

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

LUCAS MENDES DE ÁVILA

**IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE SPLIT EM UM
SISTEMA DE RESFRIAMENTO E AQUECIMENTO NA
PLANTA DIDÁTICA 3 DA SMAR**

Viçosa

2018

LUCAS MENDES DE ÁVILA

**IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE SPLIT EM UM SISTEMA
DE RESFRIAMENTO E AQUECIMENTO NA PLANTA
DIDÁTICA 3 DA SMAR**

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 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. André Gomes Torres.


LUCAS MENDES ÁVILA

**IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE SPLIT EM UM SISTEMA DE
RESFRIAMENTO E AQUECIMENTO NA PLANTA DIDÁTICA 3
DA SMAR**

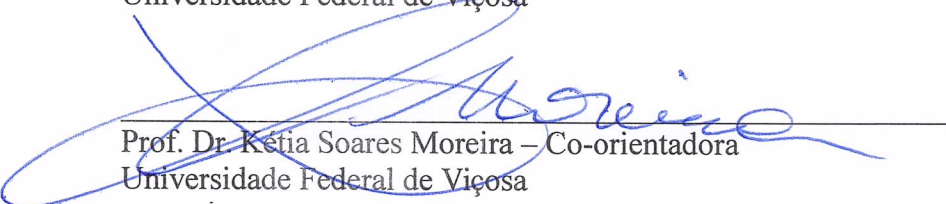
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 06 dezembro de 2018.

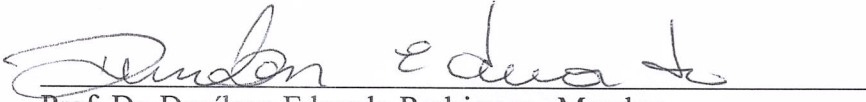
COMISSÃO EXAMINADORA



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



Prof. Dr. Kétia Soares Moreira – Co-orientadora
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. Denílson Eduardo Rodrigues - Membro
Universidade Federal de Viçosa

"Liberdade significa não somente que o indivíduo tenha tanto a oportunidade quanto o fardo da escolha; significa também que ele deve arcar com as consequências de suas ações.

Liberdade e responsabilidade são inseparáveis."

(Friedrich Hayek)

Aos meus pais Edson e Rosângela.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me dar forças, abençoar meu caminho para que fosse possível chegar até aqui e permitir conhecer pessoas especiais em minha vida. Agradeço aos meus pais, que sempre me apoiaram e me orientaram em tudo.

Ao meu orientador, André Gomes Torres, agradeço muito por me orientar, pela escolha do tema e por todo o conhecimento que foi passado. A todos os outros professores do departamento de engenharia elétrica por todos os ensinamentos passados e por sempre estarem à disposição sempre que foi preciso.

Aos companheiros e amigos que fiz durante os projetos da graduação: durante a minha iniciação científica no NERO, as gestões dentro da diElétrica e durante o estágio voluntario no Centro de Conhecimento BioEnergia. Essa experiencias e as pessoas que conheci agregaram muito a minha história e a minha formação profissional.

Por fim, aos meus amigos e tantas pessoas especiais que conheci e que estiveram ao meu lado na UFV. Passar a graduação ao lado deles tornou a experiência e o aprendizado muito mais alegre e gratificante. Assim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

Resumo

Um sistema de controle é uma interconexão de componentes conectados ou relacionados, de maneira a comandar, controlar ou ajustar a si mesmo ou outro sistema. Nos processos industriais é necessário controlar uma, ou mais de uma, variável dentre estas estão temperatura, nível, vazão, pressão e etc.

Nesse contexto temos a Automação industrial que é a aplicação de técnicas, softwares e/ou equipamentos específicos em uma determinada máquina ou processo industrial, com o objetivo de aumentar a sua eficiência, maximizar a produção com o menor consumo de energia e/ou matérias primas.

A SMAR é uma empresa multinacional brasileira que atua fornecendo produtos e serviços no ramo de automação industrial. Ela também fabrica plantas didáticas, com o intuito de levar aos laboratórios de universidades, escolas e cursos técnicos, um ambiente reduzido de uma indústria. A proposta deste trabalho foi fazer um controle SPLIT para controle de temperatura da água em um tanque na planta didática 3 – PD3 da SMAR.

Foi utilizado trabalhos já implementados no departamento para auxílio e foco na implementação do método SPLIT e afim de otimizar esses métodos de controle e comparação de eficiência.

Abstract

A control system is an interconnection of connected or related components in order to command, control or adjust to itself or another system. In industrial processes it is necessary to control one or more of a variables, among them are temperature, level, flow, pressure and etc.

In this context we have Industrial Automation that is the application of specific techniques, software and / or equipment in a given machine or industrial process, with the aim of increasing its efficiency, maximizing production with the lowest consumption of energy and / or raw materials.

SMAR is a Brazilian multinational company that provides products and services in the field of industrial automation. It also manufactures didactic university laboratories, schools and technical courses, an industry. The purpose of this work was to do a SPLIT control for water temperature control in a tank in the SMAR didactic plant 3 - PD3.

It was used works already implemented in the department to assist and focus on the implementation of the SPLIT method and in order to optimize these methods of control and efficiency comparison.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Planta Didática SMAR	10
1.2	Foudation Fieldbus	16
1.3	Bloco Funcionais	18
1.4	Controle PID	20
1.5	Controle utilizando Split Divisor	26
1.6	Objetivo Geral	28
2	METODOLOGIA	29
2.1	Modelagem da Malha de Aquecimento	29
2.2	Modelagem da Malha de Vazão	32
2.3	Projeto de Controle Split Range	33
2.4	Implementação dos Parâmetros no Sistema	34
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4	CONCLUSÕES	44
5	REFERÊNCIAS	45

Lista de Figuras

Figura 1 - Planta didática 3 da Smar	12
Figura 2 - DFI302	14
Figura 3 - LD302	14
Figura 4 - FY302	15
Figura 5 - TT302	15
Figura 6 - FI302	16
Figura 7 - Tecnologia sem fio na rede industrial com Foundation Fieldbus	18
Figura 8 - Exemplo de conexão entre blocos funcionais	20
Figura 9 - Diagrama de Blocos de uma malha de controle PID	22
Figura 10 - Efeito da variação de K_p na saída do controlador	23
Figura 11 - Efeito da inclusão do controlador integral, PI.....	23
Figura 12 - Controladores P e PD respectivamente.....	24
Figura 13 - Esquemático do Bloco funcional PID	25
Figura 14 - Exemplo de conexão do bloco funcional PID	26
Figura 15 - Malha de controle utilizando o SPLIT	27
Figura 16 - Modos de operação SPLIT	27
Figura 17 - Aplicação do SPLIT Range com válvulas	28
Figura 18 - Esquema do tanque de aquecimento.....	30
Figura 19 - Curvas de aquecimento com vazão de 200 l/h	31
Figura 20 - Curvas de aquecimento com vazão de 400 l/h	31
Figura 21 - Curvas de aquecimento com vazão de 600 l/h	31
Figura 22 - Malha de controle da vazão.....	32
Figura 23 - Esquema da malha completa de controle com o bloco funcional SPLIT	33
Figura 24 – Esquema simplificado da montagem e controle da temperatura.....	34
Figura 25 - Esquema do controle SPLIT completo no Syscon.....	34
Figura 26 - Configuração do Bloco da Entrada Analógica do TT302.....	35
Figura 27 - Configuração do Bloco de PID do TT302	36
Figura 28 - Configuração do Bloco de SPLIT do TT302.....	37
Figura 29 - Configuração do Bloco da Saída Analógica do FI302.....	38

Figura 30 - Configuração do Bloco da Entrada Analógica do LD302	39
Figura 31 - Configuração do Bloco de PID do FY302	40
Figura 32 - Configuração do Bloco da Saída Analógica do FY302.	41
Figura 33 - Ensaio de controle com utilização apenas de água para controle de vazão.	42
Figura 34 - Ensaio com utilização de uma agitação com ar comprimido e água para controle da vazão.	43

1 INTRODUÇÃO

Por controle de processos, entende-se atuar sobre um determinado processo, ou sobre as condições a que esteja sujeito, de modo a atingir algum objetivo específico. Este objetivo é manter uma variável do processo em um valor constante na presença de distúrbios ou fazê-la seguir uma determinada função no tempo. [1] Neste contexto, a temperatura é uma das variáveis mais mensuradas na indústria dos mais diversos segmentos de controle de processos e além disso é uma grandeza básica para avaliação de outras variáveis como: vazão e densidade. [2]

Muitos processos apresentam ordens elevadas, não linearidades, múltiplas entradas e saídas, atraso de tempo e restrições de entrada. Ora as particularidades aparecem no acoplamento entre entrada e saída devido a um alto grau de interação, ora no número limitado de medidas disponíveis para o controle [1]. Entretanto, com o aumento gradativo da complexidade dos processos industriais, se torna necessário que os sistemas de controle sejam cada vez mais robustos e dinâmicos. Muitas vezes, o mesmo controlador de temperatura é requerido para resfriar sob algumas condições e aquecer sob outras. Neste contexto, os controladores de processos devem ser projetados para oferecer o máximo desempenho nas mais variadas aplicações [1].

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo controle da temperatura de um tanque por meio da atuação de duas saídas, sendo elas, uma tensão e uma válvula de vazão, das quais temos uma de forma a aumentar o valor da variável e a outra de forma a diminuir a mesma. É importante salientar que, apesar das atuações serem de forma reversa uma da outra, os dois atuadores são diferentes e, conseqüentemente, possuem dinâmicas de atuação diferentes. Dessa forma, é também objetivo deste trabalho o estudo e implementação de cada uma dessas dinâmicas de atuação. Por fim, vale comentar que o trabalho foi desenvolvido utilizando a planta didática PD3 da Smar a qual estava disponível para utilização no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa.

1.1 Planta Didática SMAR

A Planta Didática Smar, para treinamentos e atualizações tecnológicas em malhas de controle para automação de processos industriais, representa de forma simples e objetiva, a operação de diversas malhas de controle que podem ser implementadas em uma planta industrial.

Utilizando os mesmos instrumentos de campo e aplicativos de software para configuração e operação que são desenvolvidos para aplicações em larga escala como pode ser visto na *Figura 1*. A Planta Didática disponibiliza os processos de controle e supervisão em um sistema compacto e ao mesmo tempo fiel à realidade da Automação Industrial. As malhas de controle possuem as mesmas características de campo encontradas por profissionais experientes de instrumentação, ou seja, acesso a mais alta tecnologia disponível no mercado em seu próprio laboratório de ensino [3].

A partir da estrutura física montada, malhas de controle são geradas, alterando-se apenas as configurações dos dispositivos, sem a necessidade de modifica-los mecanicamente. A configuração da planta didática e sua operação são realizadas através de uma *workstation*, que apresenta um computador e um *software* de supervisão.

Os dados recebidos do sistema são apresentados pelo *software* através de interfaces gráficas, mostrando o que está acontecendo na planta em tempo real. O usuário pode modificar os modos operacionais das malhas, alterando os valores internos dos parâmetros, atuando assim nos registros.

O *software* utilizado para supervisão é o *ProcessView*, que permite o monitoramento do sistema em funcionamento, disponibilizando ao usuário meios para criar telas de sinótico de registro gráfico e de tratamento de alarmes. Como a estação de supervisão não está acoplada a planta, a mesma pode ser operada à distância. Para realizar o controle de processo da planta, a SMAR desenvolveu o System302, que integra todos os *softwares* necessários para a realização do controle da planta.

A SMAR possui três modelos de planta didática:

- Planta didática 1: realiza controle de vazão, pressão e nível. Apresenta tecnologia analógica;
- Planta didática 2: realiza controles de vazão e de nível. Apresenta tecnologia *foundation fieldbus*;
- Planta didática 3: realiza controles de temperatura, de vazão e de nível. Apresenta tecnologia *foundation fieldbus*. A mesma pode ser vista na *Figura 1*.



