

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Yan Cosme Martins Dias

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE
TEMPERATURA *FOUNDATION FIELDBUS* APLICADO EM UM
REFRIGERADOR INDUSTRIAL

Viçosa
2022

Yan Cosme Martins Dias

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE
TEMPERATURA *FOUNDATION FIELDBUS* APLICADO EM UM
REFRIGERADOR INDUSTRIAL

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Elétrica
do Centro de Ciências Exatas e
Tecnológicas da Universidade Federal
de Viçosa, para a obtenção dos créditos
da disciplina ELT 402 – Projeto de
Engenharia II – e cumprimento do
requisito parcial para obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. André Gomes Torres

Viçosa
2022

Yan Cosme Martins Dias

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE
TEMPERATURA *FOUNDATION FIELDBUS* APLICADO EM UM
REFRIGERADOR INDUSTRIAL**

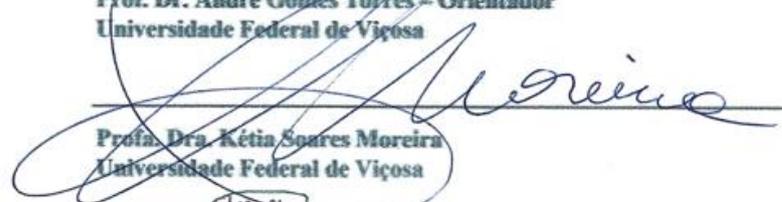
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Monografia e Seminário – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 16 de dezembro de 2022.

Comissão examinadora



Prof. Dr. Andre Gomes Torres - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



Profa. Dra. Kétia Soares Moreira
Universidade Federal de Viçosa



Profa. Dra. Mara Cristina da Silveira Coelho
CEFET-MG

“Se alguém ama uma flor da qual só existe um exemplar em milhões e milhões de estrelas, isso basta para que seja feliz quando as contempla.”
Antoine de Saint -Exupéry

Dedicatória

Dedico este trabalho primeiramente a todos os meus familiares que me ajudaram a chegar até aqui, em especial minha mãe Luciana, minha Tia Cida e minha avó Lúcia que hoje se encontra em outro plano.

Dedico também a todos os cientistas que todos os dias trabalham duro para promover evoluções sociais e tecnológicas no mundo, sou imensamente grato a todos os meus professores por todo aprendizado me passado ao longo da vida, gostaria de agradecer imensamente meu professor André por todo ensinamento e paciência ao longo do trabalho, agradeço também a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa.

Tudo que vivi nestes seis anos de estudante de engenharia foi incrível, uma mistura de dedicação, persistência e momentos inesquecíveis e em todos esses momentos tive pessoas junto a mim, não tenho palavras para agradecer a todos os meus amigos que estiveram comigo nessa caminhada, sem eles essa caminhada seria impossível.

Agradecimento

Agradeço a Deus, a minha Yemanjá e meus padrinhos Cosme e Damião, pela luz que me foi dada nessa caminhada.

Sou grato de ter tido a oportunidade de estudar na universidade mais linda do mundo, muito obrigado UFV por tantos momentos incríveis, mais uma vez agradeço meu orientador André pelo conhecimento me passado para que este projeto pudesse ser executado.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPQ, instituição que agradeço e apoio incansavelmente.

Resumo

Este trabalho mostra o processo de desenvolvimento de um Sistema de Refrigeração, controlado por CLP (Controlador Lógico Programável), alguns conceitos de: eletrônica de potência e automação serão apresentados ao longo do texto, a fim de descrever todo processo de operação e funcionamento do sistema. O trabalho é consubstanciado em acionamento e controle, feito por componentes eletrônicos e pelo CLP, onde foi feita a implementação de toda parte lógica. O projeto propõe uma forma automatizada de controle de velocidade do ventilador que resfria o condensador de um refrigerador industrial, e assim controla a temperatura do sistema. Os dados coletados ao longo da pesquisa e os resultados obtidos demonstram o controle da temperatura no *set point* desejado.

Palavras-chave: automação; eletrônica; controle; CLP; temperatura.

Abstract

This article shows the process of developing a Refrigeration System, controlled by PLC (Programmable Logic Controller), some concepts of: energy electronics and automation presented throughout the text, in order to describe the entire process of operation and functioning of the system. The work is substantiated in activation and control, made by electronic components and by the PLC, where there is implementation of every logical part. The cooling design forms a cooling and fan speed control that cools an industrial refrigeration system. Data search data over search and results set control at the desired search point.

Keywords: automation; electronics; control; PLC; temperature.

Sumário

1. Introdução.....	12
2. Revisão Bibliográfica	13
2.1 Protocolos de Comunicação	14
2.2. Circuito de Potência e Aplicações de Eletrônica.....	17
2.2.1. Controle de Potência.....	17
2.2.2. Circuito de Potência.....	17
2.3. Circuito de Operação	19
3. Materiais e Métodos	19
3.1. Sistema de Refrigeração	19
3.2. Placa de Circuito Impresso	22
3.3. Circuito de Operação Integrado ao CLP.....	23
4. Resultados.....	27
5. Conclusão	28
6. Referências Bibliográficas.....	29
APÊNDICE A – Especificações Técnicas do CLP	30
APÊNDICE B – Criação do Projeto no CLP	34

Lista de Figuras

Figura 1. Arquitetura do Sistema. Fonte: (Smar, 2008)	13
Figura 2. Pirâmide de níveis da rede. Fonte: (Cassiolato, 2022).....	14
Figura 3. Esquema de comunicação Profibus. Fonte: (Cassiolato, 2022)	15
Figura 4. Topologia do protocolo Hart. Fonte: (Cassiolato, 2022)	16
Figura 5. Vista de topo do TCA 785. Fonte: (Siemens, 2008).....	17
Figura 6. Esquemático do MOC 3022. Fonte: (Fairchild, 2005).....	18
Figura 7. Circuito de Operação.....	19
Figura 8. Parte externa do bebedouro.....	20

Figura 9. Parte interna do sistema de refrigeração.	20
Figura 10. Ciclo de Carnot Pressão versus Entalpia. Fonte: (Stoecker, 2002).....	21
Figura 11. Visão 3D da Placa de Circuito Impresso.	22
Figura 12. Placa de Circuito Impresso finalizada.....	22
Figura 13. Forma de onda do pino 5.....	23
Figura 14. Sinal de Rampa.	24
Figura 15. Disparo do TCA 785.....	24
Figura 16. CLP integrado ao Computador.....	25
Figura 17. Malha de Controle.....	25
Figura 18. Bloco MAO implementado no <i>ladder</i> do projeto.	26
Figura 19. PID implementado no ladder do projeto.	27
Figura 20. Corrente na Carga.	27
Figura 21. Temperatura do Sistema.....	28
Figura 22. Instalação do DFI302 e sensores.....	30
Figura 23. Esquema do Bloco AO. Fonte: (Smar, 2007)	32
Figura 24. Esquema do Bloco MAO. Fonte: (Smar, 2007).....	33
Figura 25. Tela Inicial do Studio 302.....	35
Figura 26. Criação do Projeto no SYSCON.....	35
Figura 27. Parâmetros do Projeto.	36
Figura 28. Inserção de novos equipamentos no projeto.	36
Figura 29. Criação da rede de alta velocidade.....	36
Figura 30. Atribuições da Bridge.	37
Figura 31. Equipamentos de campo adicionados no SYSCON.	38
Figura 32. “Functions Blocks” atribuídos ao TT302.....	38
Figura 33. Ícone para criação da área de controle	39
Figura 34. Bloco de Controle.	39

Figura 35. Conexão entre entrada e saída do TT302 e o DF63.	40
Figura 36. Parâmetros do TT302-AI-1.	40

Lista de Tabelas

Tabela 1. Função dos Pinos do TCA 785. Fonte: (Siemens, 2008).....	18
Tabela 2. Parâmetros do TT302-AI-1.....	41

1. Introdução

Desde a invenção do transistor em meados do século XX, diversas tecnologias começaram a se desenvolver, a transição das válvulas termiônicas para os dispositivos semicondutores foi o marco de uma revolução tecnológica, que proporcionou o aparecimento de diversos dispositivos chaveados no mercado como: TRIAC, DIAC, entre outros (Boylestad e Nashelsky, 2004). O projeto desenvolvido neste trabalho é dividido em: circuito de potência e circuito de comando, onde utiliza-se de dispositivos semicondutores para realizar o controle da potência do motor do ventilador.

O TRIAC, o principal semiconductor utilizado, é uma combinação paralela inversa de camadas semicondutoras, com um terminal de porta que permite controlar a passagem de corrente em ambos os sentidos (Boylestad e Nashelsky, 2004). Quando uma corrente é injetada no terminal de porta conhecido como *gate*, temos a passagem de corrente. Para controlar a fase de disparo do *gate*, os circuitos integrados TCA785 (Siemens, 2008), circuito integrado utilizado para controle de tiristores e transistores, e o MOC3022 (Texas, 2022), CI optoacoplador, foram utilizados. Esses componentes juntamente com resistores e capacitores, permitiram a construção do circuito de potência, responsável pelo disparo que resulta na corrente da carga, todos os componentes foram acoplados a uma placa eletrônica.

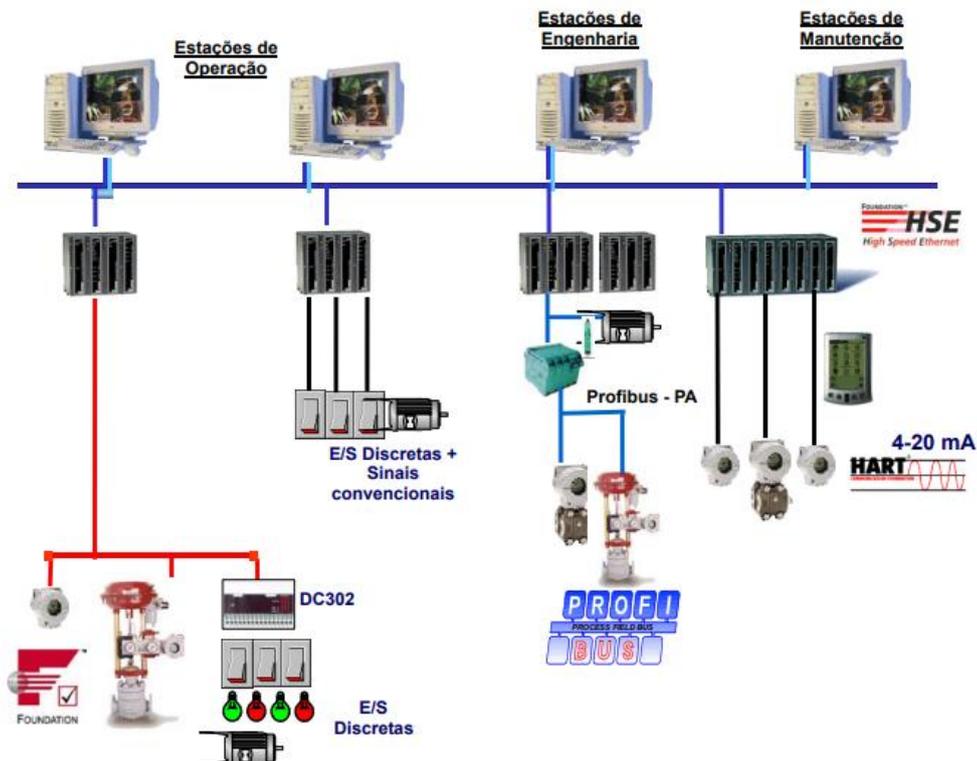
Amplamente utilizado nas indústrias, o controlador lógico programável (CLP) permite a automatização de diversos processos por possuir microprocessadores que realizam funções como: processamento de programas, programação de memórias externas e processamento de entradas e saídas (Natale, 1998). Nesse trabalho, um CLP da empresa SMAR, o DFI302 (Fieldbus Universal Bridge), (Smar, 2008), foi utilizado para controlar as variáveis analógicas do circuito de potência, permitindo automatizar o sistema de refrigeração.

O objetivo do projeto é controlar a temperatura do sistema através do controle de potência do motor de indução de um ventilador. Além disso, automatizar todo o sistema, permitindo fazer todo monitoramento e controle das variáveis através de computadores conectados ao controlador lógico programável.

