

**TRABALHO FINAL- AUTOMAÇÃO DE UM FORNO DE FUSÃO PARA A
PRODUÇÃO DE VIDRO CRISTAL**

Amanda Caetano Alvarenga, Keslley Brito Ramos, Luiz Felipe Carneiro

Resumo. O trabalho explora a evolução histórica e tecnológica da fabricação de vidro, destacando desde a descoberta ancestral até os modernos processos industriais. Inicialmente, apresenta a relevância histórica dos fenícios e romanos na técnica de produção, enfatizando inovações significativas como o vidro soprado de Murano. Em seguida, o estudo detalha os aspectos teóricos do processo de fusão em fornos, com ênfase no uso do gás natural como fonte de energia sustentável, e na importância do controle preciso da combustão para a qualidade do vidro produzido. São discutidos os componentes fundamentais dos fornos industriais, como cadinhos, queimadores, recuperadores de calor, e sistemas de isolamento, além dos avanços em automação e controle, integrando tecnologias como CLPs, redes Modbus e interfaces HMI. A metodologia é dividida em duas etapas: a criação de uma remota Modbus TCP utilizando um protótipo baseado em ESP32 para simulação das variáveis do processo, e sua integração em uma rede industrial. Os resultados parciais demonstram a validação do sistema, confirmando a eficácia da comunicação e o desempenho dos sensores e atuadores, contribuindo para a modernização e otimização da produção de vidro.

Palavras chaves: *Automação Industrial; Forno de Fusão; Vidro; Modbus TCP; ESP32; Controle de Temperatura; Eficiência Energética; Combustão; Redes Industriais; Processos de Fabricação.*

1 INTRODUÇÃO

A fabricação de vidro é uma das práticas mais antigas da humanidade e a descoberta desse material é datada há mais de 7.000 anos, em que os registros mostram que os fenícios, ao fazerem uma fogueira na praia, produziram vidro, pois combinaram fogo, areia e nitrato de sódio. Contudo, apesar da descoberta ser atribuída ao povo fenício, outras culturas e populações contribuíram para o domínio das competências relacionadas à produção de vidros. Os romanos aperfeiçoaram significativamente as técnicas relacionadas a esse processo de fabricação, sendo

relevantes e conhecidos até nos dias atuais, principalmente pela ilha de Murano, que é localizada próxima à Veneza e é famigerada pela venda de vidro soprado, cristalino e colorido.

O processo de fabricação envolve a combinação de diferentes matérias-primas, que são colocadas em fornos com altas temperaturas, seguida de modelagem, resfriamento e acabamento do produto final. No processo de fusão no forno, a mistura pode ser levada ao forno com funcionamento à gás natural, que é o mais utilizado; funcionamento elétrico, que é predominantemente utilizado para a produção de vidros especiais, dentre outros tipos.

Nesse sentido, o forno de fusão a gás natural é um dos mais sustentáveis para a produção de vidros, já que reduz a emissão de CO₂, em comparação com fornos a carvão, por exemplo. Todavia, faz-se necessário analisar todos os âmbitos da utilização do forno alimentado a gás natural, já que, para otimizar a produção e o funcionamento do processo, é preciso verificar e monitorar diversos parâmetros, como a eficiência térmica do forno.

Dessa maneira, este trabalho visa aplicar os conhecimentos adquiridos na disciplina de Redes Industriais para Controle e Automação II e implementar uma automação de um forno de fusão para a produção de vidro cristal, que constitui uma das etapas de extrema importância para a obtenção do produto do processo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Utilização do Forno de Fusão no Processo de Fabricação de Vidros

A arte da fabricação de vidros foi abordada e definida em 1621, em uma publicação denominada L'Arte Vetraria. Entretanto, para alguns críticos, a obra não passava de uma espécie de “livro de receitas”, que só poderia ser compreendida por completo se houvesse o entendimento prévio de conceitos da química e da física (MAZALL, 2001).

Com o desenvolvimento da química e da física, o acesso às informações dos componentes utilizados na fabricação de vidros e as técnicas utilizadas foram cada vez mais aprimoradas. Atualmente, apesar de serem desenvolvidas novas técnicas de fabricação, as pesquisas são mais voltadas para os vidros à base de óxidos utilizando o processo tradicional de fusão.

Tabela1: Principais estudos e desenvolvimentos dos vidros nos últimos 300 anos.

Data	Estudos e Desenvolvidos
1765	Início da produção do vidro cristal
1787	Utilização de aparelhos de vidro para o estudo das propriedades físicas dos gases: Lei de Boyle e Charles
1800	Revolução industrial abre nova era na fabricação de vidros. Matérias-primas sintéticas são usadas pela primeira vez. Vidros com propriedades controladas são disponíveis
1840	Siemens desenvolve o forno do tipo tanque, para a produção de vidro em grande escala; produção de recipientes e vidro plano
1863	Processo "Solvay" reduz dramaticamente o preço da principal matéria-prima para fabricação de vidros: óxido de sódio
1875	Vidros especiais são desenvolvidos na Alemanha por Abbe, Schott e Carl Zeiss. A Universidade de Jena, na Alemanha, torna-se o maior centro de ciência e engenharia do vidro. A química do vidro está em sua infância
1876	Bauch & Lomb Optical Company é fundada em Rochester, Nova York. Tem início a fabricação de lentes e outros componentes ópticos
1881	Primeiros estudos sobre propriedade-composição de vidros para a construção de instrumentos ópticos, tais como o microscópio
1886	Desenvolvida por Ashley a primeira máquina para soprar vidro
1915	A Universidade de Sheffield, na Inglaterra, funda o Departamento de Tecnologia do Vidro, hoje chamado Centro para a Pesquisa do Vidro
1920	Griffith propõe a teoria que permite compreender a resistência dos bulbos de vidro, o que levou ao entendimento e aperfeiçoamento da resistência dos vidros
1926	Wood e Gray desenvolveram uma máquina que permitiu a fabricação de bulbos e invólucros de vidro em grande escala (1000 peças/minuto)
1932	Zachariasen publica seu famoso trabalho sobre a hipótese da rede aleatória e as regras para a formação de vidros no <i>Journal of American Chemical Society</i>
1950-1960	A companhia americana Ford Motor Co. funda o principal centro de pesquisa em vidro. A Ciência do Vidro torna-se sua maior área de pesquisa
1960	Turnbull e Cohen propõem modelo para a formação de vidros, baseado no controle da cristalização através da taxa de resfriamento
1970	A Corning Glass americana produz a primeira fibra óptica de sílica, usando técnicas de deposição de vapor químico para reduzir a atenuação e aumentar o sinal da transmissão
1984	Marcel e Michel Poulain e Jacques Lucas descobrem os primeiros vidros fluoretos em Rennes, na França

Fonte: MAZZALL, 2001.

Durante o avanço dos estudos dos vidros, foram surgindo várias vertentes sobre o que caracteriza um vidro, bem como quais materiais seriam considerados aceitáveis para a produção desse material.

Tabela 2: Espécies químicas formadoras de vidro pelo processo de fusão-resfriamento.