Figura 1 - Planta didática 3 da Smar [3].

Neste trabalho a planta utilizada é a planta didática 3, onde os equipamentos constituintes da PD3 são dotados de tecnologia *foundation fieldbus* para medição de vazão, medição de temperatura e nos posicionadores para atuadores pneumáticos aplicados no acionamento de válvulas de controle. As ferramentas de programação disponibilizadas pelo pacote System302 da PD3 têm a finalidade de configurar, manter e diagnosticar os eventos ocorridos na rede *fieldbus* do sistema. As ferramentas constituintes desse pacote são [4]:

- Syscon: responsável pela configuração, manutenção e operação da rede *fieldbus*. Configura os dispositivos pertencentes da rede no modo *on-line* ou *off-line*;
- LogicView: configura o coprocessador lógico;
- Ole Server: permite a conexão entre *OPC Client* e o *Linking Device*;
- FBTools: ferramenta que realiza os *downloads* de *firmware* nos equipamentos *foundations fieldbus* SMAR;
- FBView: captura, analisa e decodifica as mensagens que trafegam na rede *foundation fieldbus*;
- TagView: monitora e permite a atuação das variáveis *OPC* do sistema *foundation fieldbus*;
- TagMonit: realiza a monitoração das variáveis *OPC*.

O *ProcessView* é um pacote de supervisão para sistemas baseados no System302, atuando como uma interface de visualização do processo. As ferramentas desse pacote são [4]:

- *GraphWorX32*: é uma ferramenta gráfica responsável pela criação de telas de supervisão propriamente ditas;
- *AlarmWorX32*: o gerenciamento de alarmes das malhas montadas é realizado por essa ferramenta;
- *TrendWorX32*: as curvas de tendência, gerenciamento de históricos e coleta de dados são realizados por essa ferramenta.

Em se tratando do *hardware* da planta tem-se o DFI302, que pode ser visto na *Figura 2* como uma ponte universal *fieldbus* que está integrado ao System302. Sendo um componente de *hardware* multifunção, apresenta umas das tecnologias mais avançadas em *hardware* e *software* para gerenciar, monitorar, controlar, manter e operar uma planta industrial. A maior parte de funções requeridas do sistema de controle é executada pelo DFI302 após ser instalado, sendo assim há um número reduzido de componentes adicionais [3].

Como características do DFI302 têm-se [3]:

- Apresenta uma unidade que integra funções de interface, *linking device*, *bridge*, controlador, *gateway*, fonte de alimentação e impedância para a rede *foundation fieldbus* e subsistema de E/S distribuído;
- Por utilizar padrões abertos como o *foundation fieldbus* e *OPC* é interoperável com *devices* e *softwares* de fabricantes diferentes;
- Pode ser conectado a equipamentos pertencentes a planta, conexão que ocorre por E/S convencionais e comunicação *Modbus* via EIA-232 ou *Ethernet*;
- Apresenta capacidade elevada de transferência de dados.



Figura 2 - DFI302 [3].

Os transmissores, posicionadores pneumáticos e conversores pertencentes a PD3 são listados a seguir:

- LD302: é um transmissor de pressão diferencial FF (*Foundation Fieldbus*), absoluta e manométrica, de nível e de vazão. O transmissor possui um sensor capacitivo que proporciona uma operação segura e um excelente desempenho em campo, o mesmo pode ser visto na *Figura 3*; [5]



Figura 3 - LD302 [3].

- FY302: é um posicionador para atuador pneumático FF, sendo aplicado ao acionamento das válvulas de controle de água. Onde é produzida uma pressão requerida na saída de acordo com a entrada recebida pela rede ou por um controle interno, de modo a posicionar a válvula no ponto desejado. O mesmo é mostrado pela *Figura 4*; [6]



Figura 4 - FY302 [3].

- TT302: Ele é um transmissor FF apropriado para medições de temperatura usando termoresistências ou termopares, mas pode também aceitar outros sensores com saídas em resistência ou milivoltagem, tais como pirômetros, células de carga, indicadores de posição, etc. pneumático. O mesmo é mostrado pela *Figura 5*; [08]



Figura 5 - TT302 [3].

- FI302: Ele é um conversor destinado a conectar Sistemas Foundation Fieldbus com atuadores e posicionadores de válvulas de controle 4 - 20 mA. O FI302 produz uma saída de 4 - 20 mA proporcional à entrada recebida pela rede Foundation Fieldbus. O mesmo é mostrado pela *Figura 6*; [7]



Figura 6 - FI302 [3].

Os outros equipamentos inclusos na planta são indicados a seguir:

- Switch industrial;
- Medidor de vazão magnético;
- Rotâmetro para indicação de vazão de água;
- Registros manuais;
- Bombas hidráulicas;
- Atuador pneumático e válvulas de controle;
- Orifício integral;
- Placa de comando e sinalização.

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados o DFI302, o LD302, o TT302, o FI302 e o FY302. Os modos de configuração dos equipamentos são detalhados nos capítulos seguintes.

1.2 Foudation Fieldbus

Foundation Fieldbus (FF) é uma arquitetura aberta para integrar informação, cujo objetivo principal é interconectar equipamentos de controle e automação industrial, distribuindo as funções de controle pela rede e fornecendo informação a todas as camadas do sistema. A tecnologia *Foundation Fieldbus* substitui com vantagens a tradicional tecnologia 4-20mA + HART, possibilitando a comunicação bidirecional entre os equipamentos de forma mais eficiente.

Esta tecnologia vai muito além de um protocolo digital ou uma rede local para instrumentos de campo. Ela engloba diversas tecnologias, tais como processamento distribuído, diagnóstico avançado e redundância. Um sistema Foundation Fieldbus é heterogêneo e distribuído, composto por equipamentos de campo, *softwares* de configuração e supervisão, interfaces de comunicação, fontes de alimentação e pela própria rede física que os interconecta [4].

As redes FF consistem em duas partes principais: Ethernet de alta velocidade (HSE) em que os módulos principais de processamento e controle são conectados e parte da rede industrial, denominada H1 e com baixa velocidade, nas quais os elementos de campo são conectados. Tais redes estão todos ligados de uma forma que permite a troca de dispositivos H1, transferir e receber informações dos dispositivos de controle (Estações de trabalho na sala de controle).

Uma das funções dos equipamentos de campo é executar a aplicação de controle e supervisão do usuário que foi distribuída pela rede. Essa é a grande diferença entre Foundation Fieldbus e outras tecnologias, que dependem de um controlador central para executar os algoritmos. Comparado a outros sistemas, Foundation Fieldbus permite acesso a muitas variáveis, não só relativas ao processo, mas também ao diagnóstico dos sensores e atuadores, dos componentes eletrônicos, degradação de performance, entre outras. Além disso, há outras características marcantes:

- Segurança intrínseca para uso em áreas perigosas, com alimentação e comunicação pelo mesmo par de fios;
- Topologia em barramento ou em árvore, com suporte a múltiplos mestres no barramento de comunicação;
- Comportamento previsível (determinístico), mesmo com redundância em vários níveis;
- Distribuição das funções de controle entre os equipamentos (controle distribuído);
- Interfaces padronizadas entre os equipamentos, o que facilita a interoperabilidade;
- Modelamento de aplicações usando linguagem de blocos funcionais. [04]

Com o avanço da tecnologia já está sendo estudado novas técnicas para o clássico padrão Foundation Fieldbus utilizando, porém, uma rede sem fio por meio do padrão IEEE802.11n como

pode ser conferido no trabalho de Osama Al-Aqel (2013) [09]. Nesse trabalho ele mantém o padrão Fieldbus dentro cada segmento na rede H1 e aplica a tecnologia sem fio na fronteira de cada segmento, como mostrado na *Figura 7*. Desta forma, os segmentos serão interconectados com tecnologias sem fio, bem como manter a Fundação Padrão Fieldbus dentro desses segmentos.

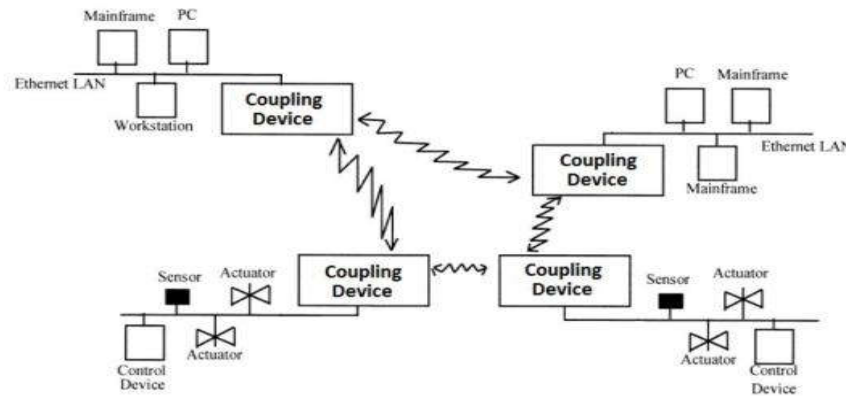


Figura 7 - Tecnologia sem fio na rede industrial com Foundation Fieldbus [09].

1.3 Bloco Funcionais

Os Blocos Funcionais representam as funções de automação básicas, que são executadas em cada equipamento de controle e automação, como por exemplo um sensor ou um atuador. Cada bloco funcional processa parâmetros de entrada, de acordo com um algoritmo específico e um conjunto interno de parâmetros de controle. Eles produzem parâmetros de saída, que estão disponíveis para uso dentro da mesma aplicação de bloco funcional, ou em outras aplicações de bloco funcional.

Os Blocos Funcionais são definidos por suas entradas, saídas, parâmetros de controle e por algoritmos que operam com estes parâmetros. Blocos Funcionais são identificados usando um nome (Tag) e um índice numérico. Os Tags fornecem uma referência simbólica aos blocos funcionais. Eles não podem ser ambíguos dentro do âmbito de um sistema Fieldbus. Os índices numéricos são números designados para otimizar o acesso aos blocos funcionais. Os tags dos blocos funcionais são o oposto, pois são globais, índices numéricos têm somente um significado dentro da aplicação que contém o bloco funcional.

As saídas do Bloco Funcional podem ser ligadas às entradas de outros blocos funcionais. Cada ligação indica que um parâmetro de entrada de um bloco funcional obtém seu valor de um parâmetro específico de saída de outro, como pode ser observado na *Figura 8 - Exemplo de conexão entre blocos funcionais* Figura 8. Enquanto blocos funcionais “puxam” seus valores de blocos anteriores, no qual o bloco controla o “puxar”, há uma dependência das características das comunicações subjacentes. Dois blocos funcionais ligados juntos podem existir na mesma aplicação de blocos funcionais, ou em aplicações separadas, igualmente, no mesmo dispositivo ou em dispositivos diferentes [10].

Dentre os diversos blocos funcionais disponíveis no sistema da planta didática da Smar, os seguintes serão utilizados:

- AI: Entrada Analógica – Este bloco obtém a entrada de dados analógica de um sinal de entrada analógico e torna-o disponível para outros blocos funcionais.
- PID: Controle PID – Este bloco padrão faz o controle PID de uma malha de controle por meio da definição de parâmetros e será explicado na próxima seção.
- SPLT Divisor – Este bloco é usado em duas aplicações típicas: divisor de faixa e sequenciamento. Recebe a saída do bloco PID, que é processado de acordo com o algoritmo selecionado e, então, gera os valores para duas saídas analógicas de blocos. Será detalhado mais adiante.
- AO: Saída Analógica – O bloco AO fornece um valor analógico para gerar um sinal de saída analógico. Fornece valor e limite de razão, conversão de escala, mecanismo de estado de falha e outras características
- LD302: Transdutor De Pressão – Este é o bloco transdutor para o LD302 – um transmissor de pressão
- TT302: Transdutor De Temperatura – Este é o bloco transdutor para TT302 – um transmissor de temperatura
- FY302: Transdutor Posicionador Fieldbus – Este é o bloco transdutor para o FY302 – um Posicionador Fieldbus.
- FI302: Transdutor De Corrente Fieldbus – Este é o bloco transdutor para o IF302 – um Conversor Fieldbus para Corrente.

