risco.

Ao considerar a automatização da operação de processo dos Glendons Siderúrgicos, são avaliadas como vantagens:

- Preservação a saúde do colaborador;
- Ajuste fino e preciso da porcentagem de abertura das válvulas;
- Diminuição do risco de explosão;
- Possibilidade de estabelecer *setpoint* de temperatura de saída desejada;
- Resposta rápida e automática de operação;
- Maior controle e confiabilidade de processo;
- Operação contínua em alto padrão;
- Rentabilidade;

- Mais tempo de fábrica operando;
- Lucratividade.

A operação de um Glendon Siderúrgico está diretamente associada à sua eficiência térmica e a sua capacidade energética. Em seu trabalho, (VIEIRA, 2016) afirma que o aumento da eficiência do Glendon, implica na diminuição do consumo de carvão vegetal no Alto Forno, redução do OPEX (*Capital Expenditure*) e aumento do aproveitamento de energia fornecida para queima.

A partir de números, tem-se que a energia de combustão simboliza 89% da entrada de energia do Glendon, significando a importância da queima de GAF no equipamento ser sempre estável. Utilizando cálculos de balanço de massa, é possível obter a relação de ar e GAF nos queimadores dos Glendons, essa, para garantir a queima completa do GAF, é de 0,84 (VIEIRA,2016).

Por fim, tem-se que a eficiência térmica de um Glendon é em média 59,1%. A queima completa e estável do GAF nos queimadores do Glendon é de extrema importância para a eficiência máxima do equipamento (VIEIRA,2016).

Tem-se, em média, que o custo do termopar tipo K para a aplicação nos Glendons é de R\$700,00, o termopar tipo S alcança valores próximos a R\$1400,00. Na aplicação manual em questão, onde o processo apresenta variações indesejadas, em média, os equipamentos de medição de temperatura são trocados a cada 30 dias. Com a automação do processo, estima-se uma redução anual, dentro do custo de OPEX, com a diminuição da troca de equipamentos danificados, um valor de R\$168.000,00, onde o equipamento consegue ser preservado em durações maiores do que 6 meses e os equipamentos que devem ser mantidos como item de estoque também diminuem a rotatividade.

As emissões frequentes de gás CO no processo manual, devido a ineficiência da queima total do GAF, é estimada por esse projeto como duas vezes maior do que em um processo automatizado, diminuindo então a emissão de gases poluentes e consequentemente custos com questões ambientais.

A partir da elaboração dos projetos e estudos da instrumentação e automação de Glendons Siderúrgicos a partir de controle PID para o controle de válvulas de gás e ar, analisando a importância da energia de queima e do controle de relação de ar/GAF para garantir uma boa eficiência térmica, afirma-se que a implantação do projeto será um avanço no sentido de melhor aproveitar o potencial energético do GAF, aumentar a eficiência dos Glendons e

diminuir o consumo de carvão vegetal no Alto Forno, reduzindo custos e obtendo alta produtividade e qualidade de produção.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um estudo de caso para analisar a viabilidade da automação do processo industrial de Glendons Siderúrgicos. O projeto é baseado nos estudos de processo, elaborações de projetos elétricos de CCM (centro de comando de motores) e de CLP (controlador lógico programável), de lógicas de controle e automação e de interfaces gráficas para sistemas supervisórios de operação.

Os resultados são os desenvolvimentos detalhados de projetos de EIA (elétrica, instrumentação e automação) e análises de viabilidade da implementação dos projetos. Uma vez que o processo industrial em questão é crítico para a operação de um Alto Forno de gusa.

A finalidade da realização deste trabalho é a validação de uma possível implementação dos resultados em siderúrgicas que ainda não possuem o processo automatizado. Dessa maneira, realizando uma operação mais segura e assertiva, uma vez que os benefícios levantados também trazem rentabilidade e lucratividade para as siderúrgicas.

5.1. Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros:

- Análise da eficiência térmica dos Glendons Siderúrgicos a partir da utilização de termopares;
- Análise da eficiência da utilização de Gás de Alto Forno para combustão;
- Implementação de termopares para controle de vida útil de refratário em processos industriais;
- Análise da viabilidade da utilização de transmissores de vazão e fluxo nas linhas de ar e gás de combustão de Glendons.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SACOMANO, José B; GONÇALVES, Rodrigo F; SILVA, Márcia T; BONILLA, Silvia H; SÁTYRO, Walter C. **Indústria 4.0 conceitos e fundamentos**. São Paulo: Bucher, 2018.

GARCIA, Claudio. **Controle de processos industriais: estratégias convencionais**. 1. ed. São Paulo: Bucher, 2018.