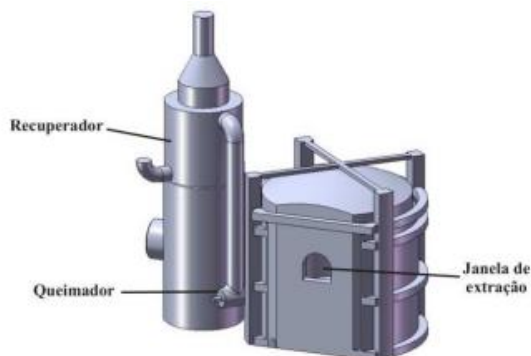
Elementos	S, Se, P, Te (?)
Óxidos	B ₂ O ₃ , SiO ₂ , GeO ₂ , P ₂ O ₅ , As ₂ O ₃ , Sb ₂ O ₃ , In ₂ O ₃ , Ti ₂ O ₃ , SnO ₂ , PbO ₂ , SeO ₂
Sulfetos	As ₂ S ₃ , Sb ₂ S ₃ , CS ₂
Selenetos	Vários compostos de Tl, Sn, Pb, As, Sb, Bi, Si, P
Teluretos	Vários compostos de Tl, Sn, Pb, As, Sb, Bi, Ge
Haletos	Vidros cloretos multicomponentes baseados em ZnCl ₂ , CdCl ₂ , BiCl ₃ , ThCl ₄ Vidros fluoretos à base de BeF ₂ , AlF ₃ , ZrF ₄ , HfF ₄
Nitratos	KNO ₃ -Ca(NO ₃) ₂ e muitas outras misturas binárias contendo nitratos alcalinos e alcalino-terrosos
Sulfatos	KHSO ₄ e outras misturas binárias e ternárias
Carbonatos	K ₂ CO ₃ - MgCO ₃
Acetatos	Na(CH ₃ COO), Li(CH ₃ COO)
Compostos orgânicos simples	o-terfenil, tolueno, 3-metil-hexano, 2,3-dimetil cetona, etilenoglicol, álcool metílico, álcool etílico, glicerol, éter etílico, glicose
Compostos orgânicos poliméricos	Poliestireno (-CH ₂ -) _n
Ligas metálicas	Au ₄ Si, Pd ₄ Si

Fonte: MAZZALL, 2001.

A produção de vidro em fornos industriais depende fortemente de um processo de combustão bem controlado, que garanta a transferência eficiente de energia térmica para a fusão dos materiais. Esse processo envolve a queima de gás natural, cujo desempenho está intrinsecamente ligado à correta proporção entre o combustível e o ar, além de aspectos construtivos que asseguram a eficiência energética e a durabilidade do equipamento.

Após a junção dos componentes selecionados para a fabricação do vidro, a mistura é inserida em um forno de fusão, o qual possui uma cavidade de extração, um recuperador e um queimador. O recuperador consiste em um trocador de calor, formado por tubos concêntricos, com os gases de combustão escoando na parte interna e o ar a ser aquecido na parte anular. Já o queimador, tem a injeção de gás natural feita de forma axial, na parte traseira, enquanto o ar de combustão pré-aquecido é injetado radialmente (NUNES, 2013).

Figura 1: Exemplo de forno de fusão.



A queima é feita com controles de vazão de gás natural e de ar, sendo que o operador ajusta o valor da temperatura em um controlador, que regula a vazão de combustível injetada no forno. Além disso, um termopar, localizado na lateral do equipamento, retorna o valor da temperatura para o controlador, constituindo, assim, o controle da temperatura do forno de fusão (NUNES, 2013).

A temperatura que o operador ou controlador irá inserir no controlador depende de algumas características, como o tipo de vidro, a matéria-prima utilizada e se foi utilizado aditivos na mistura para redução da temperatura de fusão. Alguns componentes que atuam como aditivos são o carbonato de sódio, óxido de boro e fluoreto de lítio.

Contudo, quando não é adicionado nenhum aditivo, a temperatura utilizada nos fornos para a fusão do vidro varia entre 1.400°C a 1.600°C, já que é nessa faixa que a mistura de matérias-primas derrete (HANN, 2013). A temperatura do forno de fusão tem um impacto significativo na qualidade do vidro produzido, uma vez que ela afeta a homogeneidade da mistura e a eficiência da dissolução das matérias-primas. Temperaturas mais altas promovem uma fusão mais completa dos componentes, reduzindo a presença de bolhas e impurezas, e resultando em um vidro mais transparente e com melhor resistência mecânica. No entanto, temperaturas excessivamente altas podem provocar a degradação de alguns materiais, levando a uma alteração nas propriedades ópticas e mecânicas do vidro. Portanto, o controle preciso da temperatura no forno é crucial para garantir a consistência e a qualidade do produto final (NORTON, 2004).

2.2 Eficiência Energética e Proporção Gás Natural-Ar

A eficiência energética em um forno de fusão de vidro é determinada pela capacidade de converter a energia química do gás natural em energia térmica útil, minimizando perdas por radiação, condução e convecção. O ponto de equilíbrio da combustão depende da mistura ideal entre gás natural e ar, onde a relação estequiométrica deve ser cuidadosamente ajustada. Em geral, utiliza-se uma mistura próxima da razão teórica para maximizar o rendimento, mas frequentemente é necessário introduzir um pequeno excesso de ar para garantir a completa queima do combustível e reduzir as emissões de poluentes, como monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x). (Yusupbekov, N.R. et al., 2023)

A modelagem matemática de fornalhas, conforme demonstrado em estudos recentes, permite a identificação dos parâmetros críticos para essa combustão. Técnicas baseadas em princípios de primeira ordem têm sido utilizadas para derivar modelos de estado que relacionam as variáveis de processo (como temperatura dos gases e do vidro) com a taxa de alimentação do combustível. Esses modelos fornecem subsídios para o ajuste fino da relação gás natural-ar, otimizando o desempenho térmico e a eficiência energética do forno. (Costa Junior, A.G.C. et al., 2024)

2.3 Aspectos Construtivos de um Forno Industrial de Vidro

Os fornos industriais para a produção de vidro são sistemas complexos, cujos componentes devem ser projetados para suportar condições extremas de temperatura e ambiente corrosivo. Dentre os elementos constituintes, destacam-se:

- **Cadinho ou Tanque de Fusão:** É a câmara onde ocorre a fusão dos materiais. Sua construção utiliza refratários de alta performance, capazes de resistir a temperaturas superiores a 1500 °C, garantindo a integridade do vidro durante o processo de fusão. (Holladay, A. R., 2023)
- **Queimador:** Responsável pela queima do gás natural, o queimador deve operar de maneira controlada, promovendo uma mistura homogênea do combustível com o ar. A configuração do queimador influencia diretamente a temperatura da chama e, consequentemente, a eficiência da transferência de calor. Sistemas modernos empregam tecnologias de ignição e modulação que permitem ajustes dinâmicos da taxa de fluxo de gás e ar. (Yusupbekov, N.R. et al., 2023)

- **Recuperador de Calor (ou Regenerador):** Este componente captura o calor residual dos gases de exaustão e o reutiliza para pré-aquecer o ar de combustão ou os materiais de alimentação. O uso de recuperadores de calor aumenta significativamente a eficiência energética do sistema, reduzindo a demanda de energia e as emissões associadas à combustão. (Yusupbekov, N.R. et al., 2023)
- **Isolamento Refratário:** As paredes internas do forno são revestidas por materiais refratários que não só protegem a estrutura metálica do equipamento, mas também minimizam as perdas de calor para o ambiente externo. Esses materiais são selecionados com base em suas propriedades térmicas, como condutividade e capacidade de armazenamento de calor, contribuindo para a manutenção de um perfil térmico uniforme dentro do forno.
- **Sistema de Automação e Controle:** A integração de controladores lógicos programáveis (CLPs) e sistemas SCADA possibilita o monitoramento em tempo real das variáveis críticas (temperatura, fluxo de ar, pressão) e o ajuste automático dos parâmetros de combustão. Esses sistemas empregam protocolos industriais, como Modbus RTU ou TCP, que asseguram uma comunicação robusta entre os dispositivos distribuídos, facilitando a operação e a manutenção do forno. (Yusupbekov, N.R. et al., 2023) (Holladay, A. R., 2023)

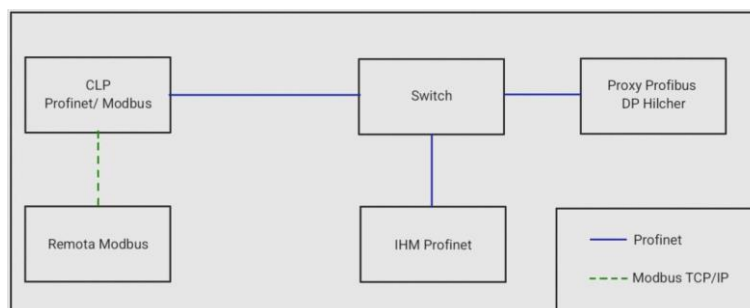
A otimização do processo de combustão em fornos industriais para produção de vidro depende, portanto, de uma correta proporção entre gás natural e ar e do uso de componentes construtivos adequados que garantam uma eficiente transferência de calor. A modelagem matemática baseada em princípios de primeira ordem, associada a sistemas avançados de automação, permite não só a melhoria da eficiência energética, mas também a redução das emissões e dos custos operacionais. Tais avanços são essenciais para a modernização do setor e para a competitividade das empresas no cenário atual de crescente preocupação ambiental.