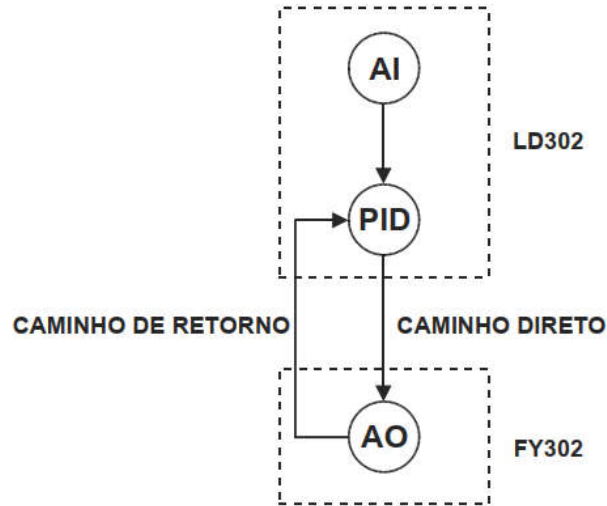


Figura 8 - Exemplo de conexão entre blocos funcionais

1.4 Controle PID

Controladores do tipo proporcional, integral e derivativo, comumente chamados de controladores PID podem ser entendidos como sistemas de controle baseados em resposta a uma equação matemática. Esses tipos de controladores são os mais populares algoritmos de controle feedback usados na indústria. Sendo utilizados em mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente, empregando configurações do controle PID ou PID modificado para controle de variáveis como pressão, vazão, etc [11].

O funcionamento desses controladores se baseia no cálculo inicial do erro entre a variável controlada (medida no processo) e seu valor desejado (*set point*). O algoritmo PID usa o erro em três módulos distintos (proporcional, integral e derivativo) para produzir o sinal de saída de forma a estabilizar e manter estável o sistema da melhor forma possível como pode ser observado na *Figura 9*. Em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido e, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, controles PID se mostram os mais úteis [11].

Para elucidar melhor o estudo, algumas definições de siglas e termos utilizados neste trabalho são explicitados na *Tabela 1*. Em muitas aplicações industriais não se faz necessária à utilização das ações destes três módulos.

Assim, é bastante comum encontrar os seguintes tipos de controladores:

- Controlador Proporcional (P);
- Controlador Proporcional e Integral (PI);
- Controlador Proporcional e Derivativo (PD);
- Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID);

Tabela 1 - Siglas e termos utilizados neste trabalho

Siglas	Definições
PV	Process Variable ou variável de processo: Variável que é controlada no processo, como temperatura, pressão, umidade, etc.
SV OU SP	Setpoint: Valor desejado para a variável de processo.
MV	Variável Manipulada: Variável sobre a qual o controlador atua para controlar o processo, como posição de uma válvula, tensão aplicada a uma resistência de aquecimento, etc.
Erro ou Desvio	Diferença entre SV e PV: SV-PV para ação reversa e PV-SV para ação direta.
Ação de Controle	Pode ser reversa ou direta. Define genericamente a atuação aplicada à MV na ocorrência de variações da PV.
Ação Reversa	Se PV aumenta, MV diminui. Tipicamente utilizada em controles de aquecimento.
Ação Direta	Se PV aumenta, MV aumenta. Tipicamente utilizada em controles de refrigeração.

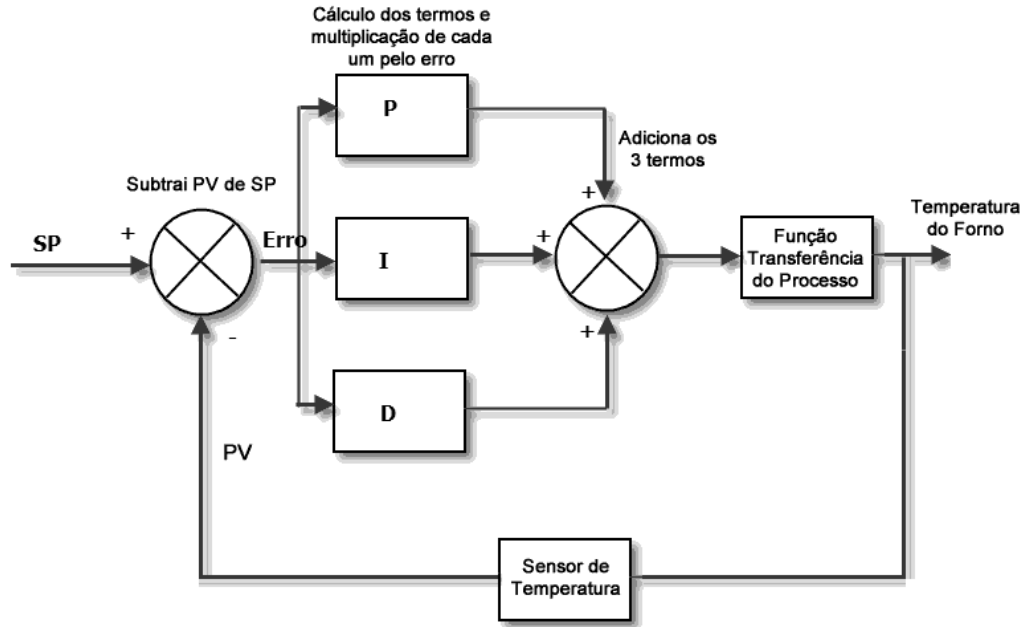


Figura 9 - Diagrama de Blocos de uma malha de controle PID [12].

1.4.1 Controle Proporcional – P

No modo Proporcional, o controlador simplesmente multiplica o Erro pelo Ganho Proporcional (K_p) para obter a saída do controlador. A ação de controle pode ser vista na *Figura 10*. O valor de desvio que provoca $MV=100\%$ define a Banda Proporcional (P_b). Com P_b alta, a saída MV só irá assumir um valor alto para corrigir o processo se o desvio for alto. Com P_b baixa, a saída MV assume valores altos de correção para o processo mesmo para pequenos desvios. Em resumo, quanto menor o valor de P_b , mais forte é a ação proporcional de controle.

Em (10.A), com a banda proporcional grande, o processo estabiliza, porém muito abaixo do *setpoint*. Com a diminuição da banda proporcional (10.B), a estabilização ocorre mais próximo do *setpoint*, mas uma redução excessiva de P_b (10.C) pode levar o processo à instabilidade. O ajuste da banda proporcional (P_b) faz parte do processo chamado de sintonia do controle. Quando a condição desejada ($PV=SV$) é atingida, o termo proporcional resulta em $MV=0$, ou seja, nenhuma energia é entregue ao processo, o que faz com que volte a surgir desvio. Por causa disto, um controle proporcional puro nunca consegue estabilizar com $PV=SV$ [13].

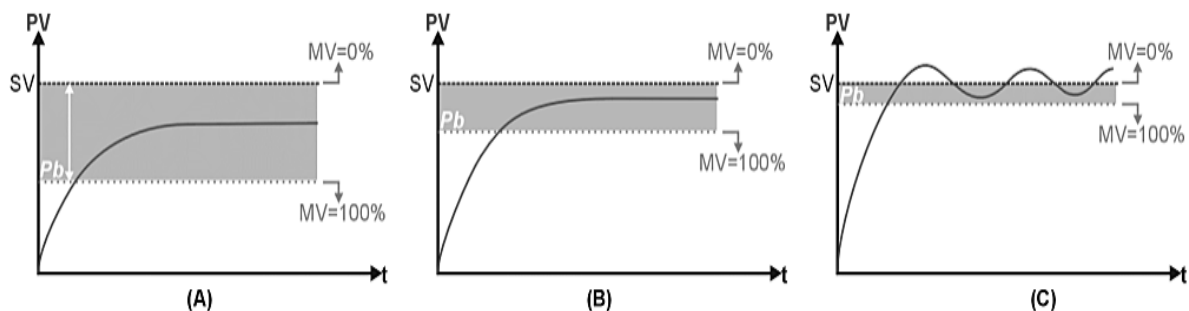


Figura 10 - Efeito da variação de K_p na saída do controlador [13]

1.4.2 Incluindo o Controle Integral – PI

O controle integral não é, isoladamente, uma técnica de controle, pois não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. A ação integral consiste em uma resposta na saída do controlador que é proporcional à amplitude e duração do desvio. A ação integral tem o efeito de eliminar o desvio característico de um controle puramente proporcional. Para entender melhor, seu efeito está demonstrado na *Figura 11*:

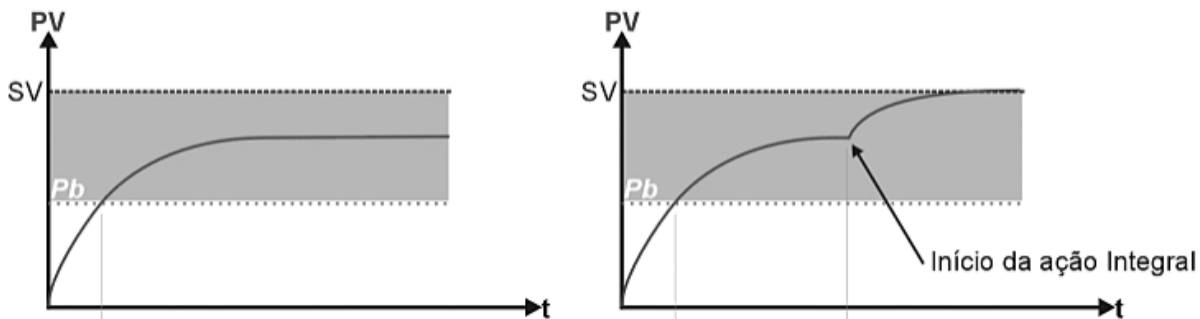


Figura 11 - Efeito da inclusão do controlador integral, PI. [13]

A ação integral tem como único objetivo eliminar o erro em regime permanente, e a adoção de um tempo integral excessivamente atuante pode levar o processo à instabilidade. A adoção de um tempo integral pouco atuante retarda em demasia a estabilização. [13]

1.4.3 Incluindo o Controle Derivativo – PD

O controle derivativo não é, isoladamente, uma técnica de controle, pois não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. A ação derivativa consiste em uma resposta na saída do controlador que é proporcional à velocidade de variação do desvio. A ação derivativa tem o efeito de reduzir a velocidade das variações de PV, evitando que se eleve ou reduza muito rapidamente.

O derivativo só atua quando há variação no erro. Se o processo está estável, seu efeito é nulo. Durante perturbações ou na partida do processo, quando o erro está variando, o derivativo sempre atua no sentido de atenuar as variações, sendo, portanto, sua principal função melhorar o desempenho do processo durante os transitórios. A *Figura 12* compara um controlador P e um PD:

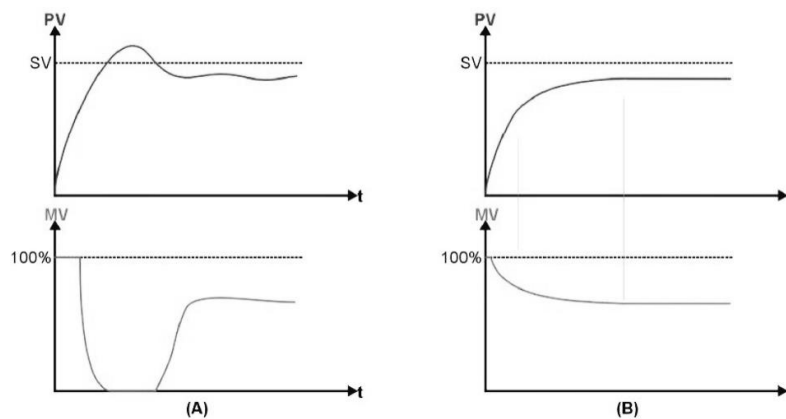


Figura 12 - Controladores P e PD respectivamente. [13]

No controle P, Figura 12.A, se a banda proporcional é pequena, é bem provável que ocorra *overshoot*, onde PV ultrapassa SV antes de estabilizar. Isto ocorre pelo longo tempo em que MV esteve no seu valor máximo e por ter sua redução iniciada já muito próxima de SV, quando já é tarde para impedir o *overshoot*. Uma solução seria aumentar a banda proporcional, mas isto aumentaria o erro em regime permanente. Outra solução é incluir o controle derivativo, Figura 12.B, que reduz o valor de MV se PV está crescendo muito rápido. Ao antecipar a variação de PV, a ação derivativa reduz ou elimina o *overshoot* e as oscilações no período transitório de processo [13].