2. Revisão Bibliográfica

O CLP (controlador lógico programável) é um equipamento de controle modular multifunção, usado em larga escala em Sistemas de Controle de Campo. A Figura 1, mostra a integração do CLP com as estações utilizadas em ambientes empresariais e seus terminais de entrada e saída, com seus respectivos protocolos de comunicação.

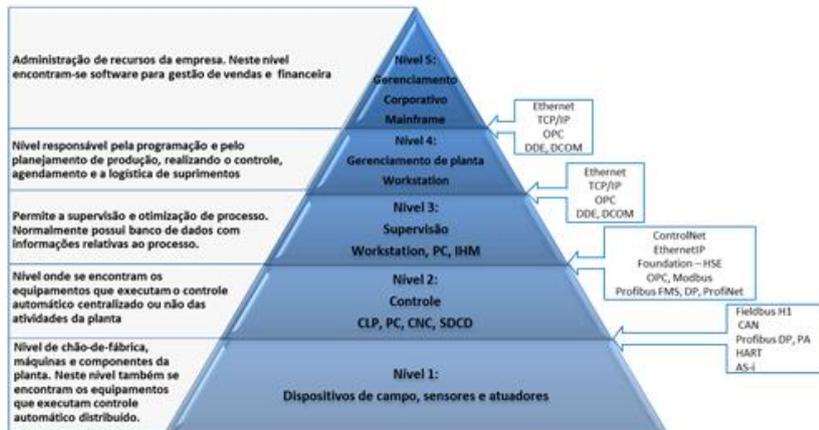
Figura 1. Arquitetura do Sistema.



Fonte: Smar, 2008.

Podemos definir as estações, como os níveis hierárquicos que compõe toda a estrutura da tecnologia em um ambiente industrial, a Figura 2 exhibe uma pirâmide que facilita o entendimento da rede.

Figura 2. Pirâmide de níveis da rede.



Fonte: Cassiolato, 2022.

No primeiro nível tem-se os dispositivos, sensores e atuadores; onde os protocolos: *Fieldbus*, *HART* e *Profbus*, são mais utilizados. Nesse nível temos os módulos de entradas e saídas, analógicas e digitais, atuando como a *bridge*, termo utilizado para os módulos de E/S, enviando e recebendo informações dos sensores e transdutores. No segundo nível tem-se o controlador lógico programável, que pode utilizar diversos protocolos de comunicação, como o *ETHERNET/IP*, que envia e recebe dados de uma máquina (Computador), sendo, possível realizar o controle do sistema através de algum *software*. No terceiro nível tem-se a supervisão, que é responsável pelo monitoramento e tratamento de dados do CLP. Esse processo é feito via *software*, que é responsável por tratar os dados, e apresentar em diversos formatos para os usuários. Os outros níveis estão relacionados ao planejamento e gerenciamento da planta empresarial, que será controlada pelo sistema (Cassiolato, 2022).

2.1 Protocolos de Comunicação

As redes de computadores, são conexões entre estações de trabalho, periféricos, terminais, dispositivos, entre outras parte integrantes de uma rede; a organização internacional de padronização na norma ISO/IEC 7498-1, traz a seguinte definição para as redes: “O conjunto de um ou mais computadores, o *software* associado, periféricos, terminais, operadores humanos, processos físicos, meios de transferência de informação, entre outros componentes, formando um conjunto autônomo capaz de executar o processamento e a transferência de informações” (Elias e Lobato, 2013).

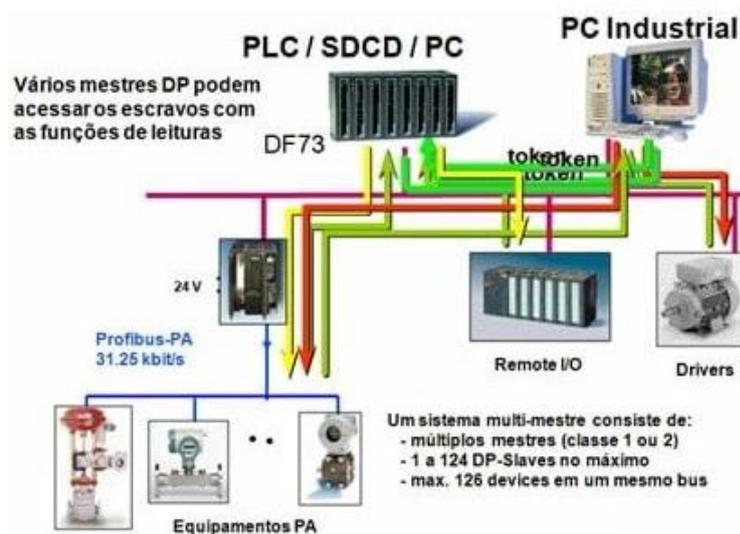
Os protocolos de comunicação são padronizações que permitem a comunicação entre pontos distintos na rede; como exemplo de protocolos temos: *Ethernet/IP*; *Hart*, *Profibus*, *Foundation Fieldbus*, entre outros.

Abaixo serão apresentados os protocolos de comunicação utilizados nesse projeto.

Foundation Fieldbus: É uma rede local (LAN), que permite uma comunicação totalmente digital, conectando, sensores, atuadores e controladores (Smar, 2022), possui um LAS (Link Active Scheduler), onde a comunicação entre os dispositivos conectados à rede é feita por esse *Link* que gerencia as informações através da rede H1. Um diferencial do *Foundation Fieldbus* é ter a possibilidade de colocar um equipamento de campo para assumir a rede caso o controlador principal tenha algum problema, ou seja, nesse sistema um outro dispositivo assume o papel de Mestre *Backup* na rede, enquanto a manutenção no controlador está sendo feita (Albuquerque e Alexandria, 2009).

Profibus: Protocolo que permite uma comunicação conjunta entre os controladores e seus periféricos, onde os dispositivos mestres (controladores), enviam e recebem informações através de um barramento, essa comunicação acontece somente quando o dispositivo mestre possui um *token*, que lhe dá acesso ao barramento, evitando colisões de informação na rede, a Figura 3 mostra um esquema dessa forma de comunicação (Stemmer, 2001).

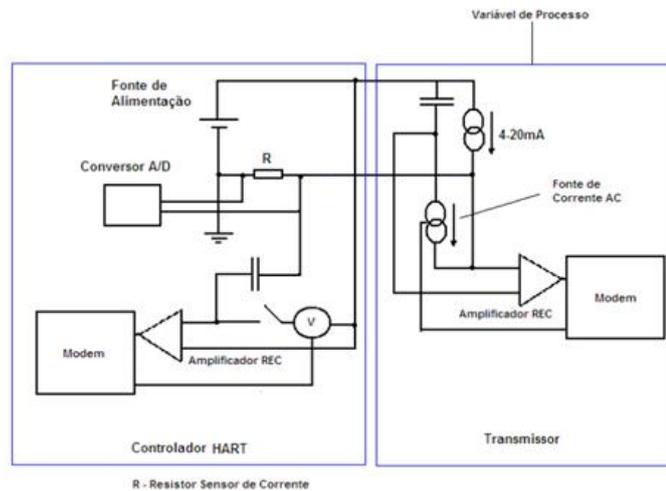
Figura 3. Esquema de comunicação Profibus.



Fonte: Cassiolato, 2022.

Hart: Nesse protocolo os dispositivos de campo só conseguem enviar dados para os controladores caso esses façam requisições aos dispositivos. Suporta equipamento multivariáveis. A Figura 4, mostra a topologia do protocolo Hart.

Figura 4. Topologia do protocolo Hart.



Fonte: Cassiolato, 2022.

O terminal do transmissor e do controlador, possuem um modem e um amplificador de alta impedância de forma a não carregar o modem com corrente, quando o controlador está em operação normal a chave que conecta a fonte de tensão (V) ao circuito fica em estado aberto. Quando o transmissor envia um dado, ele injeta uma corrente de 1 mA pico a pico através da fonte de corrente AC, essa corrente sobrepõe a corrente de 4-20 mA, através da queda de tensão no resistor R, que é medida nos terminais do amplificador chegando até o demodulador do controlador que posteriormente irá transformar esse sinal analógico em sinal discreto. O controlador por sua vez, envia informações para o transmissor fechando a chave da fonte de tensão, impondo assim uma tensão de 500 mV pico a pico, nos terminais do transmissor. Essa tensão é medida pelo amplificador e enviada para o demodulador do transmissor. O protocolo HART é chamado de sistema Mestre-Escravo, pois o transmissor só conseguirá enviar dados para o controlador se a chave da fonte de tensão estiver desabilitada, tornando o controlador o mestre e o transmissor o escravo (Cassiolato, 2022).

2.2. Circuito de Potência e Aplicações de Eletrônica

Nesta seção será abordado a construção da parte de potência e eletrônica do projeto. Alguns conceitos como: tiristores, circuitos integrados e controle de potência serão abordados, para explicar como é feito o controle de temperatura no sistema de refrigeração através do controle de potência do ventilador.

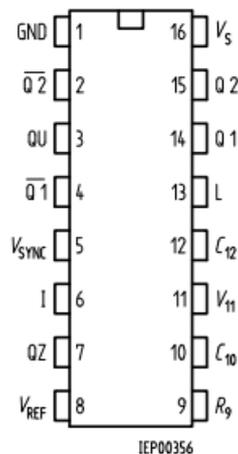
2.2.1. Controle de Potência

O objetivo do trabalho como já foi descrito é colocar um *set point* de temperatura, de tal forma que o sistema tenha a tendência de sempre manter a temperatura na faixa de 30 °C, o protótipo criado tem a função de variar a velocidade do ventilador para que ele mantenha o *set point* esperado, essa variação é feita através de um método conhecido como controle de potência, que ceifa a forma de onda da potência entregue ao ventilador, possibilitando a alteração da velocidade.

2.2.2. Circuito de Potência

Para realizar o controle de potência foi utilizado o circuito integrado (CI), TCA 785 (Siemens, 2008). Esse dispositivo eletrônico é responsável pelo controle de fase através de pulsos de gatilhos que variam entre 0° a 180°. Esse CI possui dezesseis pinos, a estrutura do CI é apresentada na Figura 5, e na Tabela 1 tem-se as funções de cada pino.

Figura 5. Vista de topo do TCA 785.



Fonte: Siemens, 2008.

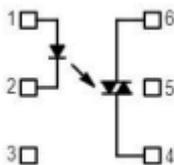
Tabela 1. Função dos Pinos do TCA 785.

Pino	Função
1	Ground
2	Saída 2 invertida
3	Saída U
4	Saída 1 invertida
5	Sincronismo da Tensão
6	Inibidor
7	Saída Z
8	Estabilizador de Tensão
9	Resistência da Rampa
10	Capacitância da Rampa
11	Controle de Tensão
12	Extensão do Pulso
13	Largura do Pulso
14	Saída 1
15	Saída 2
16	Tensão de Alimentação

Fonte: Siemens, 2008.

Juntamente com o TCA785, foi utilizado um outro CI conhecido como MOC 3022, um optoacoplador com um diodo emissor de luz interno responsável por habilitar a saída caso a entrada esteja no nível lógico 1. O esquemático do MOC3022, está na Figura 6.

Figura 6. Esquemático do MOC 3022.