3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

Este capítulo descreve a metodologia aplicada no desenvolvimento do projeto de automação de um forno de fusão para produção de vidro cristal. O processo foi dividido em duas partes principais.

A primeira etapa consiste na criação de um escravo Modbus, representando um protótipo do forno de fusão, com o objetivo de simular as variáveis e os comportamentos do processo a ser controlado. A segunda etapa aborda a integração dessa maquete a uma rede industrial, que inclui um CLP, uma IHM e um Proxy Profibus DP Hilcher, com o auxílio de um switch. O modelo proposto está ilustrado na figura 7.

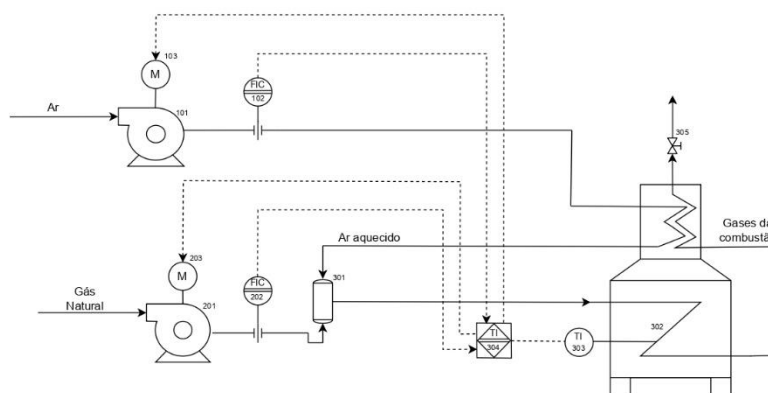
Figura 2: Diagrama de comunicação do processo de fusão.



Fonte: Autores.

Para esta parte da remota Modbus, foi abordado as principais variáveis relacionadas ao forno representado pelo diagrama abaixo, seguindo a norma ISA 5.1.

Figura 3: Diagrama P&ID



Fonte: Autores.

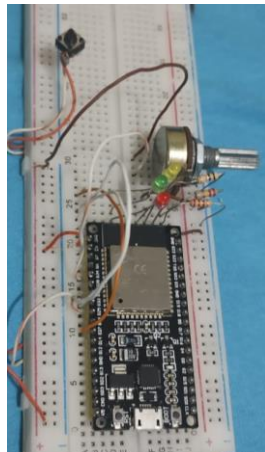
3.1 Etapa 1

Conforme mostrado na Figura 3, o forno de fusão é composto por diversos componentes essenciais para o controle preciso do processo. O aquecimento é realizado pela combustão do gás, que é controlado por uma válvula de vazão, juntamente com a injeção de oxigênio que também é regulada por válvula de controle. O sistema conta também com um termopar para monitoramento contínuo da temperatura interna. Uma vez configurada a remota Modbus TCP, basta energizá-la (ou reset) para iniciar a operação do sistema e verificar (via serial arduino) qual o ip da remota. No entanto, para habilitar os atuadores do sistema é necessário "ligar" a remota através da IHM com o comando on/off, e o status on/off da remota pode ser observado pela IHM e pelo led vermelho na remota. Complementando o sistema, um botão para alarme foi inserido para que seja possível emitir um alerta em possíveis falhas no forno.

Com o intuito de validar o comportamento do sistema e sua integração na rede industrial proposta, foi desenvolvida uma maquete utilizando um ESP32-Wroom DevKit (Figura 4), projetada para simular as principais funcionalidades do forno real. Essa maquete representa cada componente essencial do sistema por meio de elementos eletrônicos que replicam o comportamento dos sensores e atuadores originais:

- **Sensor de temperatura (AI):** Simulado por potenciômetro, que permitem ajustar manualmente as leituras como se fosse a variável real de temperatura.
- **Válvula de oxigênio (AO):** Representada por um LED verde com um PWM para indicar a abertura da válvula e o controle do fluxo de oxigênio no sistema.
- **Válvula de Gás (AO):** Representada por um LED amarelo com um PWM para indicar a abertura da válvula e o controle do fluxo de gás no sistema.
- **Indicador de status do sistema (DO):** Representado por um LED vermelho que indica se a remota está habilitada ou não, sendo este comando on/off feito via IHM.
- **Botão Alarme (DI):** Push botton que representa um alarme na remota.

Figura 4: Remota Modbus – Forno de fusão



Fonte: Autores

A Tabela 1 apresenta a correspondência entre os componentes físicos da maquete e seus equivalentes no sistema real, detalhando seus respectivos endereços no protocolo Modbus, assegurando uma clara integração entre os elementos simulados e o sistema industrial.

Tabela 3: Processo de fusão

Componentes	Sistema Real	Descrição	Tipo	Pino ESP32	Addr Modbus
Led Vermelho	Status ON/OFF do Forno	Informa que as válvulas do forno estão habilitadas	DO	33	40001
Led Verde	Válvula de Oxigênio	Atuação da válvula de controle	AO	32	40002
Led Amarelo	Válvula de Gás	Atuação da válvula de controle	AO	27	40003
Botão	Botão Alarme	Botão que aciona um alarme da remota	DI	25	40004
Potenciômetro 1K	Termopar	Leitura de temperatura do forno	AI	34	40005

Fonte: Autores

O firmware embarcado foi desenvolvido com o auxílio da biblioteca ModbusIP_ESP8266.h, cujo link foi disponibilizado nas referências.

Por fim, para validar o funcionamento do circuito e da comunicação Modbus, utilizou-se o software Modscan como é mostrado na seção resultados. O objetivo deste teste foi garantir a correta leitura das entradas digitais ao manipular os botões, bem como validar as leituras das variáveis analógicas ao ajustar os potenciômetros. Além disso, buscou-se testar a escrita das saídas digitais e analógicas, verificando o comportamento dos LEDs que representam os estados dos componentes da planta.

3.2 Etapa 2- Configuração dos dispositivos

Primeiramente, reproduziu-se a estrutura da rede no TIA Portal, recriando a arquitetura ilustrada na Figura 2 e configurou-se os parâmetros de cada dispositivo, conforme especificado na Tabela 4.

Tabela 4: Listagem dos devices e seus respectivos IPs.

Dispositivo	Categoria (Rede Profinet/Rede Modbus TCP)	IP
CLP S7-1200	Controller/Client Modbus	192.168.0.130
ESP32-Wroom DevKit	Server Modbus	192.168.0.104
IO Profinet Hilcher NL51	Proxy Profibus DP	192.168.0.140
IHM Profinet	Supevisor	192.168.0.13

Fonte: Autores

Em seguida, iniciou-se o desenvolvimento da lógica CLP, que será abordado posteriormente na sessão 4.2, com o intuito de variar as saídas analógicas através de um PID e um controle razão levando em conta: a leitura de temperatura da remota; o setpoint definido pelas resistências conectadas no Proxy Profibus DP Hilcher; e a proporção ideal entre as válvulas para garantir a eficiência da combustão.

3.3 Etapa 3- Desenvolvimento da interface homem-máquina

Por fim, iniciou-se o desenvolvimento da Interface Homem-Máquina do sistema. A interface foi estruturada em 7 telas principais - Menu Principal, Menu de Inicialização, Tela de verificação da abertura das válvulas (gráfico de barras), Tela de verificação da abertura das válvulas (gráfico de linhas), Tela de verificação da temperatura do sensor, Tela com gráfico de linhas para verificação da temperatura do sensor e Tela de alarmes do sistema, proporcionando ao operador o controle completo do sistema.

- **Menu Principal-** A tela inicial fornece as informações básicas sobre o sistema, nome e representação visual do sistema a ser controlado.