1.4.4 Incluindo os Controles Integral e Derivativo – PID

Ao unir as 3 técnicas consegue-se obter o controle básico P com a eliminação do erro do I e com a redução de oscilações do D, mas cria-se a dificuldade de ajustar a intensidade de cada um dos termos, processo esse chamado de sintonia do PID.

1.4.5 Bloco Funcional PID da Smar

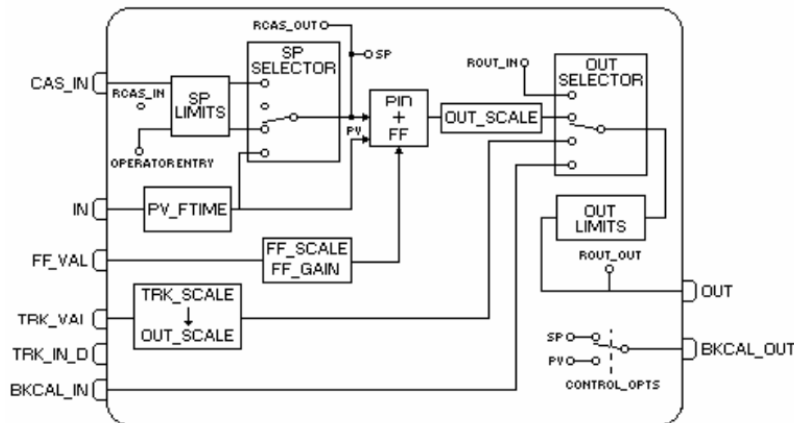


Figura 13 - Esquemático do Bloco funcional PID [10].

Para aplicação do controle PID na planta da Smar é necessário configurar o bloco funcional PID, cujo esquemático pode ser conferido na *Figura 13*, correspondente e aplicar parâmetros calculados ou dimensionados como por exemplo ganho e tempo de resposta. Esse bloco estará conectado aos demais blocos de entrada (recebendo informações), saída (enviando informações) ou outros blocos de controle realizando assim o controle da malha. Na *Tabela 2* é descrito as conexões do bloco PID. [10]

Tabela 2 - Descrição das conexões do bloco PID

Conexão	Função
IN	Entrada de informações no bloco que recebe valores do bloco AI
OUT	Saída de informações do bloco que envia valores a um outro bloco
BKCAL_IN	Entrada de informações em forma de retorno da malha de controle (feedback) que pode receber informações do bloco AO ou de outro bloco de controle

BKCAL_OUT	Saída de informações destinada ao retorno de uma malha de controle de outro bloco funcional
CAS_IN	Entrada do bloco funcional para conexões em cascata com outros blocos

Na *Figura 14* é possível visualizar um exemplo de conexão do bloco PID com os demais blocos de função assim como os parâmetros definidos.

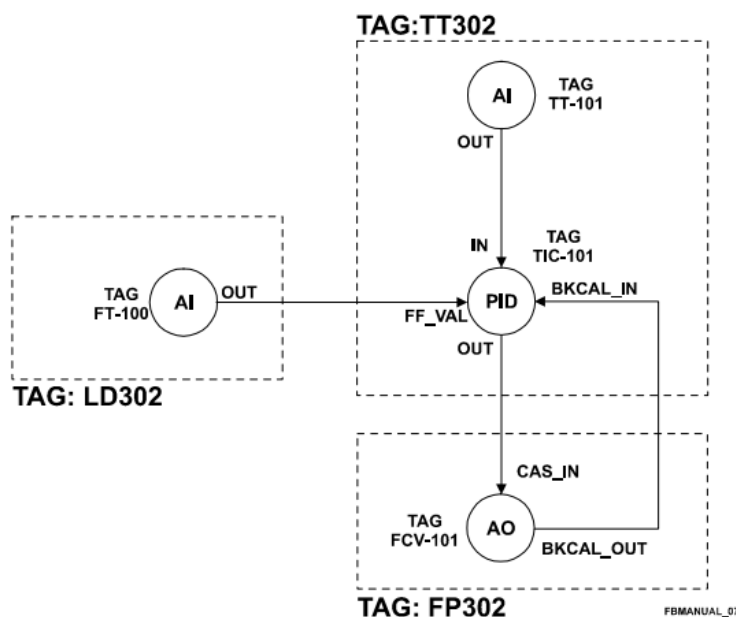


Figura 14 - Exemplo de conexão do bloco funcional PID [10].

1.5 Controle utilizando Split Divisor

Como mencionado, é possível gerar e configurar várias estratégias de controle na planta didática por meio da configuração dos parâmetros do software de supervisão. Para trabalhar na planta didática 3 é necessário utilizar os *softwares* da SMAR, dentre eles o System302, na qual usa-se o Syscon para configurar todos os blocos funcionais. [10]

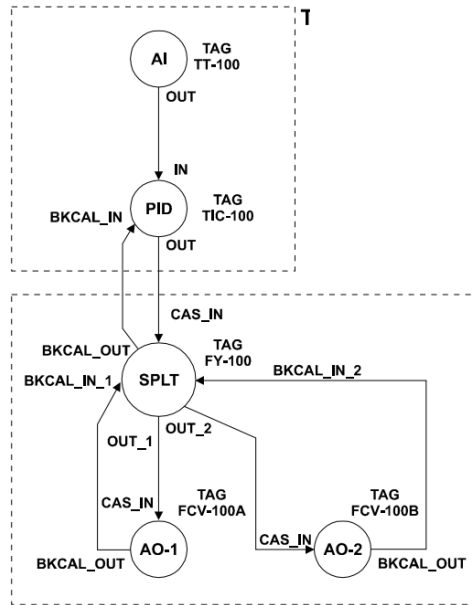


Figura 15 - Malha de controle utilizando o SPLIT [10]

Dentro os diversos blocos funcionais, temos o *SPLIT* (ou bloco Divisor). O controle por faixa dividida, também chamado de *SPLIT Range*, é aplicado em situações duais. Quando existe apenas uma variável medida e mais de um elemento final de controle. Basicamente o controlador passa a manipular um elemento ou outro a depender da situação. Ele tem a capacidade para guiar múltiplas saídas de uma única entrada, normalmente um PID. A aplicação deste bloco é normalmente, como divisor de faixa ou sequenciador em aplicações de múltiplas válvulas. Se este bloco estiver após o bloco PID e fizer parte do controle da aplicação, suportará cálculo de retorno como pode ser visto na *Figura 15*. [10] Uma representação gráfica de divisores versus Saída de controladores é mostrada *Figura 16*. São mostradas duas aplicações: como um divisor de faixa e uma aplicação de sequenciamento.

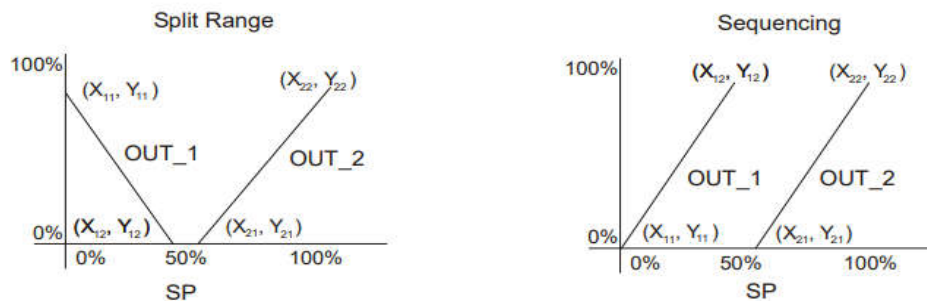


Figura 16 - Modos de operação SPLIT [10]

Em um exemplo de aplicação com válvulas, a aplicação de sequenciamento teria um controlador que ajusta a abertura de uma das válvulas quando sua saída está na faixa de 0 a 50% e a outra válvula quando sua saída está na faixa de 50% a 100%. Dessa forma a atuação das válvulas é de forma complementar e sequencial de acordo com o valor da saída do PID. Já no divisor de faixa, a atuação das saídas do SPLIT é de forma reversa devido à mudança no declive da função com acréscimo ou decréscimo na saída do PID como pode ser visto na figura *Figura 17* em que dependendo do valor da saída do PID a ação do controle SPLIT tenderá a admitir ou retirar o gás dentro do tanque controlado. Dessa forma, o controle SPLIT se torna uma ferramenta muito útil para controle considerando que os processos industriais exigem dinâmicas cada vez mais complexas. Nesse trabalho será utilizado o conceito do controle SPLIT Range como será demonstrado mais adiante.

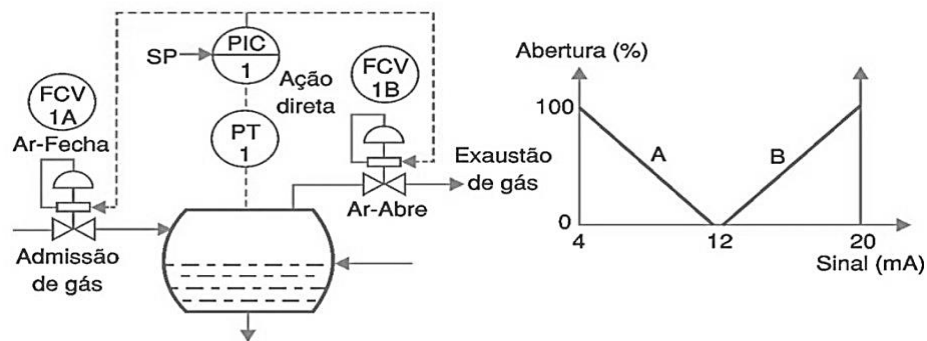


Figura 17 - Aplicação do SPLIT Range com válvulas

1.6 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo implementar o SPLIT Range no processo do controle de temperatura de um tanque de água utilizando, como saídas de controle, uma resistência (aquecimento) e um controle de vazão (resfriamento) na planta didática 3 da SMAR.

Dado o objetivo geral, têm-se como objetivos específicos:

- Utilizar um controlador PI baseado na função de transferência da malha de vazão;
- Utilizar um controlador PI baseado na função de transferência da malha de aquecimento por resistência;
- Projetar um controlador SPLIT baseado nas duas funções de transferência citadas;
- Implementar o controlador, em software especializado, na planta didática 3 da SMAR.

2 METODOLOGIA

Para que possa ser realizado o controle por meio do método SPLIT é necessário obter as duas malhas de controle responsáveis pelos processos de aquecimento e resfriamento. Como o foco deste trabalho é implementar o método SPLIT, o qual irá unir e coordenar os dois processos para controle da variável temperatura, as malhas de controle necessárias serão utilizadas a partir de trabalhos anteriores feitos no Departamento de Engenharia Elétrica da UFV, como citação dos trabalhos. Na *Seção 2.3* pode se observar o esquema completo de controle.