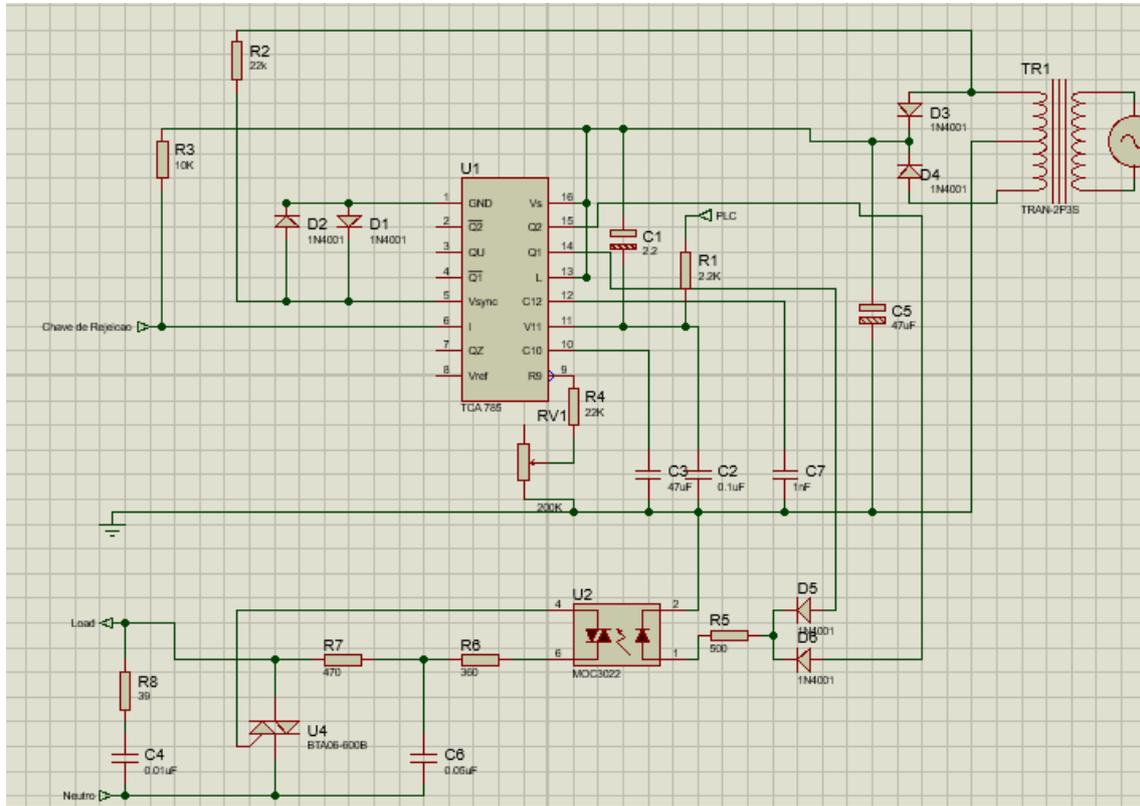
Fonte: Fairchild, 2005.

Esse CI possui seis pinos como é visto na imagem. Os pinos 1 e 2 recebem uma corrente que dispara o diodo led, a luz emitida pelo diodo fecha os terminais 4 e 5 colocando os terminais do TRIAC em curto e habilitando passagem de corrente. Enquanto o TCA 785 é responsável pelo controle de potência, o MOC3022 recebe os sinais de saída do TCA e dispara um TRIAC acoplado ao motor do ventilador, que controla a quantidade de potência que será entregue. Além disso, o MOC 3022 possui a função de acoplar a baixa tensão (sinal entregue pelo TCA) a alta tensão (tensão da rede que alimenta o motor).

2.3. Circuito de Operação

Através dos testes feitos no Laboratório de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa, foi desenvolvido o circuito de operação, ilustrado na Figura 7.

Figura 7. Circuito de Operação.



Este é o circuito responsável pelo acionamento do motor do ventilador, utilizando os CI's TCA 785 e o MOC 3022, que habilita o *gate* do TRIAC conectado a carga. Mais detalhes sobre o funcionamento do circuito serão apresentados na seção Materiais e Métodos.

3. Materiais e Métodos

Nesta seção será discutido a forma como o projeto foi desenvolvido, seguindo a ordem de execução do trabalho. Todo material complementar e detalhes técnicos dessa seção pode ser visto no **APÊNDICE A** e no **APÊNDICE B**.

3.1. Sistema de Refrigeração

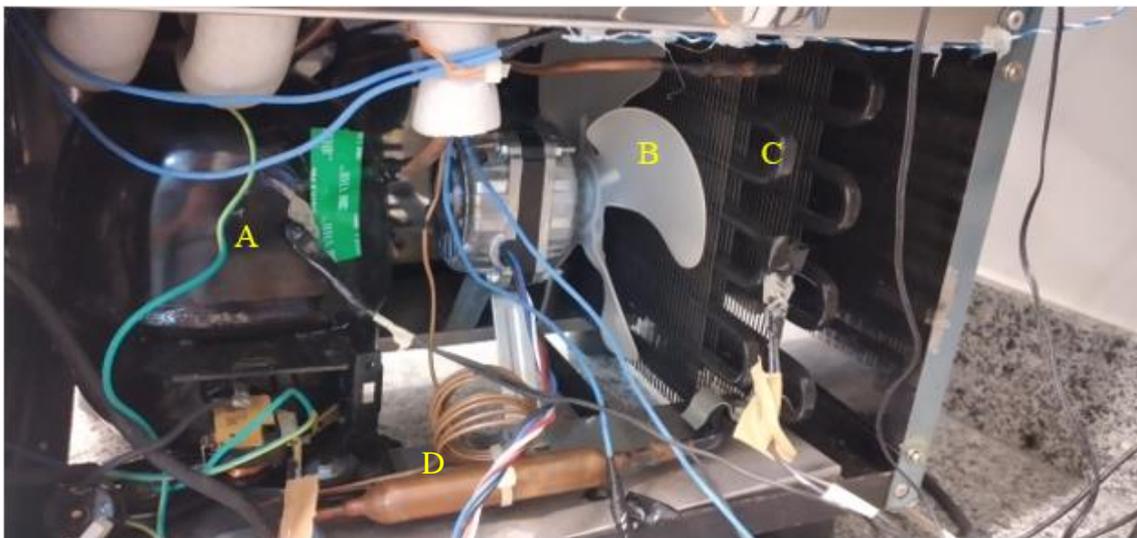
O sistema de refrigeração que foi controlado é um bebedouro industrial da Pizziolo Refrigeração, com capacidade de 25 litros. Sua parte externa é feita em aço inox e possui duas saídas de líquido, como é apresentado na Figura 8.

Figura 8. Parte externa do bebedouro.



A parte interna do sistema é constituída por: um compressor, que circula um fluido refrigerante pelo sistema; um condensador, onde o gás comprimido se torna líquido; um ventilador, responsável por controlar a temperatura do sistema, um tubo capilar responsável pela expansão do fluido; e por fim, um misturador, que fica interno a uma câmara onde é reservado o líquido a ser refrigerado. A Figura 9 mostra a parte interna do sistema de refrigeração.

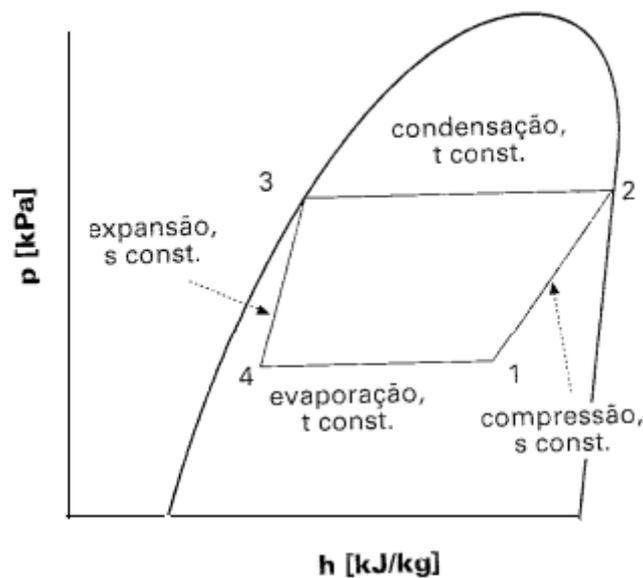
Figura 9. Parte interna do sistema de refrigeração.



- A – Compressor
- B – Ventilador
- C – Condensador
- D – Tubo Capilar

A refrigeração do sistema ocorre pelo ciclo de compressão a vapor. Um fluido refrigerante circula no evaporador do sistema, essa região possui baixa pressão e alta temperatura, logo, o fluido está em estado gasoso e com pressão constante, o compressor é responsável por exercer trabalho sobre o fluido aumentando a pressão exercida sobre ele, esse processo faz com que o vapor seja saturado, quando essa parte do ciclo se termina a pressão é mantida constante e o fluido é condensado no condensador, nesse momento o líquido que se encontra no condensador; flui para o tubo capilar, passando pelo processo de expansão isoentrópica, na qual a pressão cai gradativamente fazendo o fluido retornar ao seu estado gasoso, todo o processo ocorre de forma cíclica (Stoecker, 2002). O ciclo de Carnot, um ciclo ideal reversível, explica esse ciclo termodinâmico, a Figura 10, exibe um gráfico do ciclo de Carnot que mostra todas as etapas descritas acima de forma gráfica e cíclica.

Figura 10. Ciclo de Carnot Pressão versus Entalpia.



Fonte: Stoecker, 2002.

O ciclo de Carnot é um ciclo ideal, mas que pode ser usado para explicar de forma mais clara o ciclo de compressão a vapor como foi feito acima.

O ventilador tem a função de aumentar o fluxo de ar no sistema, pois, com o aumento desse fluxo, a primeira etapa do processo: a troca de calor entre o evaporador e o fluido refrigerante, é acentuada, resultando em um fluido com mais temperatura para ser saturado; basicamente o ventilador otimiza o processo de refrigeração.

3.2. Placa de Circuito Impresso

Todo o protótipo testado em *protoboard* foi implementado em uma placa de circuito impresso (PCI), após a finalização dos testes. A PCI é feita de fenolite que após passar por um processo de corrosão gera trilhas de cobre que possibilita a circulação de corrente entre os componentes do circuito, que são soldados na placa. As Figuras 11 e 12, mostram uma visão 3D e física, respectivamente, da placa desenvolvida.

Figura 11. Visão 3D da Placa de Circuito Impresso.

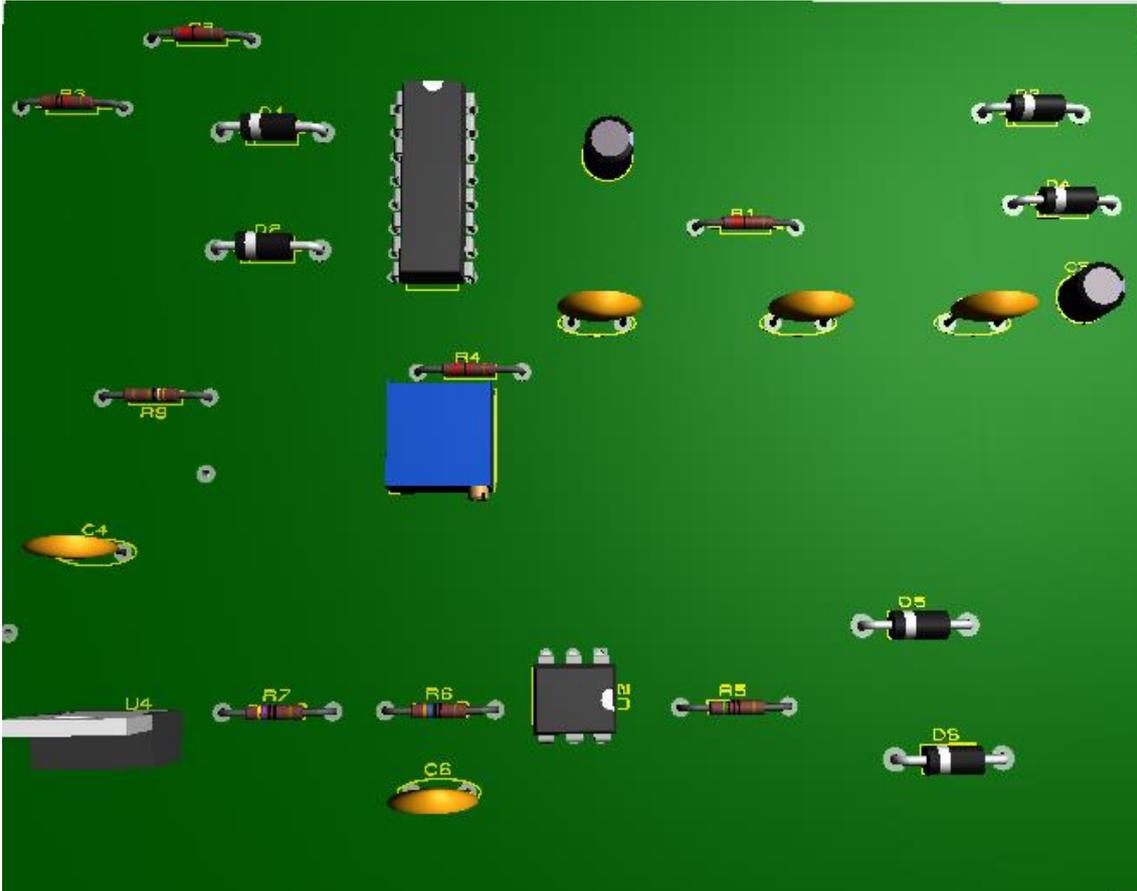


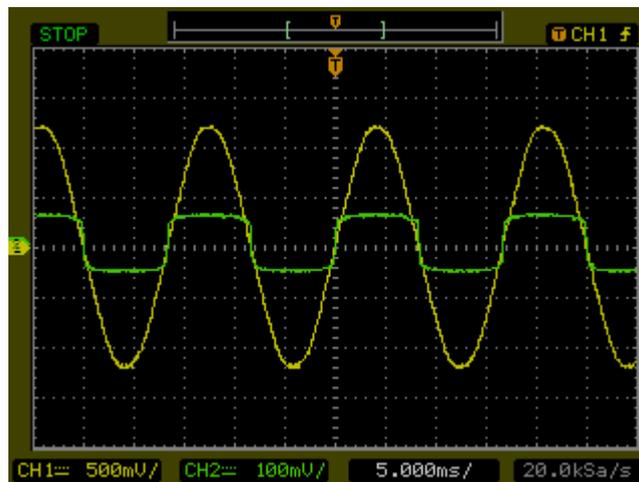
Figura 12. Placa de Circuito Impresso finalizada.