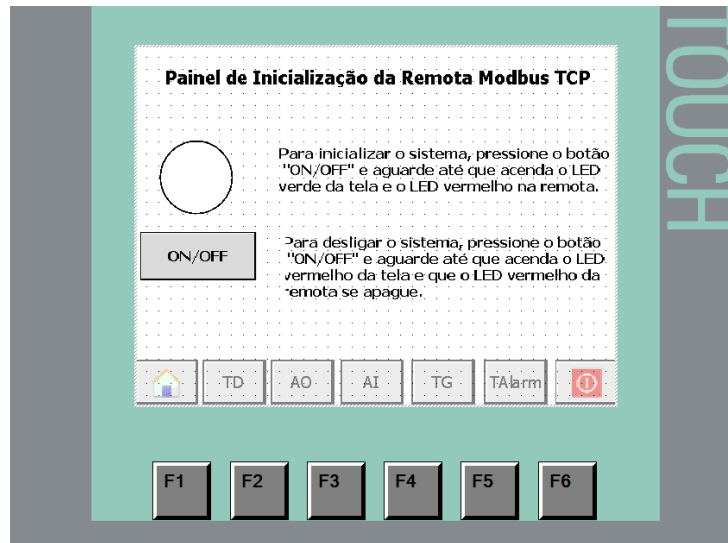
Figura 5: IHM - Home.



Fonte: Autores.

- **Menu de Inicialização-** A tela fornece as informações sobre como ligar e desligar o sistema, além de verificar se o sistema está ligado ou não, tanto na própria tela da IHM, quanto na remota.

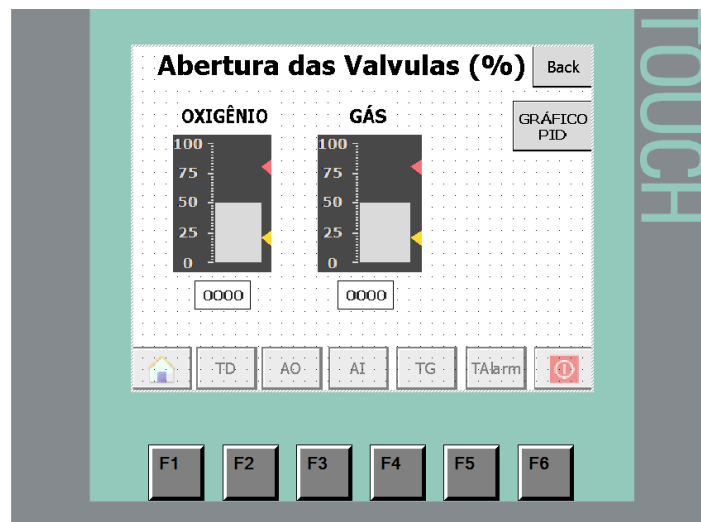
Figura 6: IHM - Menu de inicialização.



Fonte: Autores.

- **Tela de verificação da abertura das válvulas (gráfico de barras)** - A tela fornece as informações sobre a porcentagem de abertura das válvulas de oxigênio e de gás natural, por meio de gráficos de barra, que é definida pelo PID, além de uma lógica proporção entre elas.

Figura 7: IHM - Tela de verificação da abertura das válvulas.

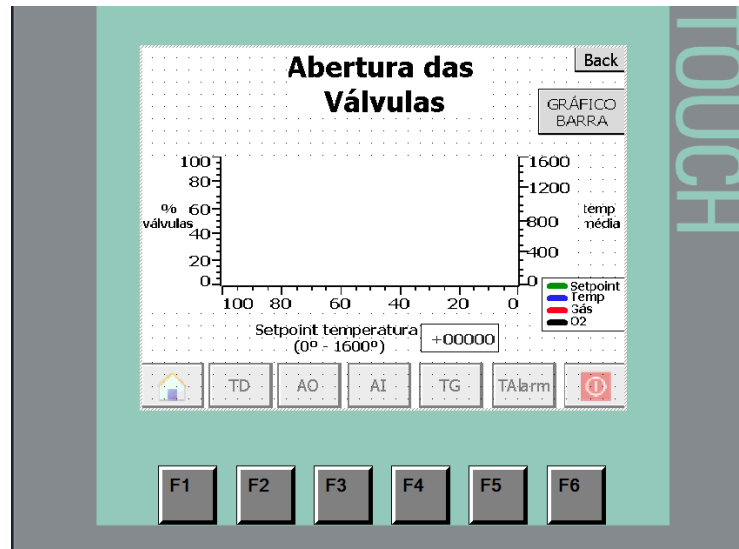


Fonte: Autores

- **Tela de verificação da abertura das válvulas (gráfico de linhas)** - A tela fornece todas as informações importantes sobre o PID razão utilizado para o controle das válvulas de oxigênio e de gás natural. Nela possui um gráfico

de linhas apresentando quatro variáveis, contemplando a PV (sensor Temp), MV (válvulas), e SP (setpoint Temp).

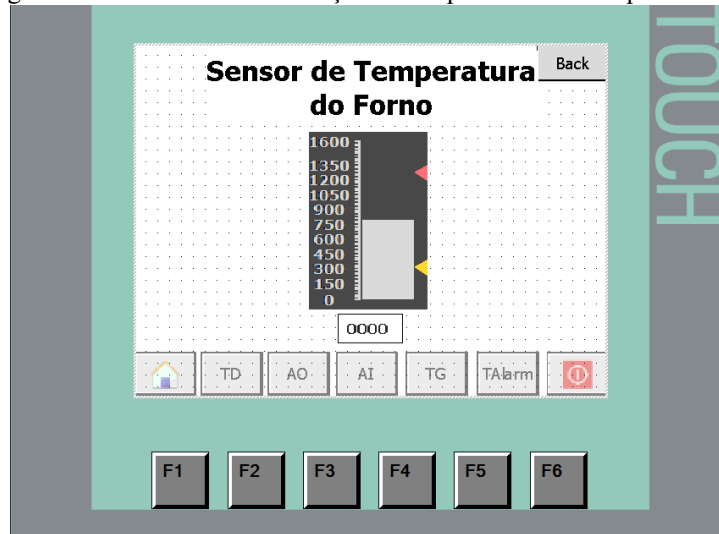
Figura 8: IHM - Tela de verificação da abertura das válvulas.



Fonte: Autores.

- **Tela de verificação da temperatura do sensor-** A tela fornece as informações sobre a temperatura medida pelo sensor, que recebe a informação do potenciômetro.

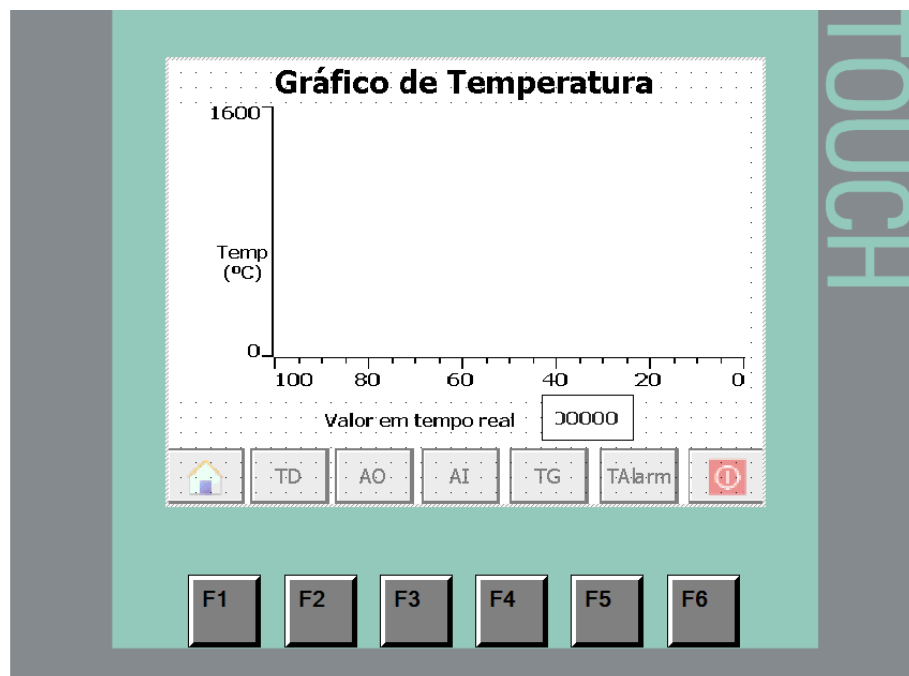
Figura 9: IHM - Tela de verificação da temperatura medida pelo sensor.