2.1 Modelagem da Malha de Aquecimento

A malha de controle de aquecimento foi implementada a partir do trabalho de Camila Morais (2017) [14] no qual foi obtido a função de transferência $G_P(s)$ que relaciona a temperatura $T(s)$ de saída com a potência $P(s)$ de entrada em um tanque de aquecimento, como pode ser visto na *Figura 18*, a qual mostra um esquema montado a partir do trabalho de Camila. Assim, foi comparado como se comportava a curva de temperatura para entradas de 2KW, 4KW e 8KW. A vazão foi mantida constante, mas para essa variável também foram testados alguns valores para análise de comportamento com pode ser observado nas *Figura 21*. No presente trabalho deseja-se utilizar uma margem de controle de temperatura de aproximadamente 10° C e de acordo com o trabalho mencionado optou-se pelos valores de acordo com a *Tabela 3*. Dessa forma, como pode ser visto na *Tabela 3*, foi utilizado os valores de ganhos proporcional e integral da malha de controle assim como também foi escolhido a faixa da abertura da válvula e a faixa de potência aplicada ao sistema. Essa escolha de faixas de atuação se baseou no princípio de igualdade de atuação, ou seja, para uma dada faixa de potência para aquecimento seria escolhido uma faixa de atuação de resfriamento com a mesma capacidade. Assim para uma potência de 0 a 8kW nota-se que uma boa faixa de abertura de válvula é a qual permite uma vazão variando de 0 a 400l/h.

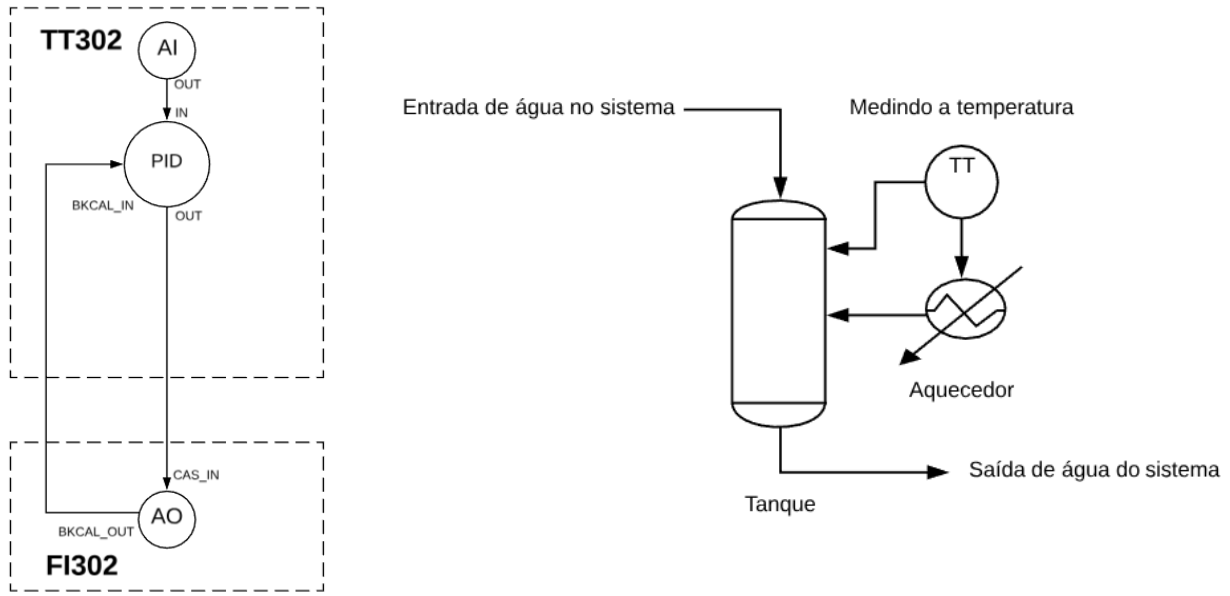


Figura 18 - Esquema do tanque de aquecimento.

Tabela 3 - Parâmetros de Controle adotado para o aquecimento

Parâmetro de Controle	Valor adotado
Ganho Proporcional da malha de aquecimento (K_p)	30
Ganho Integral da malha de aquecimento (K_i)	50
Faixa de controle de temperatura	10°C em torno do Set Point
Faixa de controle da vazão	0 a 400 l/h
Faixa de controle de Potência elétrica	0 a 8000 W

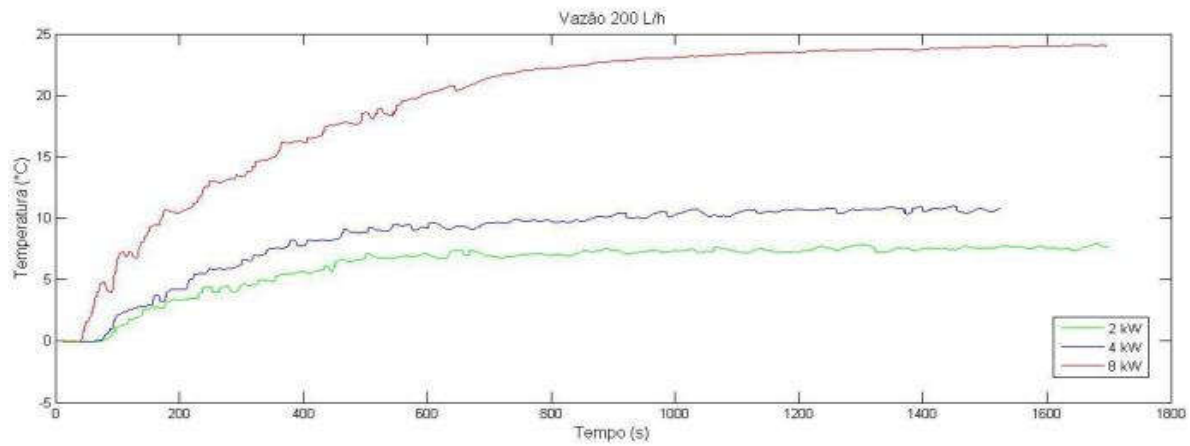


Figura 19 - Curvas de aquecimento com vazão de 200 l/h [14]

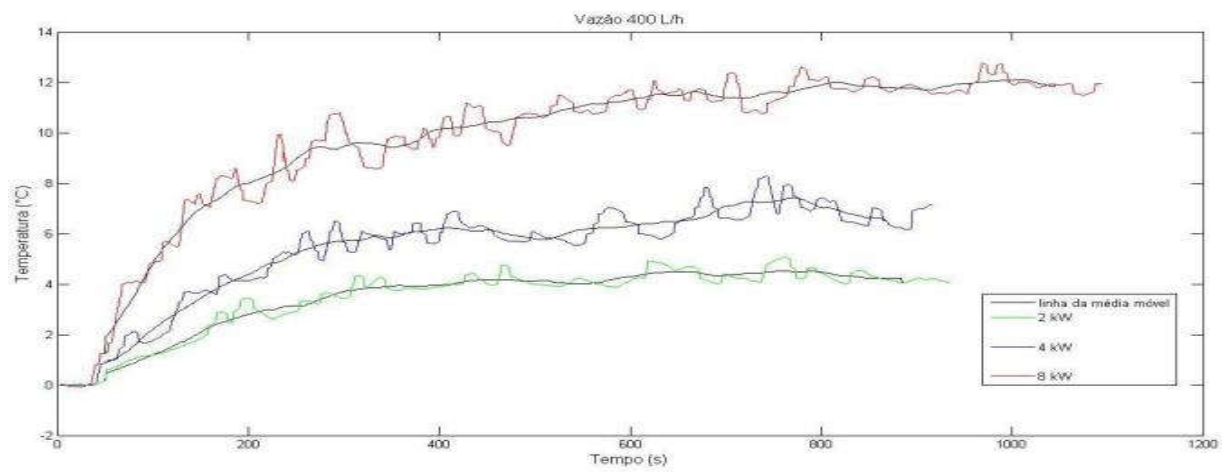


Figura 20 - Curvas de aquecimento com vazão de 400 l/h [14]

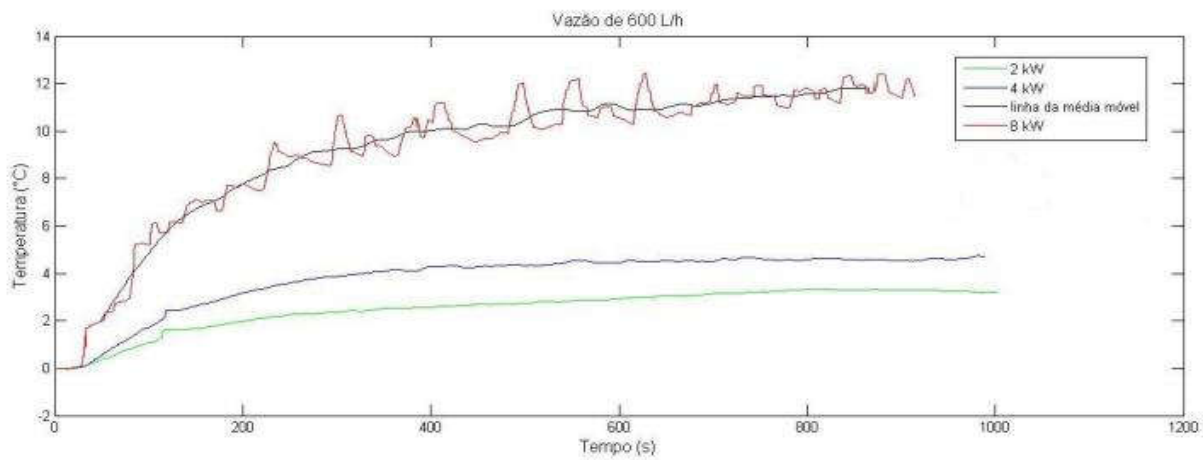


Figura 21 - Curvas de aquecimento com vazão de 600 l/h [14]

2.2 Modelagem da Malha de Vazão

Com os valores do controle do aquecimento escolhidos e a faixa de controle de vazão definida, agora é necessário obter a malha de controle dessa mesma faixa de vazão. Para isso utilizou-se para auxílio o trabalho de Guilherme Martins Leandro (2014) [15] o qual implementou na planta PD3 da Smar um controlador PI para controle da abertura de uma válvula e assim realizar o controle de vazão. O esquema do controle, montado a partir do trabalho de Guilherme, pode ser observado na *Figura 22* e, de acordo com o este, optou-se pelos valores de acordo com a Tabela 4 em que utilizou-se os ganhos proporcional e integral da malha de controle para auxílio do presente trabalho.