3.3. Circuito de Operação Integrado ao CLP

O circuito de operação, Figura 7, é alimentado por uma tensão de 127 Vrms que provém da rede elétrica, contudo, a alimentação do circuito de operação é uma tensão de 10 V contínua. Assim, um transformador de tap central abaixador e uma ponte retificadora com dois diodos são responsáveis pela alimentação. Por outro lado, o pino cinco do TCA 785 é responsável pelo sincronismo da tensão de entrada, portanto recebe o sinal senoidal de 10 Vrms, oriundo diretamente do secundário do transformador, como mostra a Figura 13.

Figura 13. Forma de onda do pino 5.



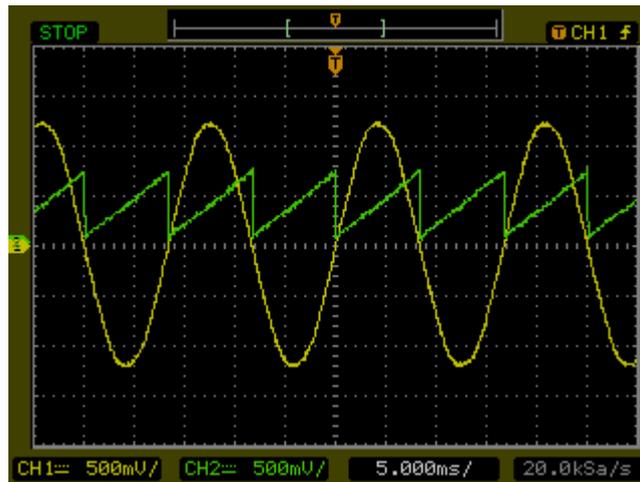
Note na Figura 13, que a saída alternada fornecida pelo secundário do transformador é a senoide em amarelo. O sincronismo é responsável por detectar a passagem por zero da senoide, ele é representado pela onda verde, e muda de quadrante a cada passagem por zero do sinal de entrada.

Voltando no circuito de operação, Figura 7, no pino dez do CI existe um circuito responsável por gerar um sinal de rampa. Esse circuito alimenta um capacitor de 47 μ F acoplado a ele, e tem uma tensão dada pela equação (1).

$$V_c = \frac{i}{c} \times t \quad (1)$$

Observe que a corrente (i) e a capacitância (c) da equação são valores constantes, logo o formato de onda gerado é uma reta crescente. A cada vez que o CI detecta a passagem por zero no sincronismo, a energia acumulada no capacitor é descarregada por um transistor interno ao TCA 785.

Figura 14. Sinal de Rampa.

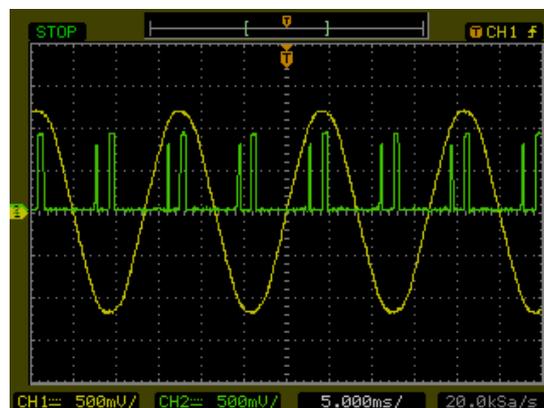


A Figura 14 ilustra o sinal gerado pelo pino dez, temos uma reta crescente elucidando, o capacitor carregando até 6 Vrms. Também, observa-se a tensão indo a zero a cada vez que o sinal de referência passa pelo zero.

Considerando novamente o CI da Figura 5, têm-se o pino onze que é responsável pelo controle de tensão e referência a tensão na qual as saídas do TCA serão acionadas. Nesse pino é colocado uma das saídas analógicas do CLP, que é responsável por controlar a referência de tensão, o que permite oscilar a quantidade de vezes que o circuito é disparado.

As saídas do TCA são ligadas ao MOC3022, cada vez que o MOC 3022 é acionado, um LED interno sensibiliza um foto-transistor na saída deixando fluir uma corrente elétrica em torno de 10 mA. Esse sinal é responsável por disparar o *gate* do TRIAC que aciona o motor do ventilador, permitindo fazer o controle de potência na carga.

Figura 15. Disparo do TCA 785.

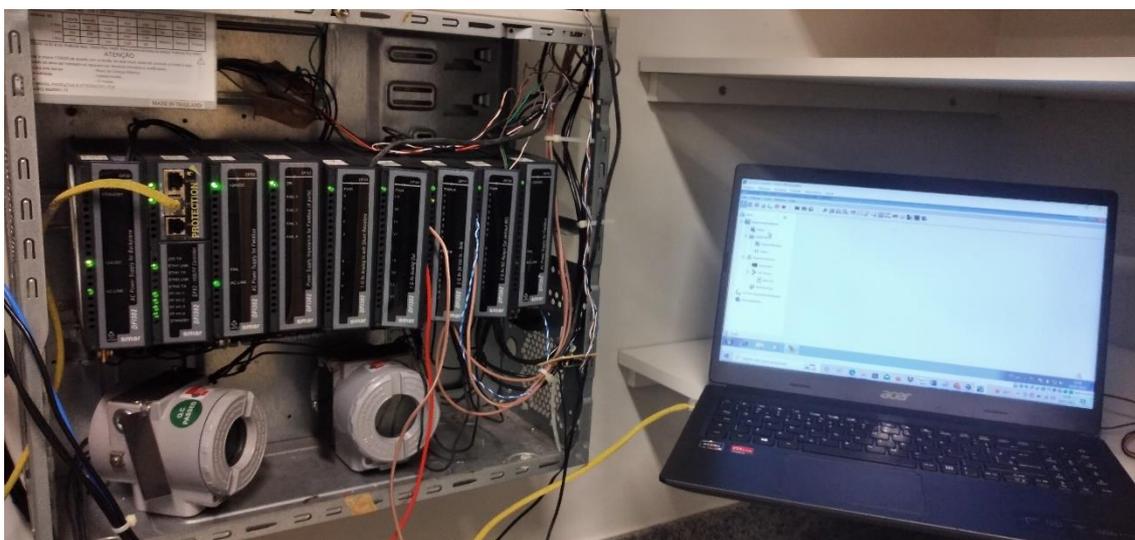


A Figura 15 mostra os pulsos de saída gerados pelo TCA785, os pulsos estão em verde. Note que a cada meio ciclo de onda ocorrem dois disparos, isso acontece pois o

sincronismo detecta duas passagens por zero a cada meio ciclo, fazendo o circuito disparar duas vezes. À medida que o sinal de referência que consiste em uma tensão aplicada pelo CLP é alterado, os disparos mudam de posição aumentando ou diminuindo a potência entregue a carga, sendo assim possível alterar a velocidade do ventilador.

O CLP recebe comandos de um computador, via protocolo *Ethernet/IP*, onde é possível fazer *download* e *upload* dos dados, através do programa Studio302 incluído no pacote de *software* da SMAR Technology Company, veja Figura 16.

Figura 16. CLP integrado ao Computador.



A saída analógica do DF46 foi conectada a placa eletrônica, para que a tensão de referência do circuito de potência possa ser alterada de acordo com a lógica implementada no CLP, como mostra a Figura 17.

Figura 17. Malha de Controle.



Para fazer o controle, utilizou-se o programa LogicView (Smar, 2022), onde foi elaborado um diagrama *ladder*. Foi implementado um circuito lógico, que aciona o ventilador e altera sua velocidade dentro de uma faixa de tensão aplicada pelo CLP. O

bloco MAO, que possui múltiplas saídas analógicas, Figura 18, foi utilizado para variar a tensão de referência de controle do ventilador, essa tensão varia de 2 a 6 Vcc, permitindo uma variação contínua de 0 rpm a velocidade nominal.

A finalidade do projeto é estabilizar a temperatura do condensador em um valor de *set point* de temperatura específico, como já mencionado, de tal forma que a tensão varie de acordo com a temperatura lida pelos sensores do CLP conectados ao sistema.

Assim, a tensão de saída deve variar com a temperatura do sistema, para que a velocidade do ventilador aumente ou diminua. Para fazer essa lógica foi implementado o PID, Figura 19, que recebe o valor de *set point*. Neste trabalho foi adotado o *set point* de 30 °C e uma variável de processo, que é a temperatura lida em tempo real pelos sensores; note que na Figura 19, o *set point* colocado no PID foi de 35 °C, esse valor foi implantado porque nos testes foi observado que com o *set point* nesse valor a temperatura do sistema se mantinha em 30 °C. O PID analisa essas duas variáveis e calcula uma saída que estabiliza a variável de processo próximo ao *set point*. A saída do PID é conectada a entrada do bloco MAO, onde o módulo DF46, saída A0, do CLP sintetiza a tensão e a fornece ao circuito de potência.

Figura 18. Bloco MAO implementado no *ladder* do projeto.