Fonte: Autores.

- **Tela com gráfico de linhas para verificação da temperatura do sensor-** A tela fornece as informações sobre a temperatura medida pelo sensor, que recebe a informação do potenciômetro, em formato de gráfico de linhas.

Figura 10: IHM - Tela com gráfico para verificação das temperaturas medidas pelos sensores.



Fonte: Autores.

- **Tela de alarmes do sistema-** A tela apresenta os alarmes detectados pelo sistema que foram mapeados para a IHM, que são: problemas na

comunicação entre os dispositivos, valores HIGH/LOW do sensor, remota desligada e o botão _alarme da remota.

Figura 11: IHM - Tela com gráfico para verificação das temperaturas medidas pelos sensores.



Fonte: Autores.

Figura 12: Alarmes digitais mapeados para a IHM.

<div>Discrete alarms</div> <div>Analog alarms</div> <div>System events</div> <div>Alarm classes</div> <div>Alarm groups</div>									
Discrete alarms									
ID	Name	Alarm text	Alarm class	Trigger tag	Trigge..	Trigger address	HMI acknowl...	HMI a...	...
1	botao_pressionado	Botão de Alarme pressionado!	Warnings	IHM_ALM	0	%M9.0	<No tag>	0	
2	Erro Canal NL51	Erro em um canal do Slave NL51	Errors	IHM_ALM	1	%M9.1	<No tag>	0	
5	Remota Desligada	Remota modbusTCP está desligada.	Warnings	IHM_ALM	2	%M9.2	<No tag>	0	
3	Erro NL51_1	O Slave NL51 (setpoint) não está	Errors	IHM_ALM	3	%M9.3	<No tag>	0	
6	Erro Remota	Erro na Remota modbusTCP.	Errors	IHM_ALM	4	%M9.4	<No tag>	0	
4	NL51 Desconectada	O Slave NL51 (setpoint) foi	Errors	IHM_ALM	5	%M9.5	<No tag>	0	
<Add new>									

Fonte: Autores.

Figura 13: Alarmes Analógicos mapeados para a IHM.

Discrete alarms Analog alarms System events Alarm classes Alarm groups							
Analog alarms							
ID	Name	Alarm text	Alarm class	Trigger tag	Limit	Limit mode	
10	Temp. Alta	Temperatura acima de 1400°C	Errors	HMI_AI1_...	1400	Higher	
11	Temp. Baixa	Temperatura abaixo de 200°C	Errors	HMI_AI1_TEMP	200	Lower	
<Add new>							

Fonte: Autores.

4 RESULTADOS

Nesta sessão, serão discutidos os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do projeto. Os resultados estão organizados em duas partes: a primeira trata da validação do plano de testes da remota Modbus, conforme detalhado na sessão 4.1 e a segunda aborda o desenvolvimento da lógica do CLP, que será abordado na sessão 4.2.

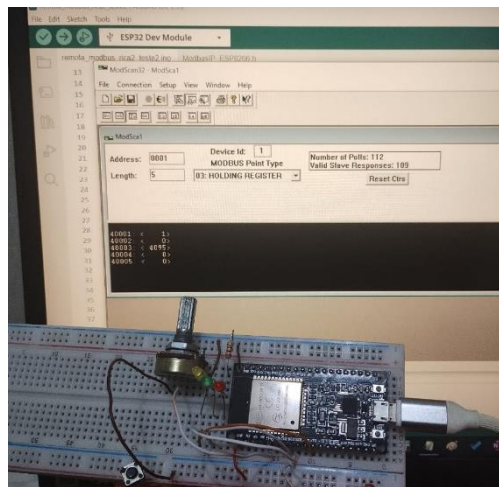
4.1 Etapa 1 - VALIDAÇÃO DA REMOTA MODBUS

O plano de validação foi dividido em quatro partes, cada uma correspondente a um tipo de dado do Modbus. Os resultados estão organizados nos tópicos abaixo.

- VALIDAÇÃO - LEITURA DAS ENTRADAS DIGITAIS

A validação da leitura da entrada digital foi realizada através da manipulação do botão, conforme ilustrado na imagem abaixo. Ao pressionar o botão, observou-se uma resposta imediata no respectivo registro pelo modscan, onde a leitura do item correspondente passou de 0 para 1, indicando que o botão foi pressionado e o alarme foi disparado com sucesso. Esse comportamento confirma que a leitura de entradas digitais funciona como o esperado.

Figura 14: Leitura DI

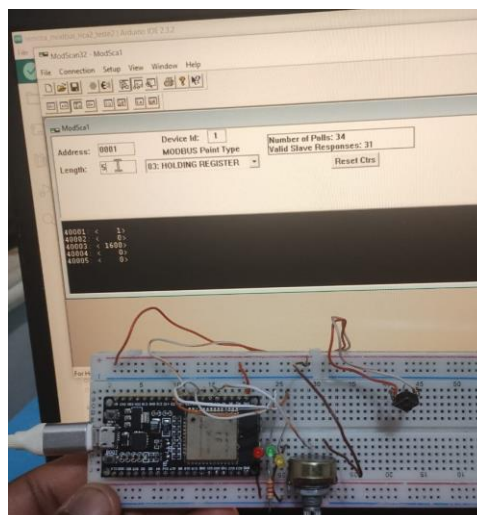


Fonte: Autores

- **VALIDAÇÃO - LEITURA DAS ENTRADAS ANALÓGICAS**

Para validar o funcionamento das entradas analógicas, os potenciômetros foram manipulados de maneira semelhante ao procedimento realizado com as entradas digitais. A imagem abaixo ilustra a leitura do potenciômetro que representa o sensor termopar, ajustado para gerar um valor máximo de 1600 °C. Isso demonstra que a variação na posição do potenciômetro resultou em alterações na leitura, confirmando que o sistema opera corretamente.

Figura 15: Leitura AI



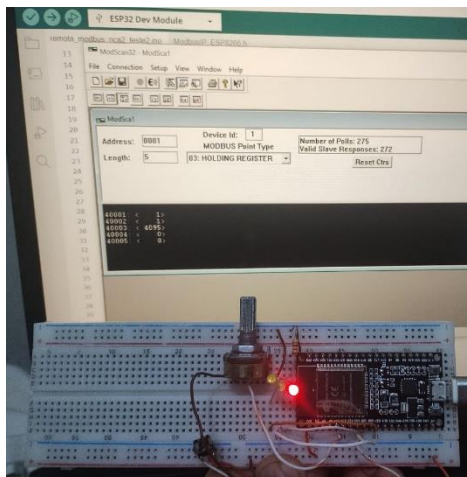
Fonte: Autores.

- **VALIDAÇÃO - ESCRITA SAÍDAS DIGITAIS**

A validação do funcionamento das saídas digitais foi realizada por meio da escrita de valores no registro do LED de status através do modscan. Conforme ilustrado na figura abaixo,

ao manipular esse registro de saída, observou-se o acionamento dos LED vermelho, confirmando que a comunicação entre o software e a remota Modbus está operando conforme o esperado.

Figura 16: Leitura DO

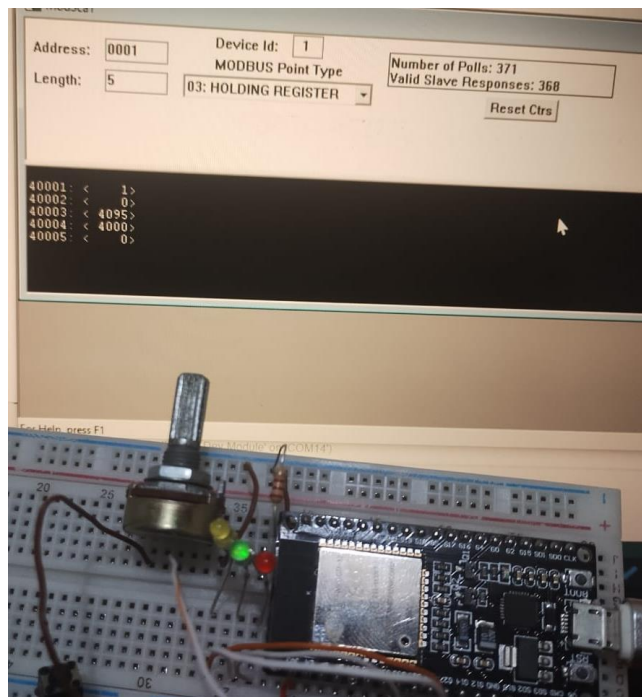


Fonte: Autores.