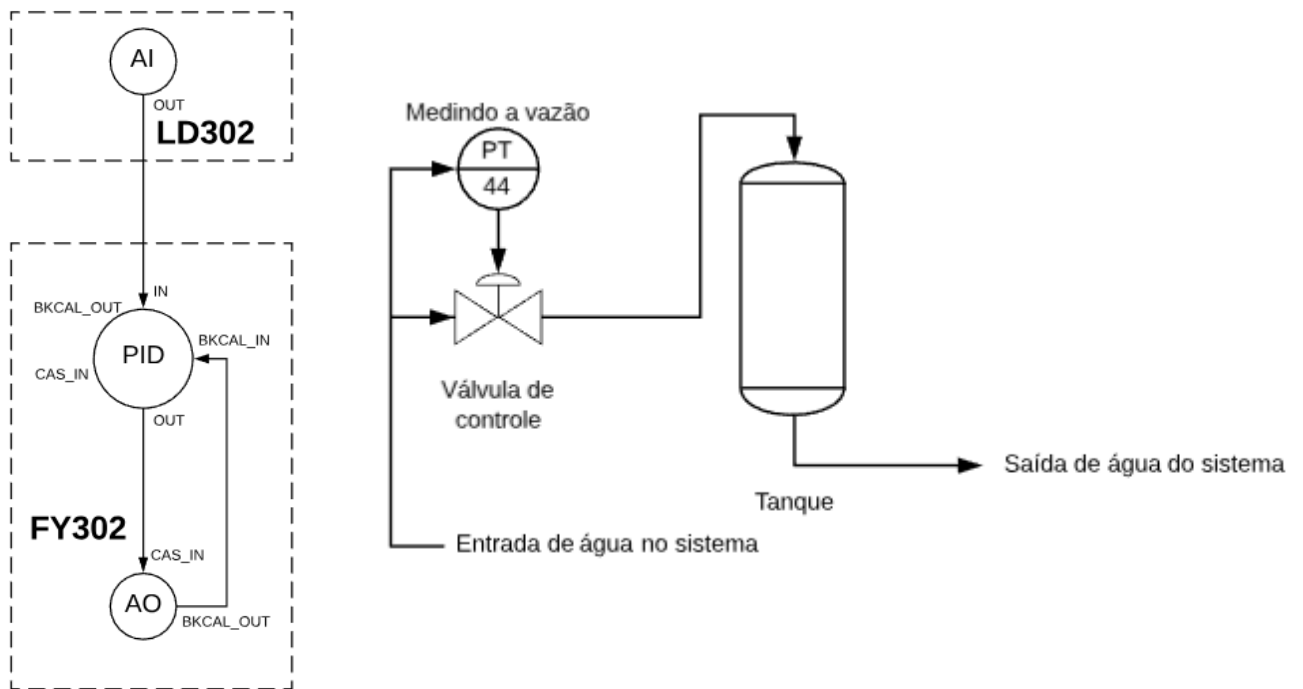


Figura 22 - Malha de controle da vazão

Tabela 4 - Parâmetros de Controle adotado para o resfriamento

Parâmetro de Controle	Valor adotado
Ganho Proporcional da malha de resfriamento (K_p)	0.1136
Ganho Integral da malha de resfriamento (K_i)	0.123
Faixa de controle de vazão	0 a 400 l/h

2.3 Projeto de Controle Split Range

Com as malhas definidas, é possível conecta-las ao bloco funcional SPLIT o qual será implementado dentro do equipamento TT02 como pode ser observado na Figura 23. Desse modo é decidido um valor desejado (set point) e o controle é feito. Assim, se o valor da temperatura ficar abaixo do valor de referência é acionada a malha de aquecimento, mas se o valor da temperatura ficar acima é acionada a malha de resfriamento. Uma forma simplificada do esquema de montagem e controle da temperatura utilizando as duas malhas de controle assim como a atuação do bloco SPLIT também pode ser observado na *Figura 24*. É possível observar no gráfico da imagem a atuação reversa, ou seja, o acionamento dos elementos de atuação é dependente do valor do erro em relação ao set point (representado pelo valor 0% no eixo das abscissas).

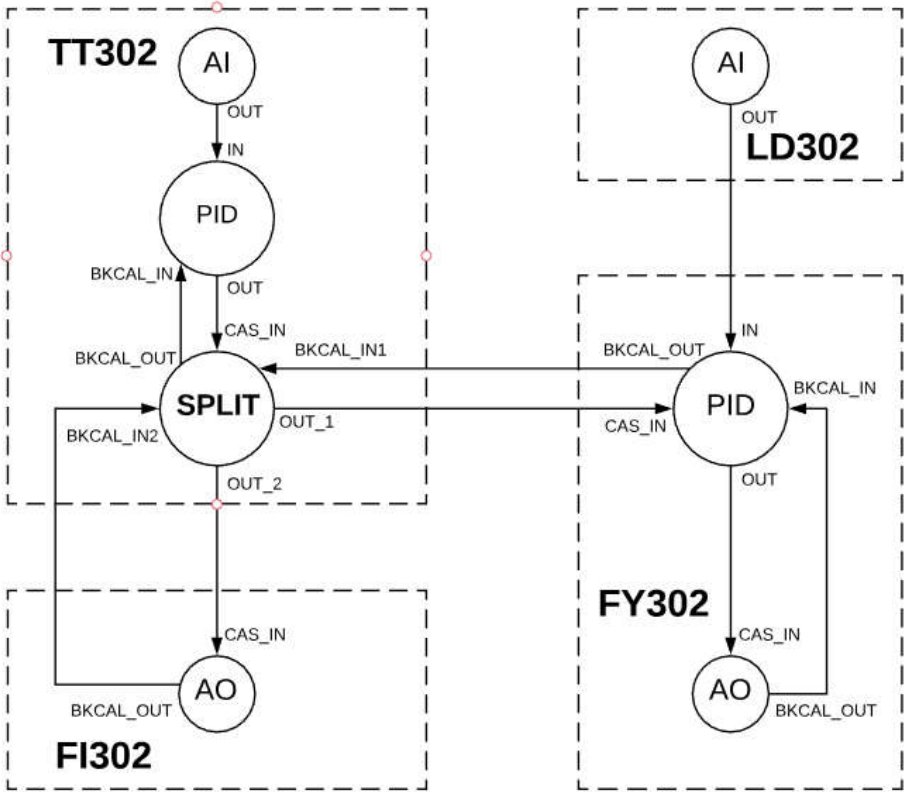


Figura 23 - Esquema da malha completa de controle com o bloco funcional SPLIT

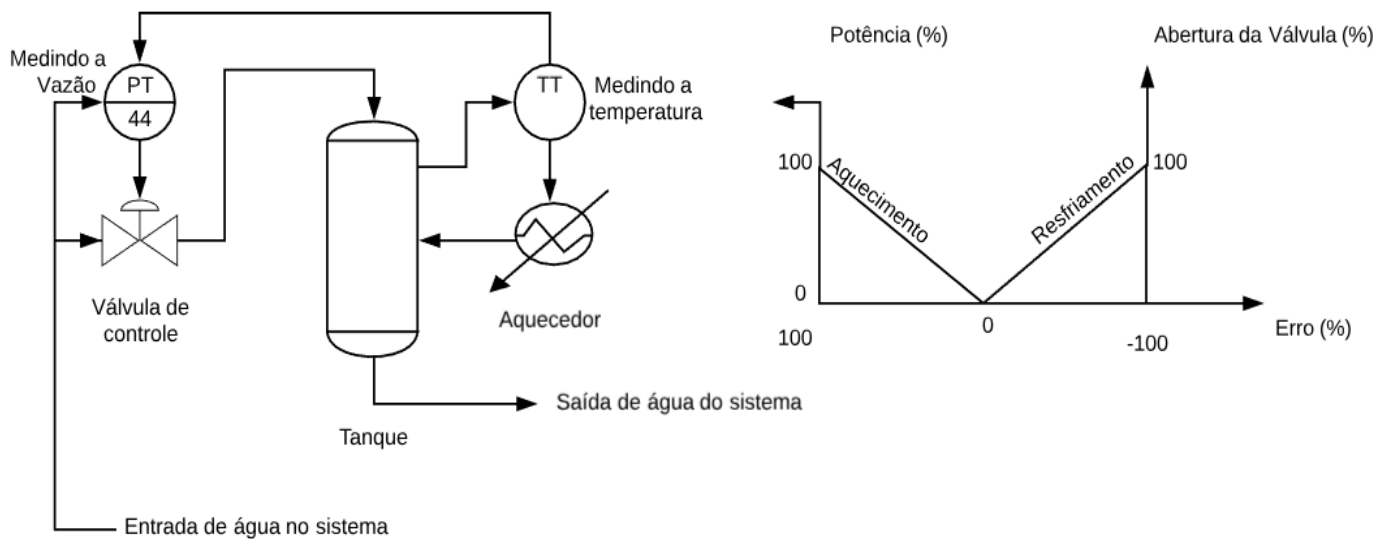


Figura 24 – Esquema simplificado da montagem e controle da temperatura.

2.4 Implementação dos Parâmetros no Sistema

Ao longo desta seção é demonstrado como foi implementado o controle SPLIT no Syscon com os valores dos parâmetros dos blocos funcionais e demais configurações. Na Figura 25 é possível visualizar o esquema implementado semelhante à Figura 23.

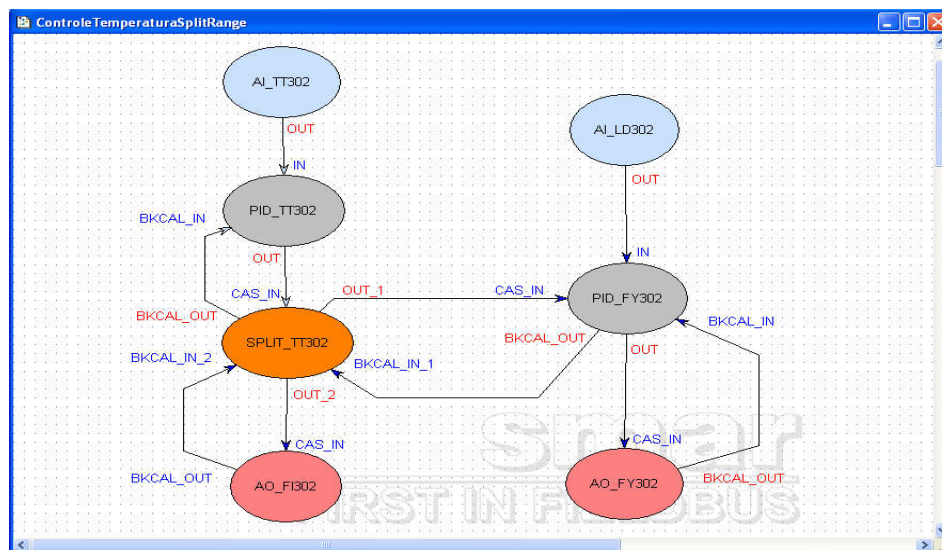


Figura 25 - Esquema do controle SPLIT completo no Syscon

2.4.1 Configuração dos blocos funcionais no equipamento TT302

2.4.1.1 Bloco de Entrada Analógica (Analog Input TT302)

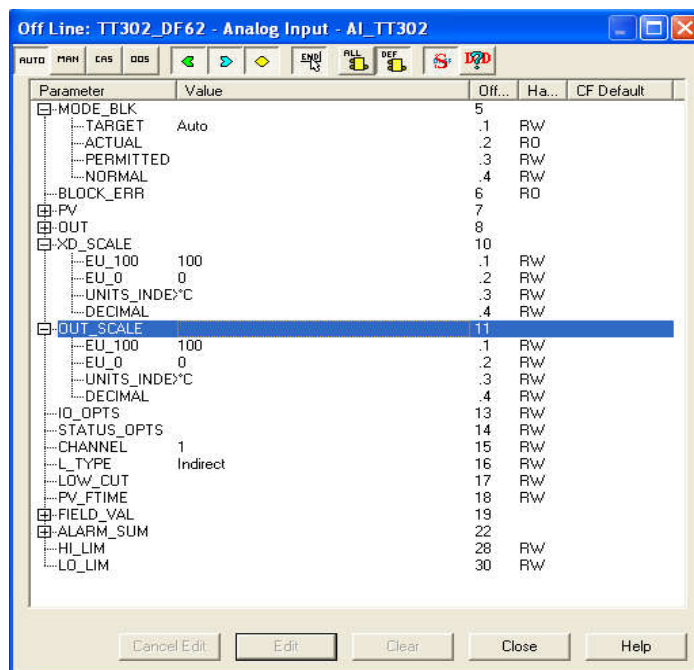


Figura 26 - Configuração do Bloco da Entrada Analógica do TT302

No bloco da entrada analógica visto na *Figura 26* os seguintes parâmetros foram ajustados:

- XD_SCALE:
 - EU_100: valor máximo da variável de entrada
 - EU_0: valor mínimo da variável de entrada
 - UNITS_INDEX: unidade da variável de entrada
- OUT_SCALE:
 - EU_100: valor máximo que corresponde a variável de saída
 - EU_0: valor mínimo que corresponde a variável de saída
 - UNITS_INDEX: unidades da variável de saída
- L_TYPE: tipo de relação da variável de entrada com a de saída.