BEGA, Egídio A. **Instrumentação industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, IBP, 2011.

ANDRADE, Ana P. c2018. **Sistemas supervisórios: saiba tudo sobre o seu funcionamento e os benefícios gerados para indústria**. Disponível em: <<https://www.logiquesistemas.com.br/blog/sistemas-supervisorios/>>. Acesso em: 18 jul. 2021.

SELEME, Robson. **Manutenção industrial: mantendo a fábrica em funcionamento**. 1. ed. Curitiba: Intersaberes, 2016.

AGUIRRE, Luis A. **Fundamentos de instrumentação**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

ALTUS. c2020. **O que é e para o que serve o protocolo HART?** Disponível em: <<https://www.altus.com.br/post/310/o-que-e-e-para-que-serve-o-protocolo-hart>>. Acesso em: 18 jul. 2021.

VALETE. c2006. **Monitoramento de variáveis críticas**. Disponível em: <http://controleinstrumentacao.com.br/arquivo/ed_121/cv1.html>. Acesso em: 18 jul. 2021.

ROURE, Marcel. c2022. **Instrumentação Industrial – Entenda de uma vez por todas**. Disponível em: <https://instrumentacaoecontrole.com.br/instrumentacao-industrial-guia-completo/>. Acesso em: 16 out. 22.

SOUZA, R. L. Sandro. c2016. **A evolução dos sistemas supervisórios no Brasil.** Disponível em: < <https://www.linkedin.com/pulse/evolu%C3%A7%C3%A3o-dos-sistemas-supervis%C3%B3rios-brasil-de-souza-/?origin%20alSubdomain=pt> >. Acesso em: 19 jul. 2021.

MOTT, Anderson. c2021. **O que são Sistemas Supervisórios?** Disponível em: < <https://www.automacaoindustrial.info/o-que-sao-sistemas-supervisorios/> >. Acesso em: 19 jul. 21.

ELIPSE. c2019. **O que são sistemas supervisórios?** Disponível em: < <https://kb.elipse.com.br/o-que-sao-sistemas-supervisorios/> >. Acesso em: 19 jul. 21.

SIGLIERE, Luciano; NISHINARI, Akiyoshi. **Controle automático de processos industriais.** 2. ed. São Paulo: Bucher, 1973.

BRASIL, Instituto Aço. c2022. **Processo Siderúrgico.** Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/processo-siderurgico/>. Acesso em: 13 set. 22.

MINERAL, Conexão. 2018. **Após 34 meses desativado e uma grande reforma, alto-forno da Usiminas é reativado.** Disponível em: <https://www.conexaomineral.com.br/noticia/984/apos-34-meses-desativado-e-uma-grande-reforma-alto-forno-da-usiminas-e-reativado.html>. Acesso em: 14 set. 22.

VIEIRA, Deyve Drengson Carneiro; OLIVEIRA, Tiago Luis. **CÁLCULO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO GLENDON**, p. 137-146. In: 37º Energy Balances / 31º Industrial Gas, Rio de Janeiro, 2016.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Processo de Fabricação de Ferro-Gusa em Alto-Forno.** ABM, São Paulo, 2009.

SIEMBRA. c2022. **CLP - Controlador Lógico Programável. Você sabe o que é?** Disponível em: <https://www.siembra.com.br/noticias/clp-controlador-logico-programavel-voce-sabe-o-que-e/#:~:text=O%20CLP%20surtiu%20no%20in%C3%ADcio,custo%20relacionado%20%C3%A0%20estas%20mudan%C3%A7as>. Acesso em: 03 out. 22.

MARINHO, Gustavo. c2022. **O que é um PLC?** Disponível em: <https://hidraulicaepneumatica.com/o-que-e-um-plc/>. Acesso em: 04 out. 22.

ELLER, Daniel. [s.d.]. **PLCs: O que são e quais as suas vantagens.** Disponível em: <https://velki.com.br/pt/blog/aprenda-com-a-velki/plcs--o-que-sao-e-quais-as-suas-vantagens>. Acesso em: 04 out. 22.

MARTINS, Andressa. 2020. O que é a linguagem Ladder? Disponível em: <https://www.nerd-rosa.com.br/post/o-que-%C3%A9-a-linguagem-ladder>. Acesso em: 04 out. 22.

MARUYAMA, Newton. 2017. **Introdução os sistemas de controle.** Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4183203/mod_resource/content/1/Aula1V2017.pdf. Acesso em: 05 out. 22.

UFEN. 2003. **Sistemas de controle I.** Disponível em: <https://www.dca.ufrn.br/~meneghet/FTP/Controle1/Controle%20I%20-%20Apostila.pdf>. Acesso em: 05 out. 22.