- **VALIDAÇÃO - ESCRITA SAÍDAS ANALÓGICAS**

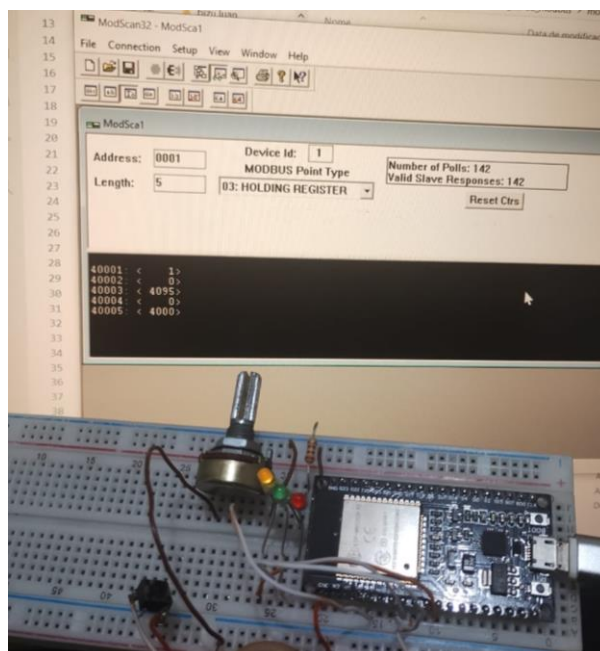
Por fim, o procedimento para a validação das saídas analógicas foi análogo ao das saídas digitais. Atribuiu-se o valor 0 aos registros dos LED verde e amarelo, responsáveis por simular o controle das válvulas do sistema, resultando em nenhum brilho. De forma semelhante para o valor máximo, foi atribuído o valor 4000, resultando em um certo brilho. Através destes testes, foi possível confirmar que o sistema está funcionando conforme o esperado. Obs: o range foi ajustado posteriormente para 0-100.

Figura 17: Leitura DI – Led verde



Fonte: Autores.

Figura 18: Leitura DI – Led Amarelo



Fonte: Autores

4.2 Etapa 2 - Integração com S71200

O plano para integração com o CLP foi definido em 4 partes:

- Listagem de todos os IPs e ping do PC com eles;
- Desenvolvimento do programa no TIA Portal;
- Desenvolvimento da IHM;
- Desenvolvimento do PID.

Dessas divisões, serão abordadas algumas partes importantes a seguir.

4.2.1.1 Listagem dos IPs e ping do PC com eles

Como abordado na Tabela 4, foram listados os IPs dos aparelhos envolvidos no controle e foi feito o ping a partir do computador.

Figura 19: Captura de tela do cmd do computador do laboratório.

```

Prompt de Comando
Microsoft Windows [versão 10.0.19045.5737]
(c) Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.

C:\Users\IC205>ping 192.168.0.130

Disparando 192.168.0.130 com 32 bytes de dados:
Resposta de 192.168.0.130: bytes=32 tempo=2ms TTL=30
Resposta de 192.168.0.130: bytes=32 tempo=1ms TTL=30
Resposta de 192.168.0.130: bytes=32 tempo=3ms TTL=30
Resposta de 192.168.0.130: bytes=32 tempo=1ms TTL=30

Estatísticas do Ping para 192.168.0.130:
    Pacotes: Enviados = 4, Recebidos = 4, Perdidos = 0 (0% de
    perda),
    Aproximar um número redondo de vezes em milissegundos:
        Mínimo = 1ms, Máximo = 3ms, Média = 1ms

C:\Users\IC205>ping 192.168.0.104

Disparando 192.168.0.104 com 32 bytes de dados:
Resposta de 192.168.0.104: bytes=32 tempo=74ms TTL=255
Resposta de 192.168.0.104: bytes=32 tempo=92ms TTL=255
Resposta de 192.168.0.104: bytes=32 tempo=96ms TTL=255
Resposta de 192.168.0.104: bytes=32 tempo=100ms TTL=255

Estatísticas do Ping para 192.168.0.104:
    Pacotes: Enviados = 4, Recebidos = 4, Perdidos = 0 (0% de
    perda),
    Aproximar um número redondo de vezes em milissegundos:
        Mínimo = 74ms, Máximo = 100ms, Média = 90ms

C:\Users\IC205>ping 192.168.0.140

Disparando 192.168.0.140 com 32 bytes de dados:
Resposta de 192.168.0.140: bytes=32 tempo<1ms TTL=64
Resposta de 192.168.0.140: bytes=32 tempo<1ms TTL=64
Resposta de 192.168.0.140: bytes=32 tempo<1ms TTL=64
Resposta de 192.168.0.140: bytes=32 tempo<1ms TTL=64

Estatísticas do Ping para 192.168.0.140:
    Pacotes: Enviados = 4, Recebidos = 4, Perdidos = 0 (0% de
    perda),
    Aproximar um número redondo de vezes em milissegundos:
        Mínimo = 0ms, Máximo = 0ms, Média = 0ms

C:\Users\IC205>ping 192.168.0.13

Disparando 192.168.0.13 com 32 bytes de dados:
Resposta de 192.168.0.13: bytes=32 tempo=2ms TTL=30
Resposta de 192.168.0.13: bytes=32 tempo<1ms TTL=30
Resposta de 192.168.0.13: bytes=32 tempo<1ms TTL=30
Resposta de 192.168.0.13: bytes=32 tempo=1ms TTL=30

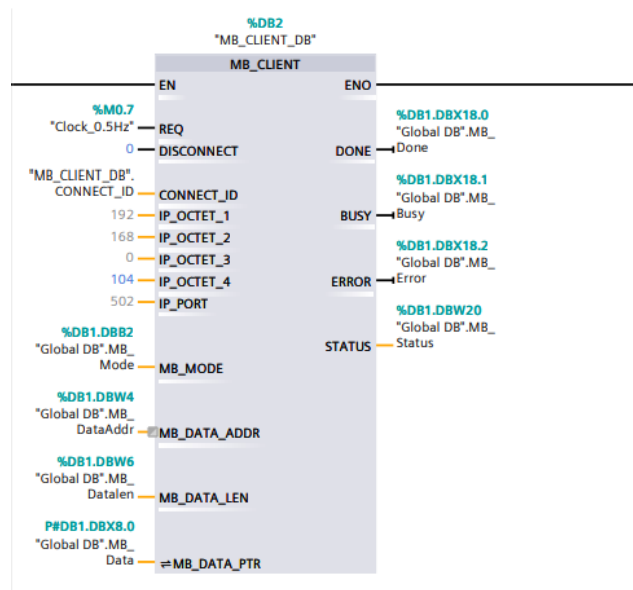
```

Fonte: Autores.

4.2.1.2 Programa no TIA Portal

Para a parametrização do Modbus Client, foi realizado as configurações padrões utilizadas em aula do bloco MB_Client-DB e alterado, em suma, o IP da remota, que, no momento de teste, era 192.168.0.104.