2.4.1.2 Bloco de Controle PID (PID Control TT302)

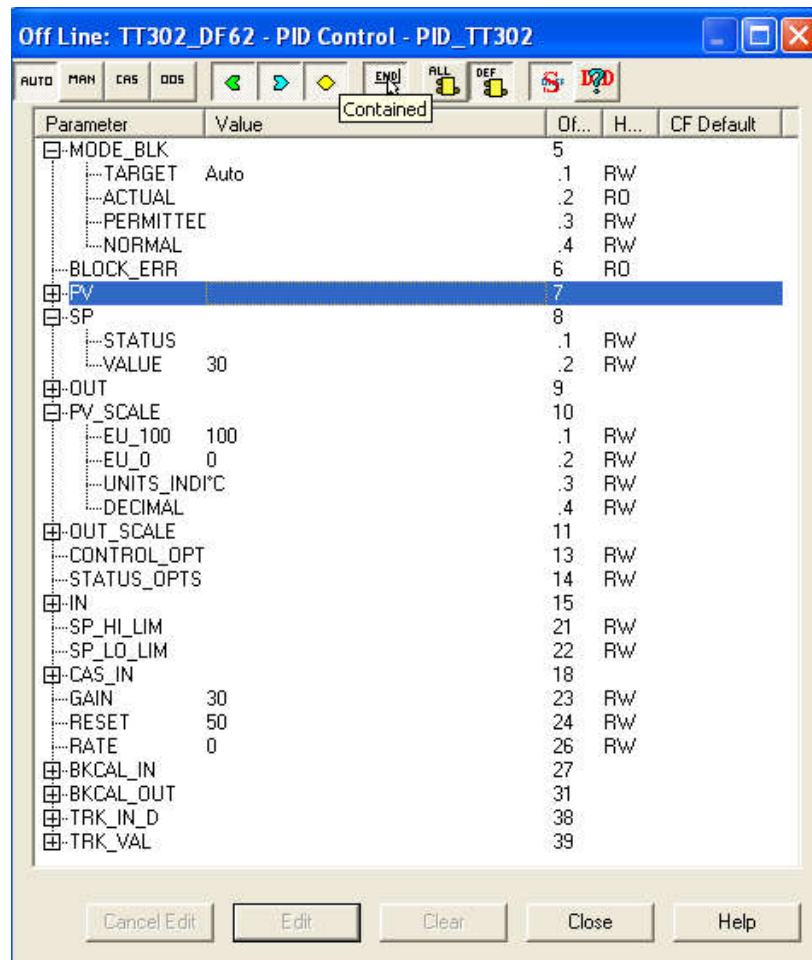


Figura 27 - Configuração do Bloco de PID do TT302

No bloco de controle PID, Figura 27, foram ajustados os seguintes parâmetros:

- SP: valor de *setpoint*
- PV_SCALE:
 - EU_100: valor máximo da variável de entrada
 - EU_0: valor mínimo da variável de entrada
 - UNITS_INDEX: unidade da variável de entrada
- OUT_SCALE:

- EU_100: valor máximo que corresponde à saída do controlador
- EU_0: valor mínimo que corresponde à saída do controlador
- UNITS_INDEX: unidades da variável da saída do controlador
- SP_HI_LIM: valor máximo de *setpoint*
- SP_LO_LIM: valor mínimo de *setpoint*
- GAIN: ganho proporcional
- RESET: ganho integrativo
- RATE: ganho derivativo

Os parâmetros GAIN, RESET e GATE do bloco PID do TT302, Figura 27, são os ganhos do controlador utilizado. O GAIN representa o K_p , o RESET representa o K_i e o GATE representa o K_d , neste trabalho foram usados só o GAIN e o RESET, já que o controlador utilizado foi um PI.

2.4.1.3 - Bloco de Controle SPLIT (SPLIT – Splitter - TT302)

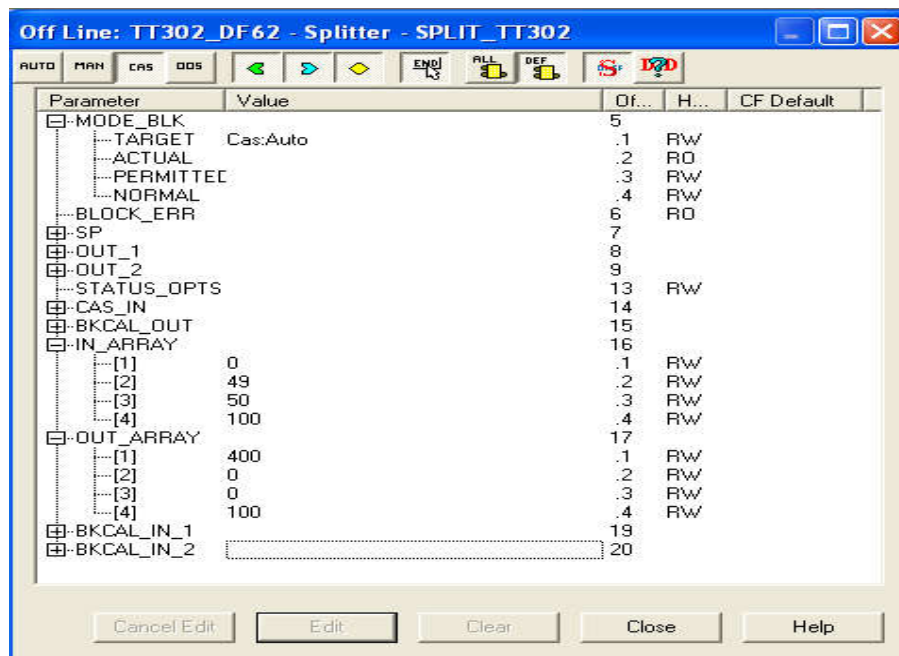


Figura 28 - Configuração do Bloco de SPLIT do TT302

No bloco SPLIT, Figura 28, é configurado como deve ser a decisão de saída de controle de acordo com os valores de entrada obtidos do bloco PID:

- IN_ARRAY: Pontos da curva de valores de entrada ou coordenada X.

- [1]: Valor mínimo de entrada para atuação da saída 1
 - [2]: Valor máximo de entrada para atuação da saída 1
 - [3]: Valor mínimo de entrada para atuação da saída 2
 - [4]: Valor máximo de entrada para atuação da saída 2
- OUT_ARRAY: Pontos da curva de valor da saída ou coordenada Y.
 - [1]: Valor máximo da saída 1
 - [2]: Valor mínimo da saída 1
 - [3]: Valor mínimo da saída 2
 - [4]: Valor máximo da saída 2

2.4.2 – Configuração dos blocos funcionais no equipamento FI302

2.4.2.1 - Bloco de Saída Analógica (Analog Output FI302)

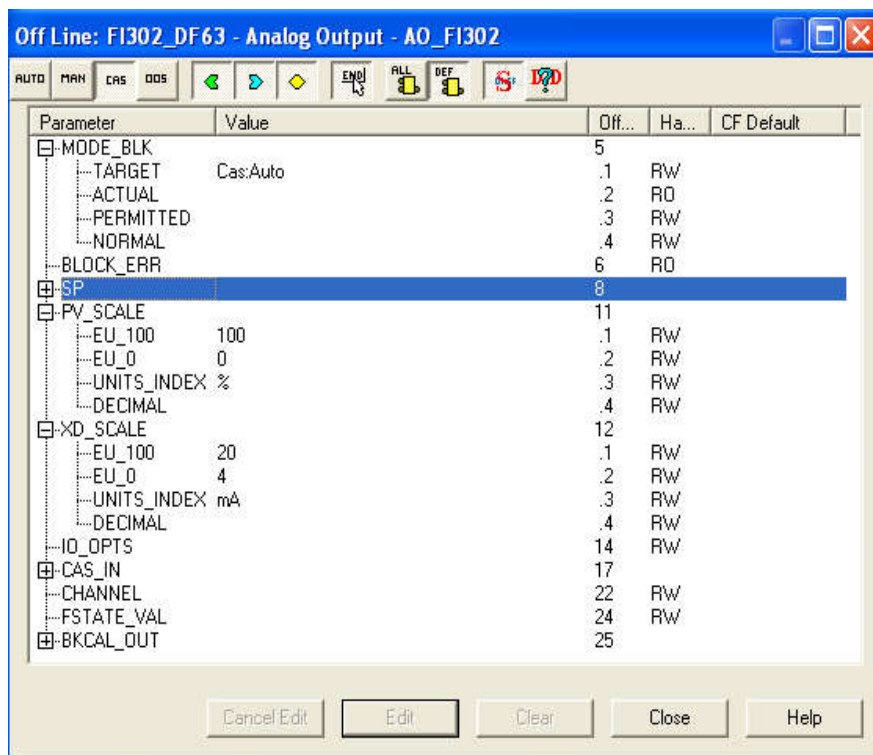


Figura 29 - Configuração do Bloco da Saída Analógica do FI302.

No bloco da saída analógica do FI302 foi necessário a configuração dos valores de alguns parâmetros:

- PV_SCALE:
 - EU_100: valor máximo da variável de entrada
 - EU_0: valor mínimo da variável de entrada
 - UNITS_INDEX: unidade da variável de entrada
- XD_SCALE:
 - EU_100: valor máximo que corresponde à saída do controlador
 - EU_0: valor mínimo que corresponde à saída do controlador
 - UNITS_INDEX: unidades da variável da saída do controlador

2.4.3 – Configuração dos blocos funcionais no equipamento LD302

2.4.3.1 - Bloco de Entrada Analógica (Analog Input LD302)

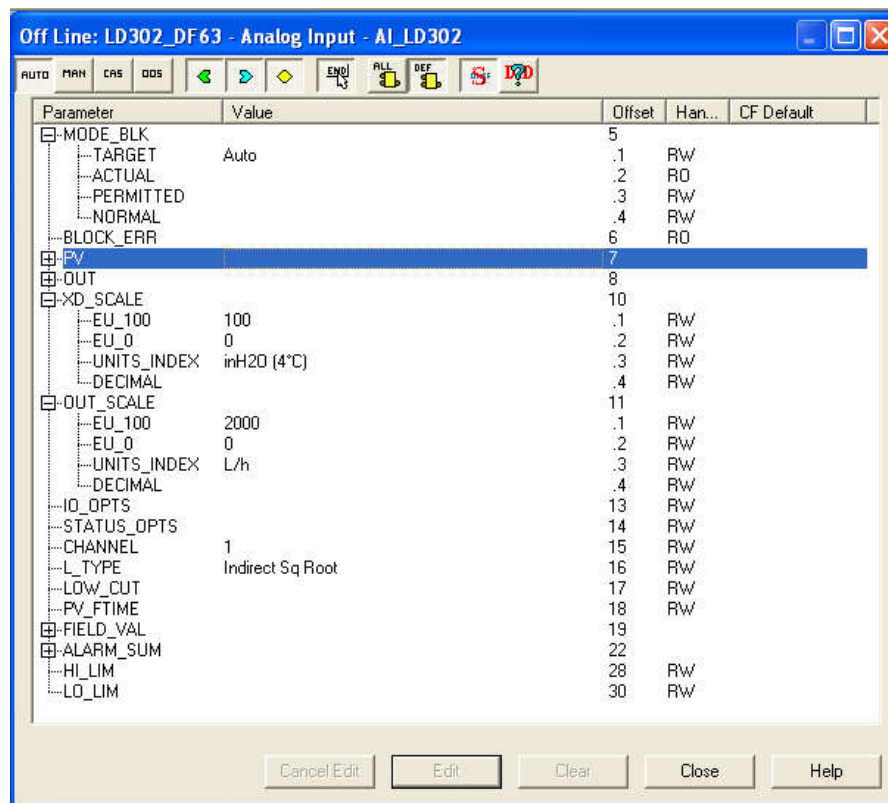


Figura 30 - Configuração do Bloco da Entrada Analógica do LD302

A configuração foi feita de forma semelhante ao bloco do TT302.