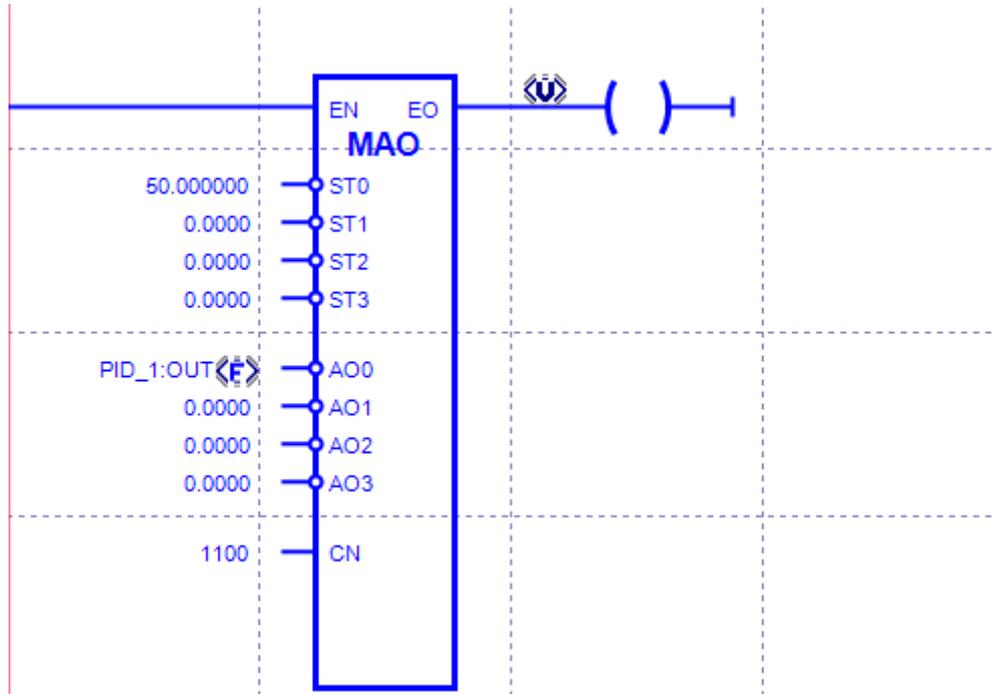
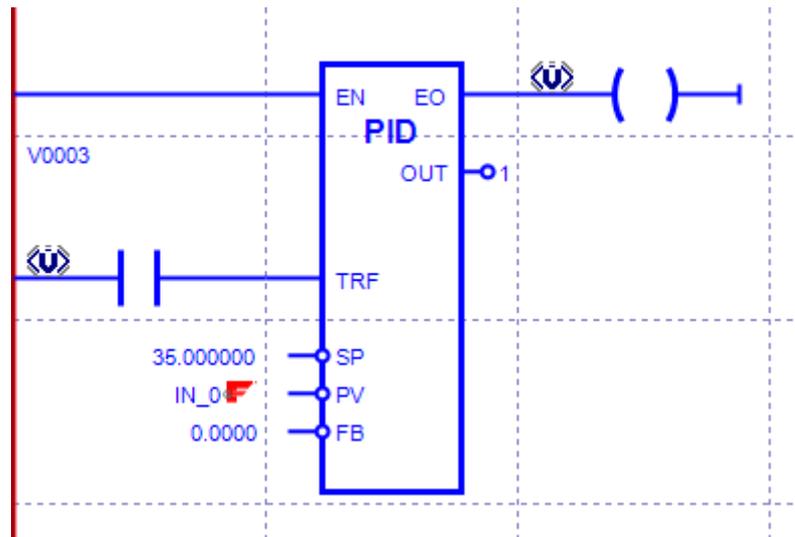


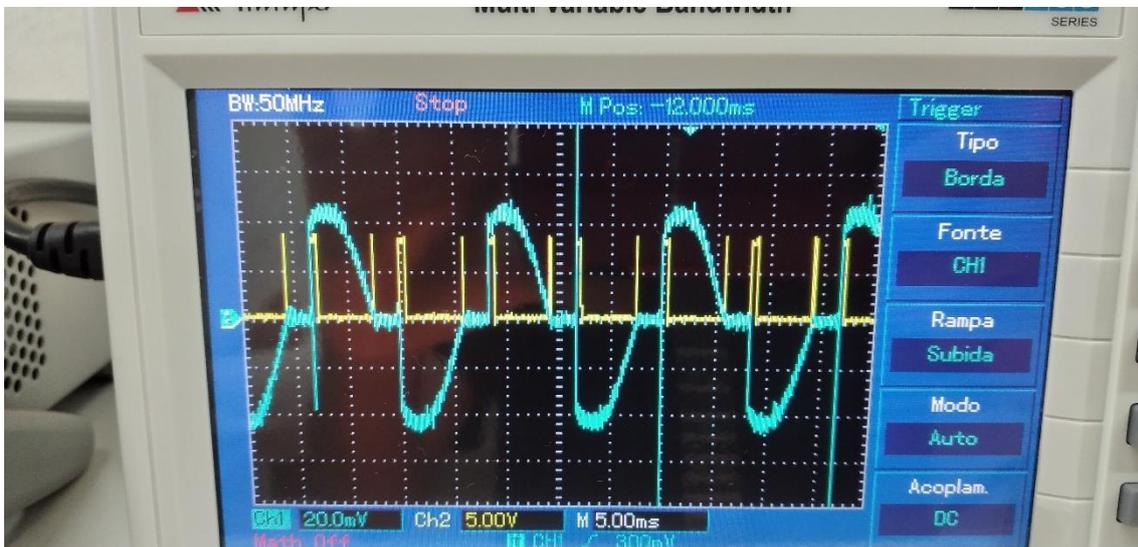
Figura 19. PID implementado no *ladder* do projeto.



4. Resultados

A fim de verificar a eficiência do circuito eletrônico de controle de fase, utilizou-se um osciloscópio, medindo assim a corrente elétrica na carga. Na Figura 20 temos o gráfico da corrente após o controle de fase.

Figura 20. Corrente na Carga.

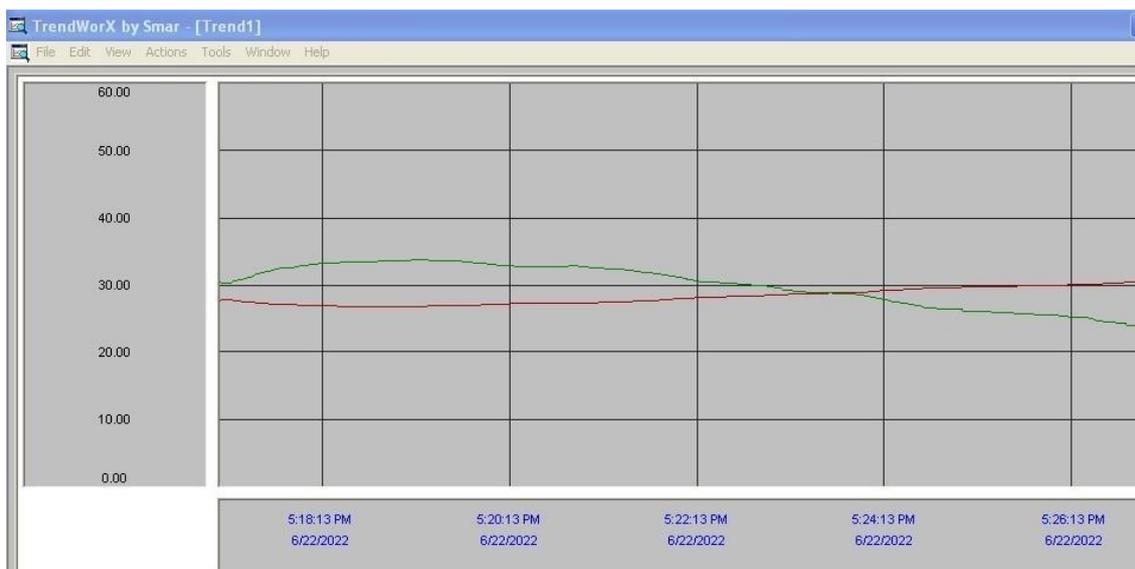


A corrente elétrica representada pela onda azul inicialmente é uma senóide que é a corrente da rede elétrica, mas com o controle de potência aplicado na carga temos a corrente ceifada a cada disparo representado pelos pulsos em amarelo. Os pulsos são as saídas do circuito de potência que aciona o *gate* do TRIAC. Dessa forma a potência entregue a carga varia conforme o TRIAC fecha o circuito entre seus terminais e permite que a energia seja entregue a carga. Uma observação importante; a corrente

elétrica foi medida através de um alicate amperímetro, essa leitura, é observada na onda azul da Figura 20, porém na tela do osciloscópio o parâmetro está como tensão, isso ocorre porque o canal 1 do osciloscópio não foi utilizado, tendo em vista que foi usado o amperímetro, logo, a tensão de 200 mV não está sendo utilizada.

O sistema de medição de temperatura do condensador é constituído pelo sensor NTC-1K conectado ao instrumento TT302 da Smar. Este instrumento comunica utilizando o protocolo de rede *Foundation FieldBus* com o PLC. As informações são enviadas para o controlador em ciclos de 500 ms. Com todo o circuito lógico já configurado, foi possível realizar o controle da temperatura, como será mostrado na Figura 21. O programa utilizado foi o *TrendWorx*, programa integrando para simples supervisão do pacote *ProcessView* disponibilizado pela Smar.

Figura 21. Temperatura do Sistema.



5. Conclusão

Com todos os resultados obtidos nos experimentos e mostrados nesse trabalho, é possível concluir que se obteve sucesso no controle de temperatura do sistema de refrigeração, a variável de processo se estabiliza e é controlada conforme os parâmetros que foram determinados no projeto. Essa aplicação poderia ser utilizada em escala comercial e pode servir como base para outros estudos, que podem coletar os dados do CLP e colocar em um banco de dados, a fim de observar o comportamento da máquina em tempo real e fazer possíveis manutenções futuras.

6. Referências Bibliográficas

Cassiolato, César. Hart sobre o Profibus. Smar Technology Company. Disponível em: <https://www.smar.com/pt/artigo-tecnico/hart-sobre-o-profibus>.

Elias, Glêdson. Lobato, Luiz Carlos. Arquitetura e Protocolos de Rede TCP/IP. Escola Superior de Redes, Rio de Janeiro, 2013.

Arquitetura Foundation Fieldbus. Smar Technology Company, 2022. Disponível em: <https://www.smar.com/pt/fieldbus>.

ALBUQUERQUE, P. U. B., ALEXANDRIA, A. R. Redes Industriais – Aplicações em Sistemas Digitais de Controle Distribuído. Ensino Profissional Editora, 2009.

Stemmer, Marcelo Ricardo. Sistemas Distribuídos e Redes de Computadores para Controle e Automação Industrial. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

Syscon – Configurador de Sistema. Smar Syscon, 2021.

Stoecker, W.F. Saiz Jabardo, J.M. Refrigeração Industrial. Edgard Blucher LTDA, São Paulo, 2002.

Boylestad, Robert L. Nashelsky, Louis. Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos (Monteiro Simon, Rafael). Pearson, São Paulo, 2004.

David E, Johnson. John L, Hilburn. Johnny R, Johnson. Fundamento de Análise de Circuitos Elétricos (Andrade Martins, Onofre. AntonioMoreira de Santis, Marco). Prentice-Hall do Brasil LTDA, Rio de Janeiro, 1994.

Fairchild Semiconductor Corporation. Optoisolators Triac Driver Output, 2005.

Smar. E. I. Manual do Usuário Smar DFI302 - Fieldbus Universal Bridge. Sertãozinho, SP, 2008.

Manual de Instruções dos Blocos Funcionais. Smart First in Fieldbus, 2007.

Natale, Ferdinando. Automação Industrial. (M. L. Gonçalves) Editora Érica LTDA, São Paulo, 1998.

SIEMENS. Phase Control IC TCA 785 Datasheet, 2008.

Texas I., Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/27237/TI/MOC3022.html>, 2022.

IEEE 802.1Q Standard: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.1Q-1998.pdf>.

APÊNDICE A – Especificações Técnicas do CLP

O CLP utilizado neste trabalho foi o DFI302 (*Fieldbus Universal Bridge*) (Smar, 2008). O CLP é montado em *backplane*, conectado a um trilho DIN onde todos os módulos são instalados. O trilho é a base para a fixação dos racks. O modelo de instalação utilizado para o projeto apresentado nesse trabalho, está na Figura 22.

Figura 22. Instalação do DFI302 e sensores.



DF50 - Módulo Fonte de Alimentação para o Backplane: Fonte de alimentação redundante que fornece energia para o CLP, este módulo apresenta duas saídas de tensão, a primeira é responsável por alimentar os circuitos dos módulos e possui 5 Vdc de tensão e 3 A de corrente; a segunda é utilizada para alimentações externas e possui 24 Vdc de tensão e 300 mA, existem três formas de utilizar esse módulo: não redundante com um módulo, não redundante com mais de um módulo e modo redundante, nesse projeto foi utilizado o modo não redundante com módulo único, ou seja, apenas o DF50 é responsável pela alimentação dos circuitos (Smar, 2008).

DF63 - Módulo Controlador: O módulo DF63 armazena uma CPU responsável por gerenciar as informações do CLP, atua como uma *bridge*, permitindo a comunicação entre as redes H1 (*Foundation Fieldbus*) e atua também na comunicação entre as redes H1 e HSE, trabalhando como um *linking device*. Esse módulo também pode operar como um *gateway* Modbus que permite a comunicação do CLP com outros protocolos não usuais no sistema como o *Foundation Fieldbus* (Smar, 2008).