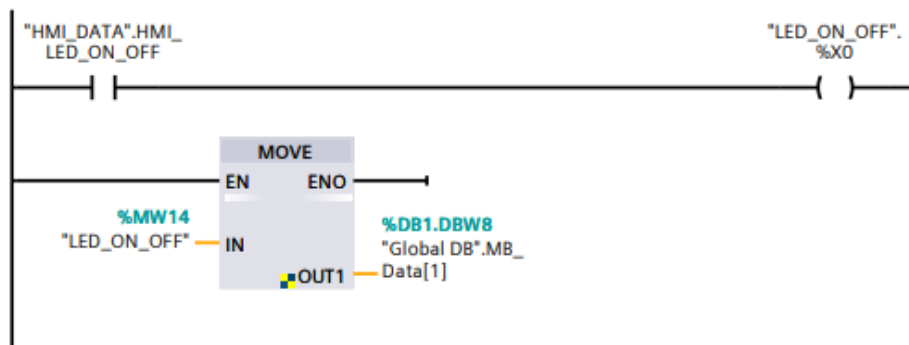
Figura 20: Parametrização do Client Modbus



Fonte: Autores.

Foi desenvolvida uma lógica para gerenciar o processo de liga e desliga a remota/sistema, em que, assim que o botão na IHM fosse pressionado, seria escrito no bit 0 da variável **LED_ON_OFF** e posteriormente escrito e armazenado no byte 1 da **Global.DB.MB_Data[1]**.

Figura 21: Logica LED vermelho remota/on ou off IHM.



Fonte: Autores.

Para se obter as leituras da entrada analógica, que foi associada ao registro 5, foi utilizada a lógica abaixo.

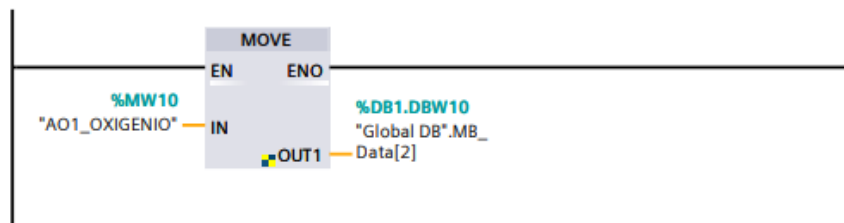
Figura 22: Lógica de armazenamento na variável AI1_TEMP.



Fonte: Autores.

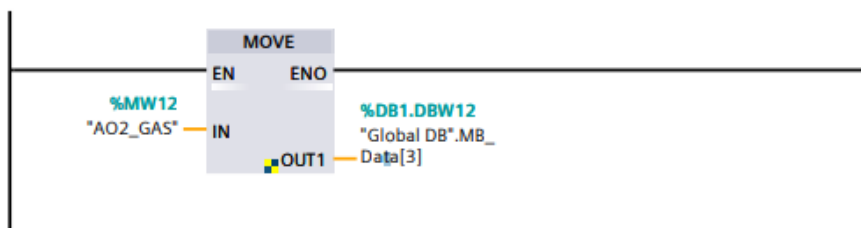
Nas próximas duas networks, gravamos o valor da variável `AO1_OXIGENIO` no byte 2 da variável global `MB_Data` e o valor da variável `AO2_GAS` no byte 3.

Figura 23: Logica de armazenamento da variável AO1_OXIGENIO.



Fonte: Autores.

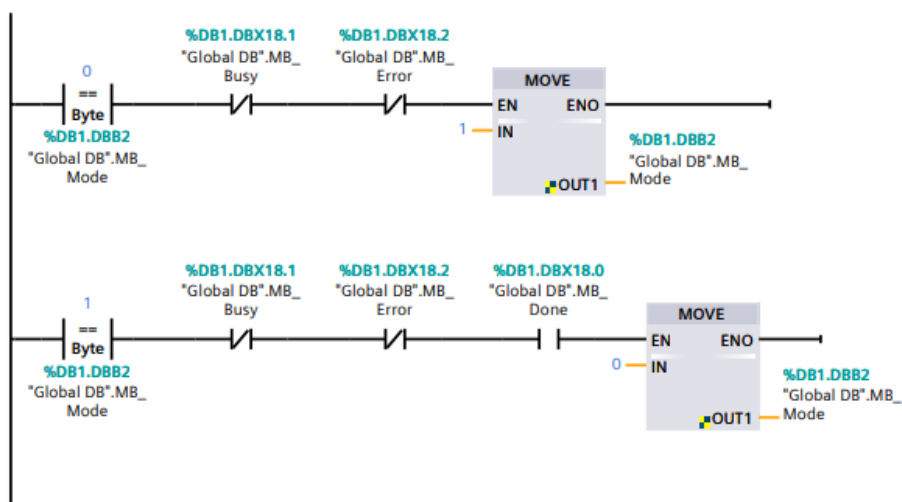
Figura 24: Logica de armazenamento da variável AO2_GAS.



Fonte: Autores.

Para gerenciar o modo de leitura e escrita, foi criada a lógica abaixo que permite que a alteração do Mode de 0 para 1, e vice-versa, seja feita de forma automática, sempre que não estiver ocupado e sem erro.

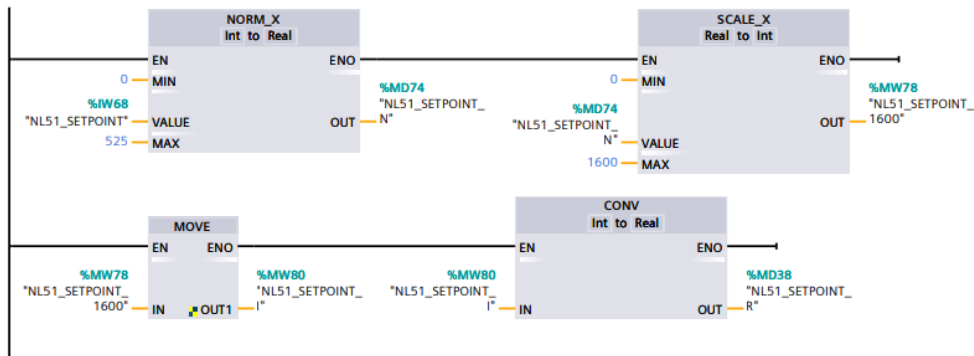
Figura 25: Lógica de gerenciamento e leitura de escrita.



Fonte: Autores.

Nessa parte da lógica, foi normalizado e parametrizado os valores do Proxy Profibus DP Hilcher, que ia de 0 a 525 e foi normalizado de 0 a 1. Em seguida, a variável normalizada foi comparada com 1600 e assim assumiu valores proporcionais de 0 a 1600. Por fim, a variável foi transformada de word para inteiro e de inteiro para real.

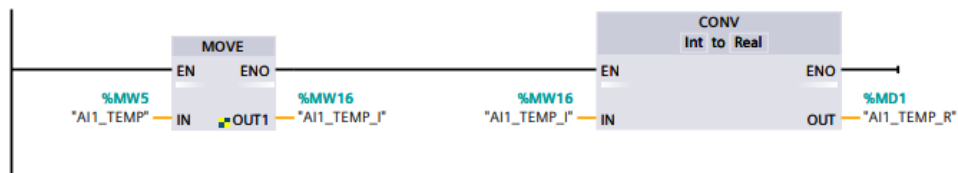
Figura 26: Lógica de conversão da variável N51_SETPOINT referente ao Proxy Profibu DP Hilcher .



Fonte: Autores.

Na network a seguir, foi transformada a variável AI1_TEMP em uma varável do tipo inteiro e posteriormente do tipo real.

Figura 27: Lógica de conversão da variável AI1_TEMP para real.

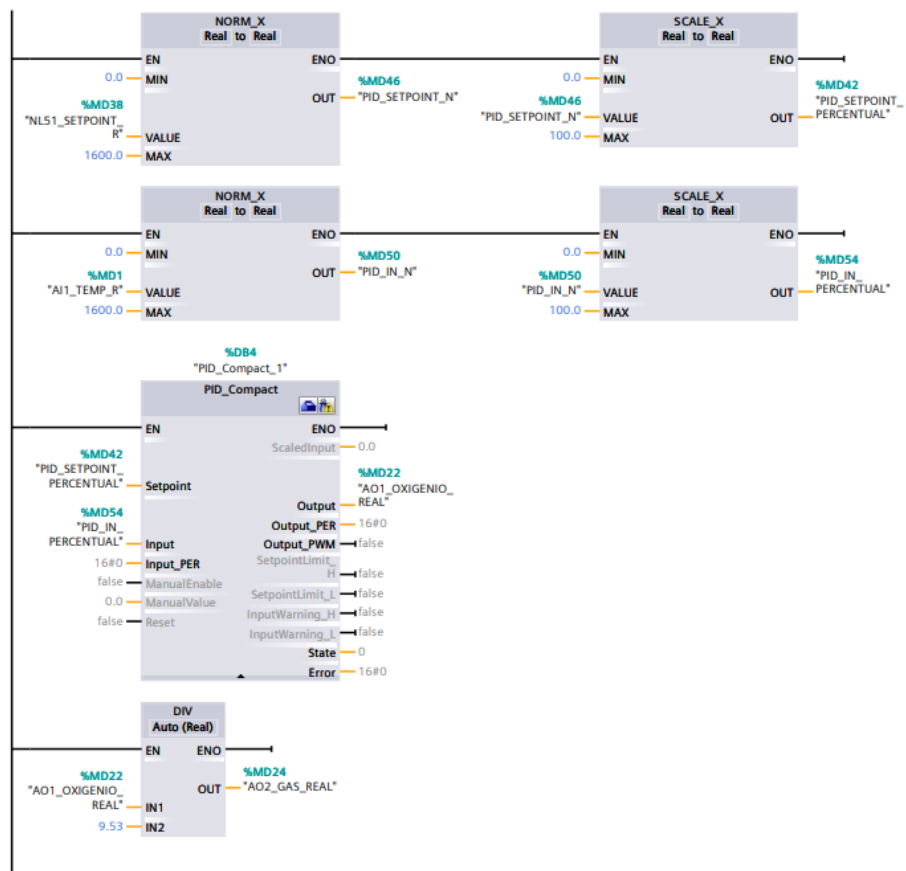


Fonte: Autores.

Para o desenvolvimento do PID, foi feita uma lógica que transforma as variáveis relacionadas ao PID em percentual (NL51_SETPOINT_R e AI1_TEMP_R) para que elas pudessem ser inseridas no bloco do PID. Logo, a saída do PID é percentual também.

No final dessa parte da lógica, com base nos artigos e estudos feitos sobre e a produção de vidros, foi feito uma proporção que, para cada 9,53 partes de oxigênio (ar atmosférico), será inserido 1 parte de gás (natural ou GLP).

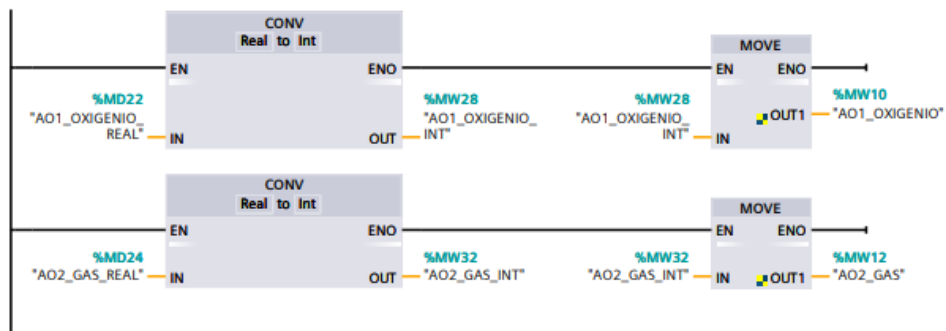
Figura 28: Lógica do PID.



Fonte: Autores.

Como para escrever nos registros da remota, foi feita uma conversão das variáveis AO1_OXIGENIO_REAL e AO2_GAS_REAL, que foram transformadas de real para inteiro e de inteiro para word, para que, assim, possa ser feita a escrita nos registros da remota.

Figura 29: Lógica de conversão das variáveis AO1_OXIGENIO_REAL e AO2_GAS_REAL.



Fonte: Autores.

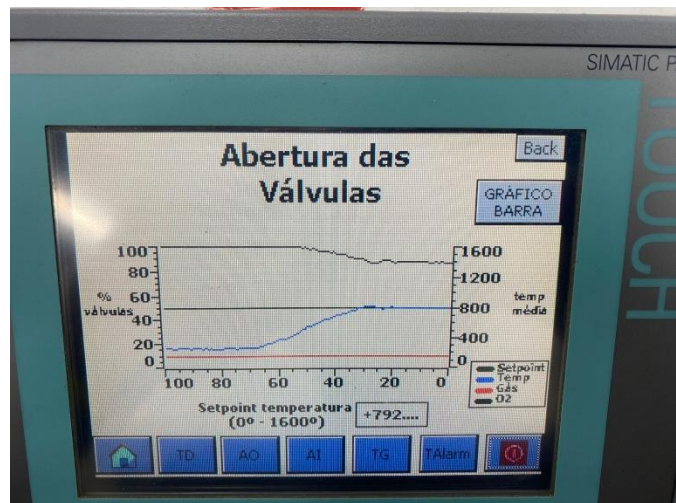
Nesse sentido, com a configuração concluída, o projeto de Automação de um forno de fusão para a produção de vidro cristal funcionou de acordo com o esperado, possibilitando o controle e o monitoramento por meio da IHM e da remota.

Figura 30: Funcionamento tela sensor de temperatura.



Fonte: Autores.

Figura 31: Funcionamento tela abertura das válvulas (gráfico de linhas).



Fonte: Autores.

Figura 32: Funcionamento tela abertura das válvulas (gráfico barras).



Fonte: Autores.

5 CONCLUSÃO

De acordo com as informações supracitadas e com os resultados obtidos, foi possível constatar que o trabalho obteve êxito ao recriar o funcionamento de um forno de fusão para a fabricação de vidros, por meio de uma remota, além de utilizar o protocolo de comunicação Modbus TCP para integrar o sistema e realizar o controle dele. Com isso, é possível verificar que a implementação, além de simular o forno, conseguiu também realizar de forma eficiente o controle das variáveis.

O desenvolvimento do projeto permitiu que os integrantes do grupo obtivessem maior conhecimento sobre o processo de fabricação de vidros e percebessem a importância de um controle bem apurado, nesse tipo de processo, para permitir a maior qualidade e durabilidade do vidro que está sendo produzido.

Além disso, o contato e o tempo gasto com estudos relacionados aos protocolos Modbus TCP e PROFINET foram essenciais para a total compreensão do assunto e consolidação dos conceitos aplicados de forma prática, conjuntura que aprimorou as habilidades dos integrantes do grupo acerca da programação de CLPs, desenvolvimento de PID e de IHM.

Por fim, o projeto foi essencial e importante para aplicar os conhecimentos adquiridos na disciplina Redes Industriais para Controle e Automação II de forma prática e dinâmica, reforçando ainda mais a importância de um sistema de controle industrial bem projetado em situações reais de automação e controle.

6 REFERÊNCIAS

ALVES, O.; GIMENEZ, I.; MAZALI, I. **Vidros**. [s.l.] Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, 2001. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/02/vidros.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2025.

COSTA JUNIOR, A. G. C. et al. **First-principles Simplified Modelling of Glass Furnaces Combustion Chambers**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222814571_First-

[principles_simplified_modelling_of_glass_furnaces_combustion_chambers](#). Acesso em: 02 abr. 2025.

HOLLADAY, A. R. **Modeling and Control of a Small Glass Furnace**. 2005. Tese (Mestrado em Engenharia) – West Virginia University. Disponível em: <https://researchrepository.wvu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2671&context=etd>. Acesso em: 02 abr. 2025.

NUNES, A. **AValiação Térmica de um Forno Industrial de Fusão de Vidros**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: [s.n.].

YUSUPBEKOV, N. R. et al. **Trends in the Development and Improvement of Glass Furnaces and Monitoring and Control Systems**. 2023. Disponível em: <https://ijctcm.researchcommons.org/journal/>. Acesso em: 02 abr. 2025.

SARMENTO, André. **ModbusIP_ESP8266.h**. GitHub, 2017. Disponível em: https://github.com/andresarmiento/modbus-esp8266/blob/master/arduinoIDE/ModbusIP_ESP8266/ModbusIP_ESP8266.h. Acesso em: 9 maio 2025.