Esse controlador permite controle contínuo feito através da atuação como *bridge* ou *linking device* e possui as seguintes características: gerenciamento de pacotes de

informações no modelo cliente/servidor, gerenciamento de *reports* no modelo Report source/link e publicação de dados no modelo Publisher/subscriber. O controlador também permite o controle discreto feito por lógica *ladder* (Smar, 2008). Abaixo serão listadas as especificações técnicas de cada *rack*.

DF52 - Módulo Fonte de Alimentação para *Fieldbus*: Módulo responsável pela alimentação dos equipamentos da rede *fieldbus*, nesse projeto os equipamentos são: TT302 e FI302.

Possui como parâmetros de entrada, uma faixa de tensão alternada de 90-264 Vac; frequência de 47-63 Hz e uma faixa para tensão contínua de 127-135 Vdc; como saída temos uma tensão de 24 Vdc (Smar, 2008).

DF53 - Módulo de Impedância para o *Fieldbus*: Fornece impedância para a rede *Fieldbus*, esse módulo possui uma impedância de saída que fornece uma impedância de linha puramente resistiva, atendendo ao padrão IEC 1158-2 (Smar, 2008).

DF44 - Módulos de Entradas Analógicas Tensão e Corrente: Módulo com oito entradas analógicas para tensão e corrente, que pode receber os seguintes sinais analógicos: 0-5 V, 1-5 V, 0-10, +10 V, -10 V com resistor interno na posição “V”, ou 0-20 mA, 4-20 mA, com resistor na posição “I” (Smar, 2008).

DF46 - Módulo de Saídas Analógicas Tensão e Corrente: Módulo de quatro saídas analógicas, as saídas de corrente estão na faixa de 0-20 mA ou 4-20 mA; enquanto as faixas de tensão podem estar entre: 0-5 V, 1-5 V, +5 V, -5 V, 0-10 V, 2-10 V, + 10 V e -10 V (Smar, 2008).

DF11 - Módulo de Entrada Discreta: Esse módulo possui oito entradas isoladas de 48 Vdc, este módulo recebe uma tensão de entrada contínua e a transforma em um sinal discreto, atuando em operação ON-OFF. A faixa de tensão para nível lógico 1 (ON) é de 20 a 30 Vdc, para sinal lógico 0 (OFF) é de 0 a 5 Vdc, (Smar, 2008).

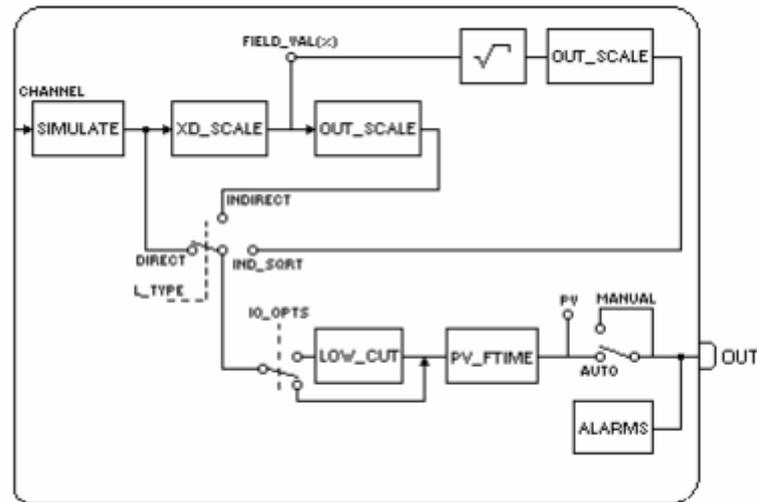
DF28: Módulo de Saída Discreta: Módulo de saída a relé que pode acionar cargas de 20–110 Vdc ou 20–250 Vac (Smar, 2008).

Os blocos funcionais são integrados nos módulos e são parametrizados de acordo com a utilização do CLP. Abaixo segue as especificações técnicas dos blocos utilizados nesse trabalho.

AI - Entrada Analógica: Esse bloco é responsável por ler a temperatura de um transdutor através de um canal configurado e através de sua saída ele disponibiliza essa

leitura para outros blocos funcionais. Na Figura 23, é mostrado um esquema desse bloco.

Figura 23. Esquema do Bloco AO.



Fonte: Smar, 2007.

O parâmetro CHANNEL deve ser configurado de acordo com o bloco transdutor utilizado, que nesse projeto foi o TT302. O XD_SCALE é responsável por configurar a unidade de engenharia do valor lido pelo bloco. O bloco recebe a temperatura através de um sinal do transdutor que pode ser tensão, resistência, entre outros, o XD_SCALE é parametrizado de acordo com a unidade de engenharia utilizado pelo transdutor. O FIELD_VAL é gerado através dessa configuração, associando o sinal ao OUT_SCALE que configura o sinal na unidade de engenharia que será trabalhada no projeto, ou seja, ele recebe o sinal na escala de engenharia do XD_SCALE que pode ser tensão, resistência entre outros e o transforma para a escala real, (Smar, 2007) que nesse projeto foi uma faixa de temperatura em Celsius.

O L_TYPE configura a forma com que os valores do transdutor serão utilizados no bloco. Há duas formas de configuração para esse parâmetro: direta, onde o valor enviado pelo transdutor é utilizado diretamente como variável de processo, ou de forma indireta, na qual o valor da variável é baseado no OUT_SCALE. Os outros parâmetros são utilizados para tratamentos de dados, como o LOW_CUT responsável por eliminar ruídos próximos a zero e o ALARMS que alerta falhas de conexão e outros problemas que podem ocorrer no *hardware* (Smar, 2007).

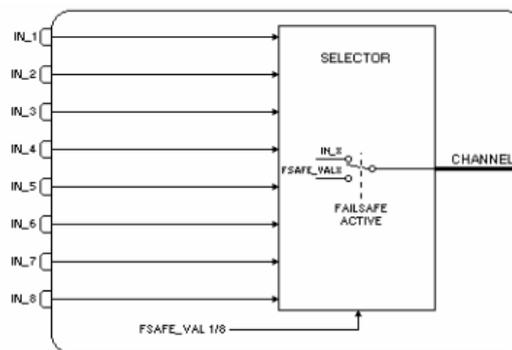
AO - Saída Analógica: Bloco responsável por enviar sinais analógicos para equipamentos de controle, como: válvulas e atuadores. Esse bloco recebe informações

através de sinais de algum outro bloco funcional e o transferi para um transdutor que nesse projeto é o FI302.

Esse bloco possui um parâmetro analógico chamado *set point*, que pode ser controlado de forma automática ou manual por um operador, o *set point* é responsável por fazer incrementos de *span* na saída (Smar, 2007).

MAO - Múltiplas Saídas Analógicas: Este bloco possui oito parâmetros de entrada, é aplicável no sistema I/O, e atua na faixa de 4-20 mA e 1-5 V. Esses sinais analógicos são enviados para um CHANNEL, conforme mostrado na Figura 24.

Figura 24. Esquema do Bloco MAO.



Fonte: Smar, 2007.

Note que as oito entradas analógicas estão conectadas a um bloco seletor. As chaves internas ao bloco selecionam qual entrada irá enviar sinal para o canal parametrizado.

PID – Controle Proporcional, Integrativo e Derivativo: O bloco PID, é utilizado para estratégias de controle, recebendo a variável de processo que no projeto é a temperatura enviada pelo transdutor e um *set point*, e converte em uma porcentagem de erro (PV_SCALE) através dos parâmetros recebidos do bloco AI, os seguintes parâmetros são enviados para o PID:

EU_0: Valor da faixa inferior da unidade de engenharia.

EU_100: Valor da faixa superior de engenharia.

O cálculo do percentual do erro para o *set point* é dado pela equação (2). A porcentagem de erro para variável de processo é calculada pela equação (3).

$$SP(\%) = \frac{(SP - EU_0) \times 100}{EU_{100} - EU_0} \quad (2)$$

$$PV(\%) = \frac{(PV - EU_0) \times 100}{EU_{100} - EU_0} \quad (3)$$

Com estes percentuais o PID ajusta os parâmetros: proporcional, integrativo e derivativo; para aplicar um ganho (Kp) na saída do módulo (Smar, 2007).

TT302 - Transdutor de Temperatura: O TT302 realiza a leitura direta do sensor de temperatura e a envia para o módulo AI. As unidades de engenharia permitidas são: ohm para sensores que medem temperatura através de variação de resistência; volts para sensores de temperatura que oscilam em uma faixa de tensão e para sensores de temperatura direto nas escalas: Celsius (°C), Fahrenheit (°F), Réaumur (°R) e Kelvin (K). O bloco permite a ligação de dois sensores através da ligação dupla a dois fios, cada sensor gera sinais para dois transdutores distintos. A ligação a dois fios possui alguns benefícios como: atuação em modo *backup*, onde, o segundo sensor só é acionado se o primeiro falhar e o modo diferencial, onde a saída é a diferença das leituras de ambos os sensores, (Smar, 2007).

FI302 - Transdutor de Corrente Fieldbus: Esse bloco recebe um valor de corrente através do parâmetro FINAL_VALUE do bloco AO e retorna esse valor ao bloco AO através do parâmetro RETURN. A única grandeza permitida nesse bloco é a corrente que deve estar na faixa de 4-20 mA (Smar, 2007).

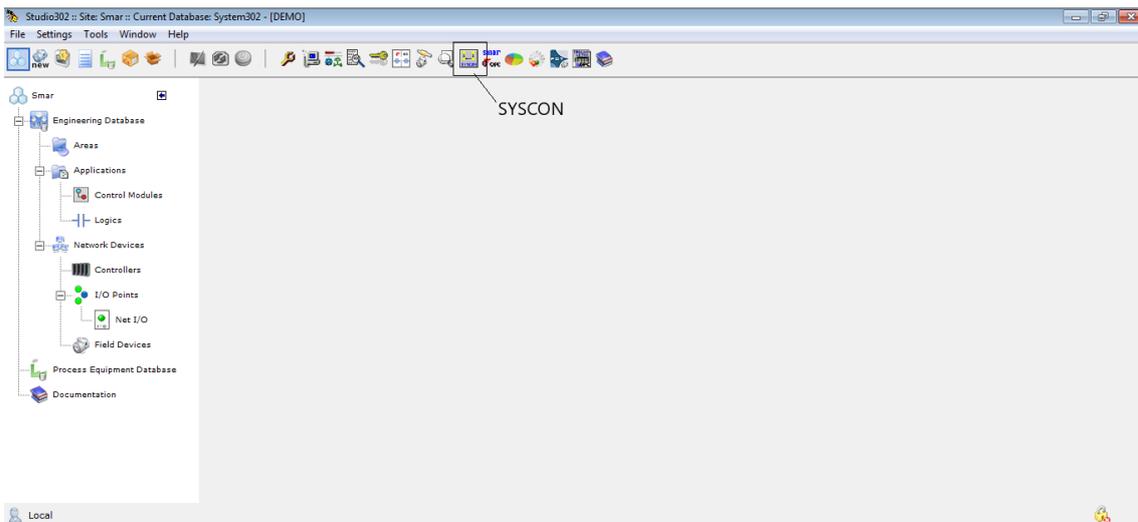
APÊNDICE B – Criação do Projeto no CLP

Através da aplicação System302 é possível: realizar o gerenciamento do CLP, configuração do *hardware*, supervisão da planta, manutenção dos equipamentos, implantação de estratégias de controles, entre outras diversas possibilidades. Esse *software*, possui diversas soluções integradas a ele, como: Studio 302 e o ProcessView64.

A versão do System302 que foi utilizada precisava ser instalada em versões mais antigas do Windows como: Windows 7 ou Windows 2000, como a versão instalada no computador principal era a Windows 10, foi necessário a instalação de uma máquina virtual no computador e nessa VM (*Virtual Machine*) foi instalado o Windows 7, para prosseguir com a instalação do *software* da Smar.

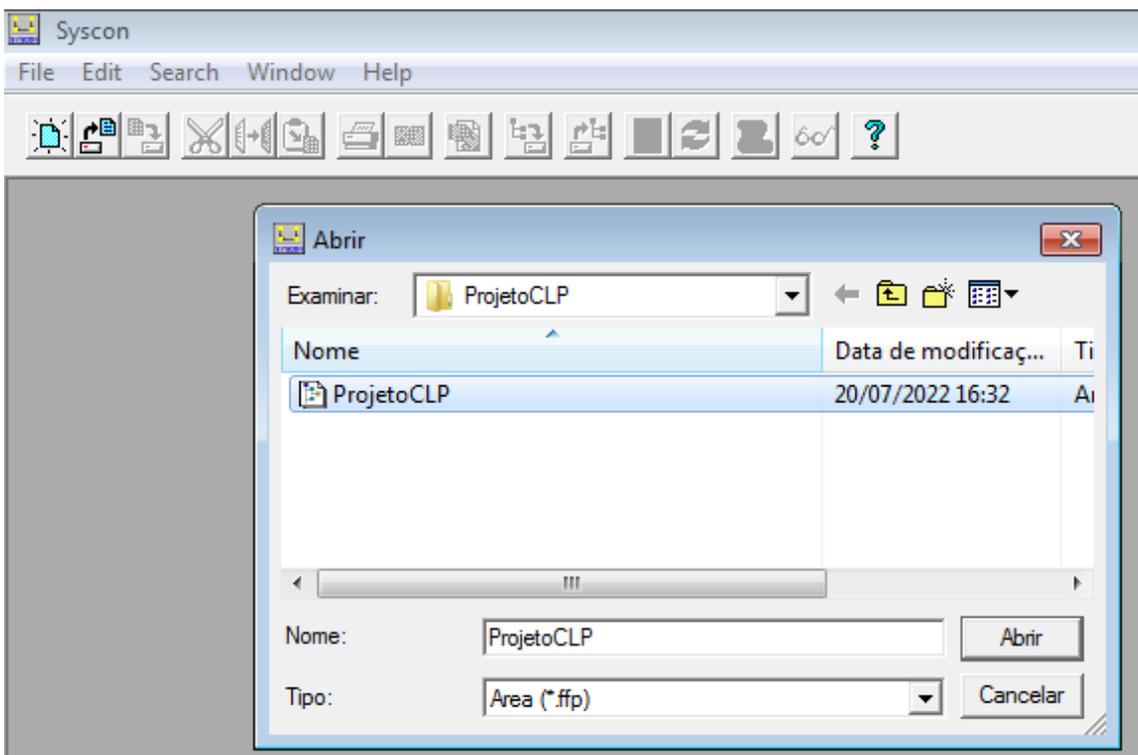
O Studio 302 é uma aplicação integrada ao System302, esse sistema possui diversas funcionalidades, uma delas é a SYSCON, uma ferramenta que permite que um computador se comunique com toda a rede *Fieldbus*, possibilitando a implantação de estratégias de controle, *download* e *upload* de informações para o CLP e os equipamentos da rede H1, monitoramento do sistema, entre outras funcionalidades. A Figura 25 mostra a tela inicial do Studio 302 (Syscon, 2021).

Figura 25. Tela Inicial do Studio 302.



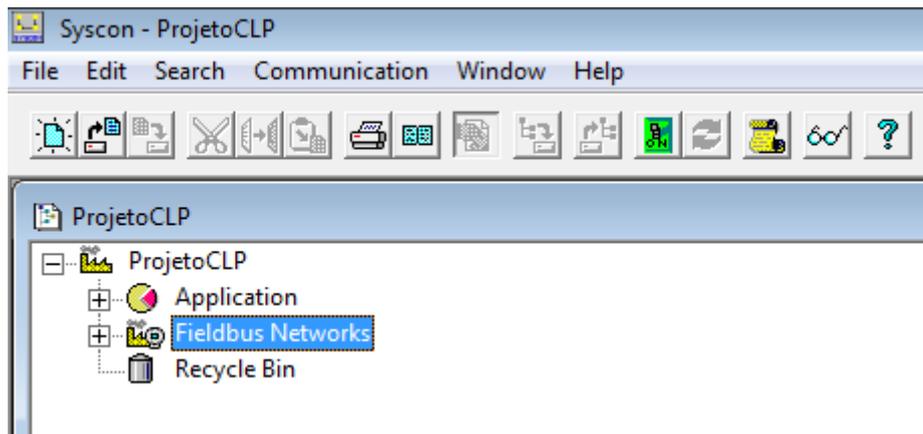
O ícone , denominado de “New”, permite a criação de um novo projeto, que para esse trabalho foi chamado de: ProjetoCLP, como exibi a Figura 26.

Figura 26. Criação do Projeto no SYSCON.



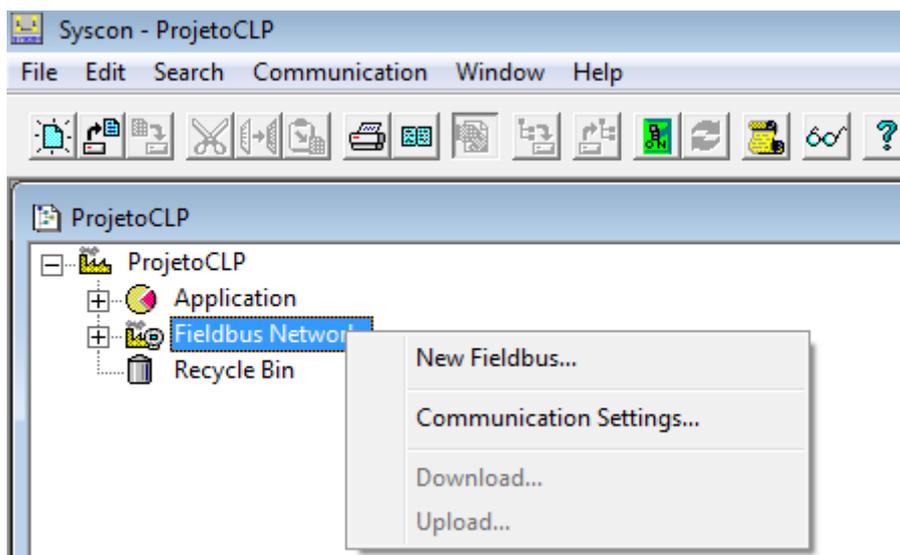
Com o projeto criado pode se fazer a implantação da estratégia de controle e a inserção dos equipamentos da rede H1. A Figura 27, mostra esses ícones já parametrizados no projeto, posteriormente será detalhado como foram feitas as parametrizações de cada módulo.

Figura 27. Parâmetros do Projeto.



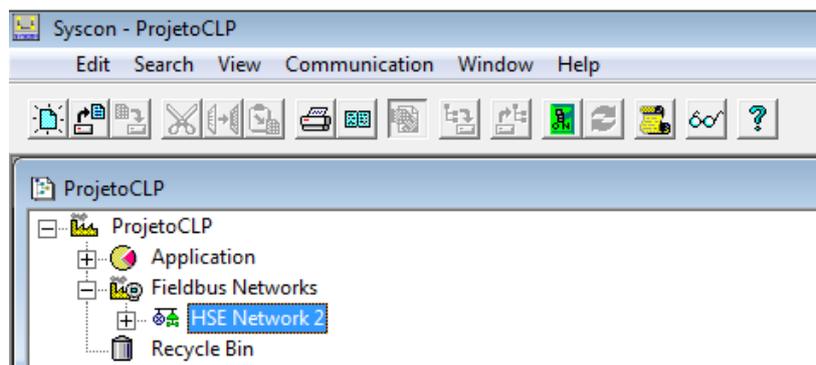
No ícone “Fieldbus Networks”, é possível adicionar os equipamentos que serão utilizados na planta. Com o botão direito no ícone tem-se a opção “New Fieldbus”, como mostra a Figura 28.

Figura 28. Inserção de novos equipamentos no projeto.



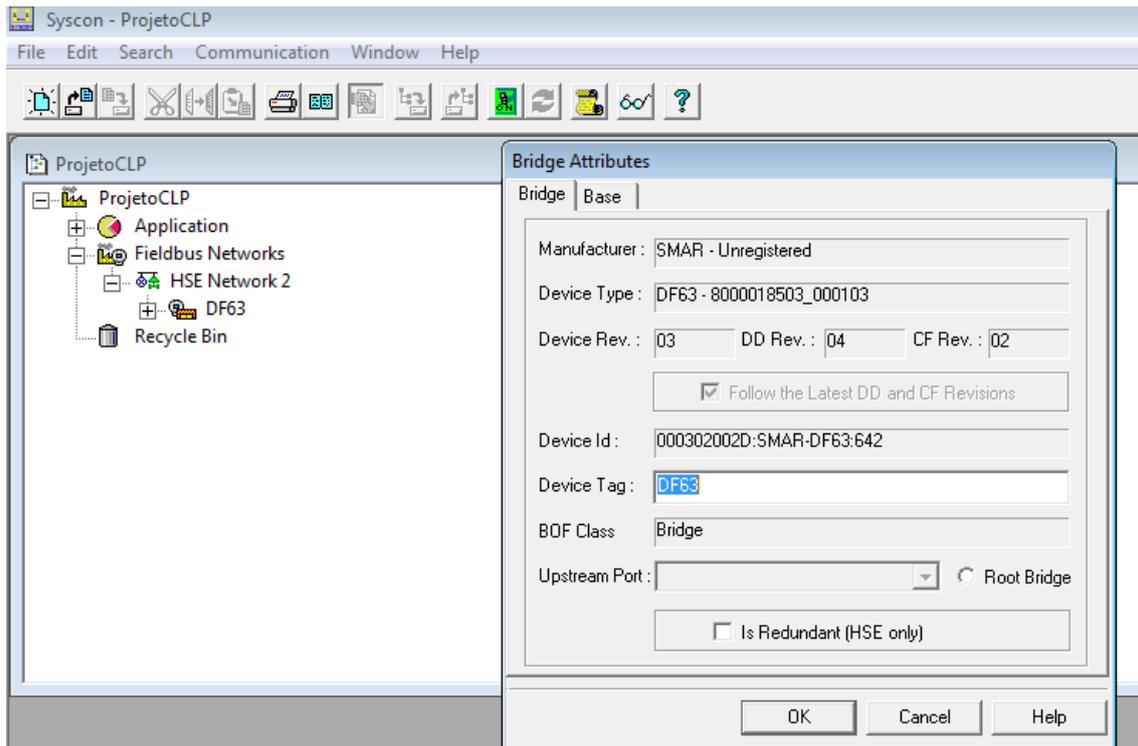
Selecionando essa opção, foi criado um canal de comunicação de alta velocidade chamado de “HSE Network 2”, como mostra a Figura 29.

Figura 29. Criação da rede de alta velocidade.



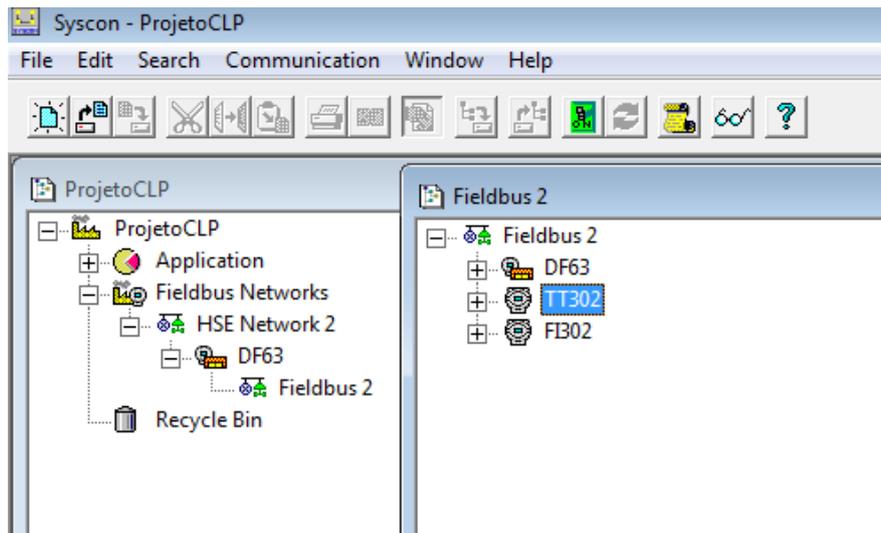
Para adicionar os equipamentos nessa rede, é necessária uma *Bridge* que atua como parte do sistema responsável pela transmissão e processamento de informações entre os equipamentos de campo e o *software*. Nessa aplicação, o DF63, atua como ponte de comunicação. Ao apertar duas vezes o ícone “HSE Network 2”, aparece a opção “New Bridge”, uma nova janela é exibida para as configurações. A Figura 30 exibi as configurações da *Bridge* do projeto.

Figura 30. Atribuições da *Bridge*.



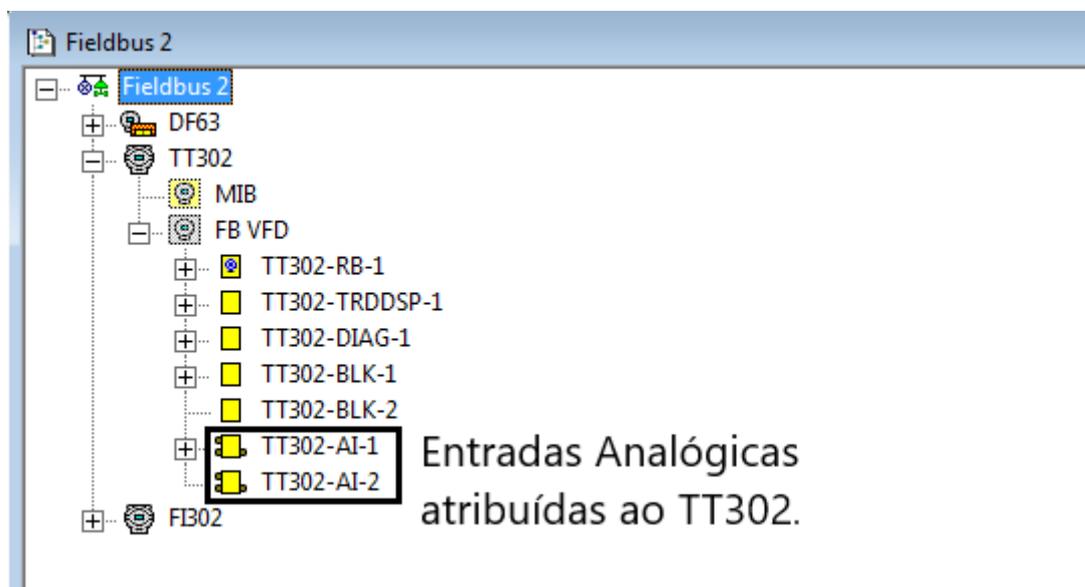
Essa configuração permitiu a inclusão dos equipamentos no projeto. Ao clicar com o botão direito do *mouse* no DF63, tem-se a opção de “New Device”, opção essa que permite adicionar os equipamentos, assim, foi possível adicionar o TT302 e o FI302, que são os dois equipamentos de campo do projeto. A Figura 31 mostra os equipamentos integrados ao *software*.

Figura 31. Equipamentos de campo adicionados no SYSCON.



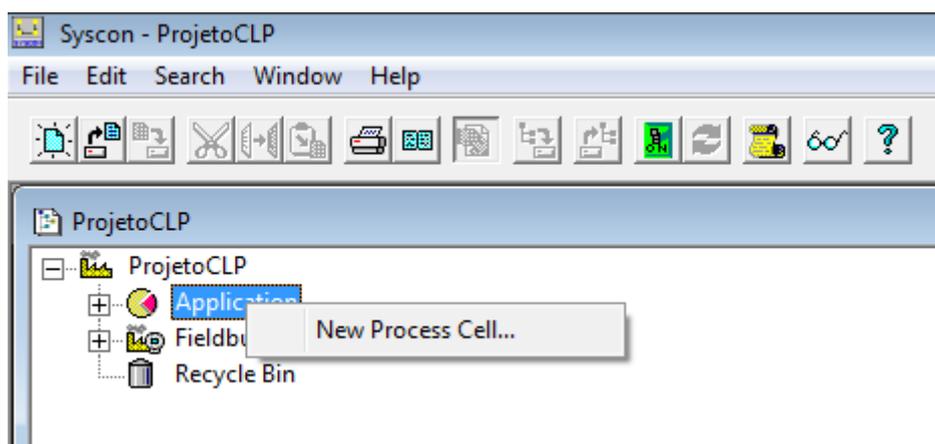
Após todas as configurações feitas até essa etapa, é necessário inserir os “Functions Blocks” (FB), para cada equipamento. O FB permite atribuir saídas e entradas, analógicas e digitais nos equipamentos. Foram inseridas duas entradas analógicas ao TT302, nomeadas de: TT302-AI-1 e TT302-AI-2, como mostra a Figura 32. Foram colocadas duas entradas, porque o bloco transdutor TT302 possui dois sensores de temperatura, cada entrada está associada a um desses sensores.

Figura 32. “Functions Blocks” atribuídos ao TT302.



Com os blocos e suas respectivas funções configuradas, pode ser implantada a estratégia de controle, ao selecionar o ícone “Application” com o botão direito do *mouse* a opção “New Process Cell” é exibida, conforme a Figura 33.

Figura 33. Ícone para criação da área de controle



Ao selecionar essa opção, é possível criar blocos para estratégias de controle do sistema. Nesse trabalho um dos sensores de temperatura mede a temperatura do condensador do sistema de refrigeração, será através dessa medição que o CLP irá atuar, ou seja, a temperatura medida pelo sensor do TT302 precisa ser enviada para a *Bridge*, permitindo a disponibilização do valor da temperatura em tempo real do sistema para todos os outros blocos funcionais do CLP e para o System302 responsável pelo gerenciamento e supervisão dos dados, essa transmissão foi realizada através da criação do bloco “Process Cell 1”, nessa área a saída do TT302 onde se tem o valor da temperatura é conectada a uma das entradas do DF63. A Figura 34 mostra o bloco de controle “Process Cell 1” e a Figura 35 exibe as conexões implantadas.

Figura 34. Bloco de Controle.

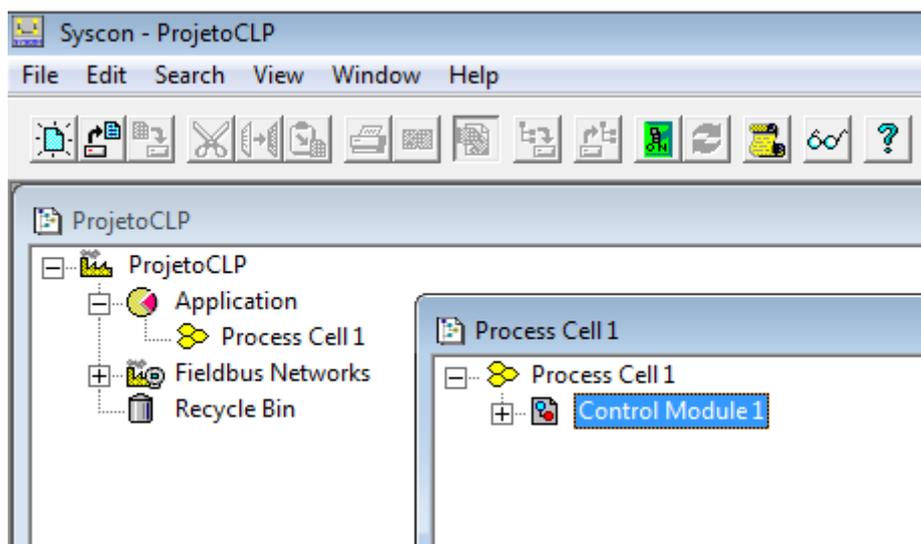
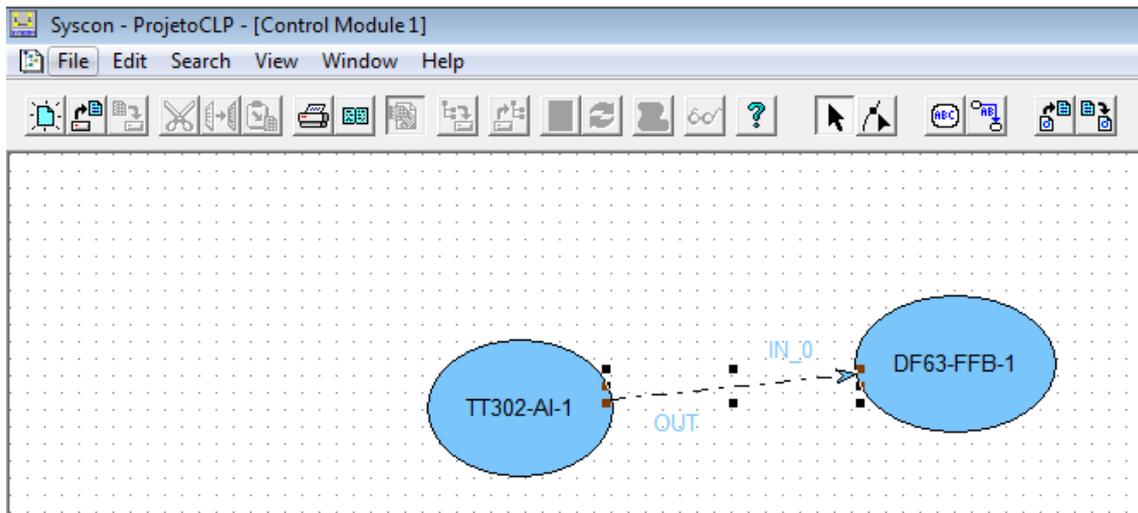


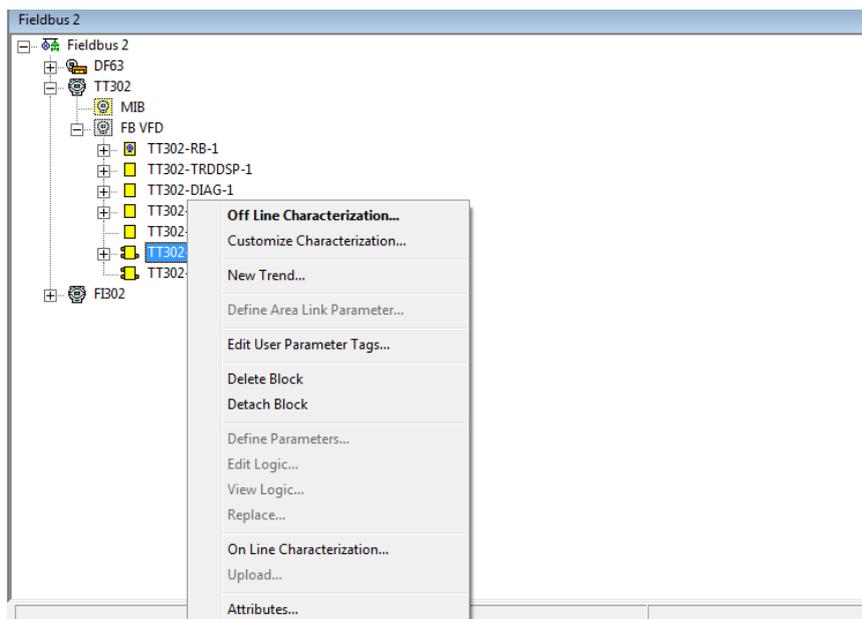
Figura 35. Conexão entre entrada e saída do TT302 e o DF63.



A estratégia de controle não foi feita totalmente nesse módulo, aqui apenas foi conectada a saída do bloco transdutor a *Bridge*, o controle foi feito através do diagrama *ladder*.

O bloco transdutor TT302, recebe sinais de um sensor NTC-1K. O bloco AI, configurado no TT302, recebe esse sinal em sua entrada, porém, esse bloco precisa ser configurado para que os sinais enviados pelos sensores sejam transformados para a escala Celsius, selecionando o FB: TT302-AI-1, com o botão direito do *mouse*, é exibida a opção “Off Line Characterization”, conforme mostra a Figura 36.

Figura 36. Parâmetros do TT302-AI-1.



No “Off Line Characterization”, é necessário colocar alguns parâmetros como: XD_SCALE, OUT_SCALE entre outros; os parâmetros colocados para esse projeto, estão na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do TT302-AI-1.

Parâmetro		Valor
MODE_BLK	TARGET	Auto
XD_SCALE	EU_100	400
	EU_0	0
	UNITS_INDEX	Ohm
OUT_SCALE	EU_100	-100
	EU_0	85