2.4.4 – Configuração dos blocos funcionais no equipamento FY302

2.4.4.1 - Bloco de Controle PID (PID Control FY302)

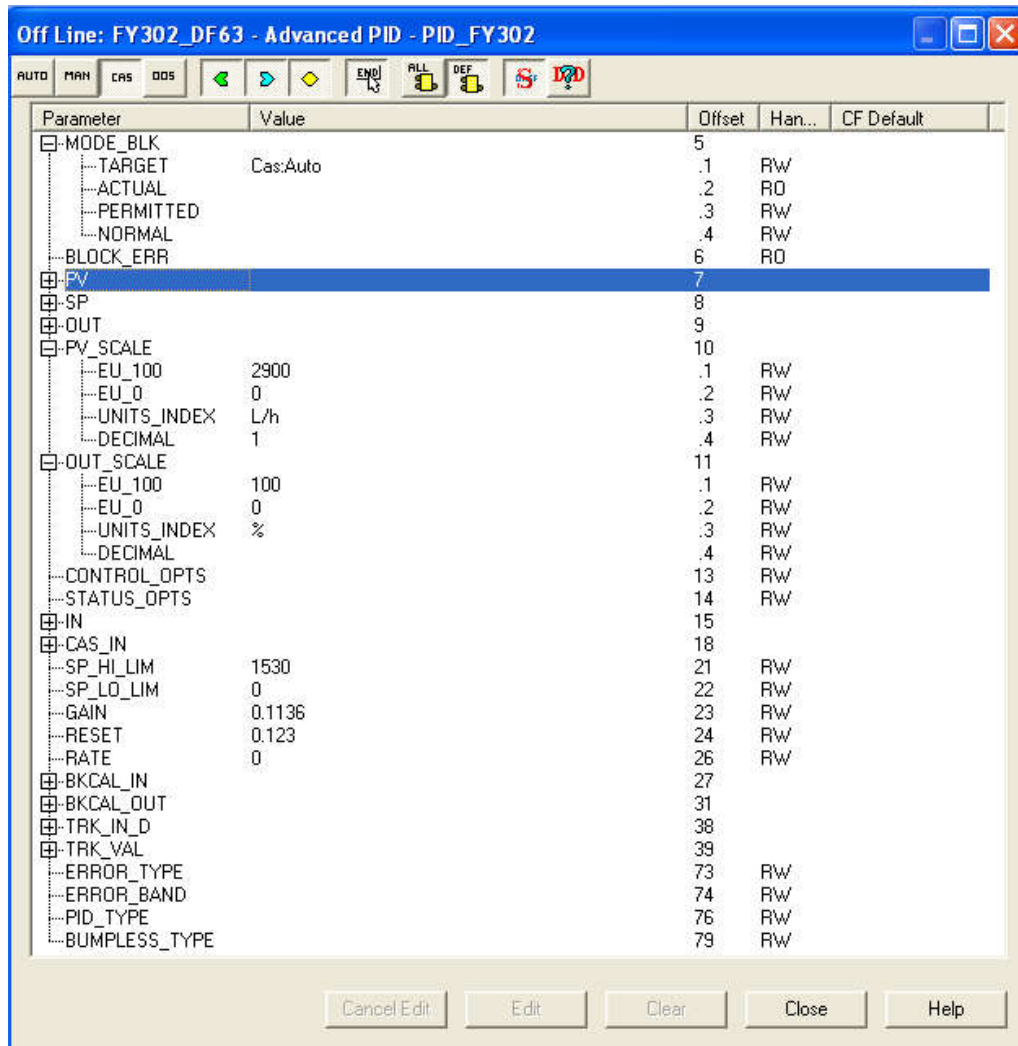


Figura 31 - Configuração do Bloco de PID do FY302

A configuração foi feita idêntica ao bloco do TT302.

2.4.4.1 - Bloco de Controle PID (PID Control FY302)

Aqui também, a configuração foi feita de forma equivalente ao bloco do FI302.

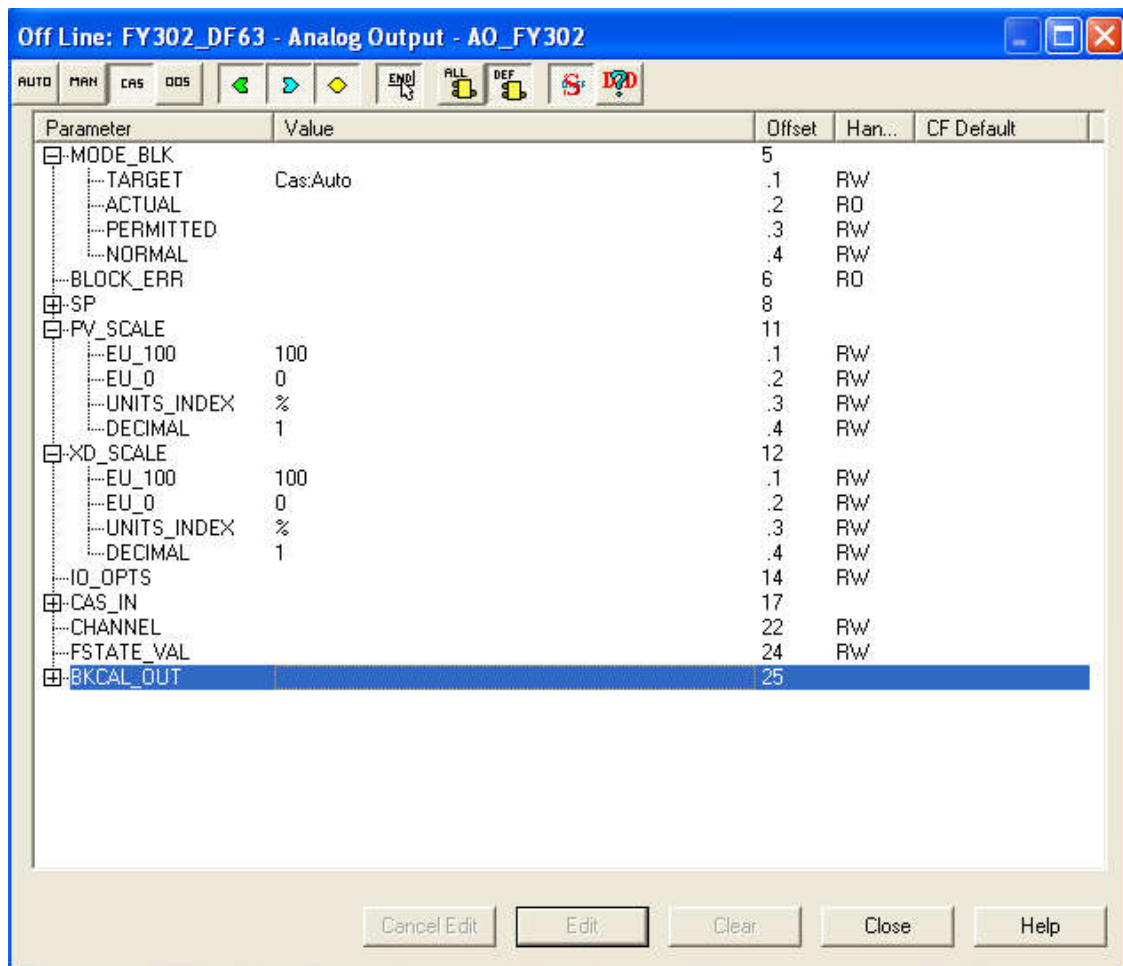


Figura 32 - Configuração do Bloco da Saída Analógica do FY302.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da metodologia apresentada, foram levantadas curvas de comportamento da resposta do sistema em dois ensaios os quais podem ser observados nas Figura 33 e Figura 34:

- utilização apenas de água para controle de vazão;
- utilização de agitador com ar comprimido e água para controle da vazão.

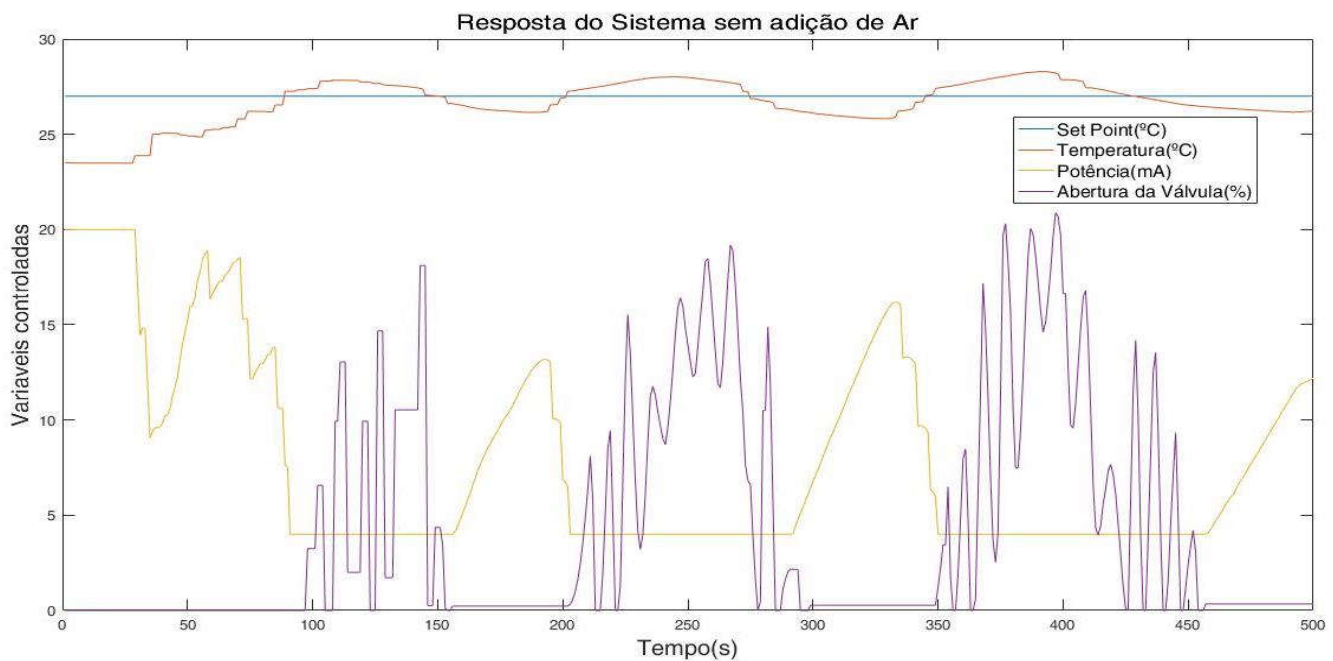


Figura 33 - Ensaio de controle com utilização apenas de água para controle de vazão.

A Figura 33 mostra o valor de temperatura oscilando em torno de 27°C (valor de set point para esse primeiro ensaio). Ao analisar as curvas de Potência e Abertura de Válvula é possível perceber a ação de controle de modo reverso. Quando a temperatura ultrapassa o valor de set point é possível perceber o começo da abertura da válvula chegando ao máximo de 20% que corresponde a vazão de 400 l/h definido anteriormente. Já quando a temperatura fica abaixo do valor de set point é possível perceber o aumento do valor do sinal do conversor 4-20 mA que é convertido em potência térmica por meio da resistência dentro do tanque.

É importante observar o comportamento bastante oscilatório da ação de abertura da válvula o qual era esperado e pode ser explicado devido a grande força da mola que compõe o mecanismo

da válvula. Isso se comprova ao observar que o valor máximo que foi definido para vazão (400 l/h) representa apenas 20% da capacidade da válvula dificultando assim controles mais precisos.

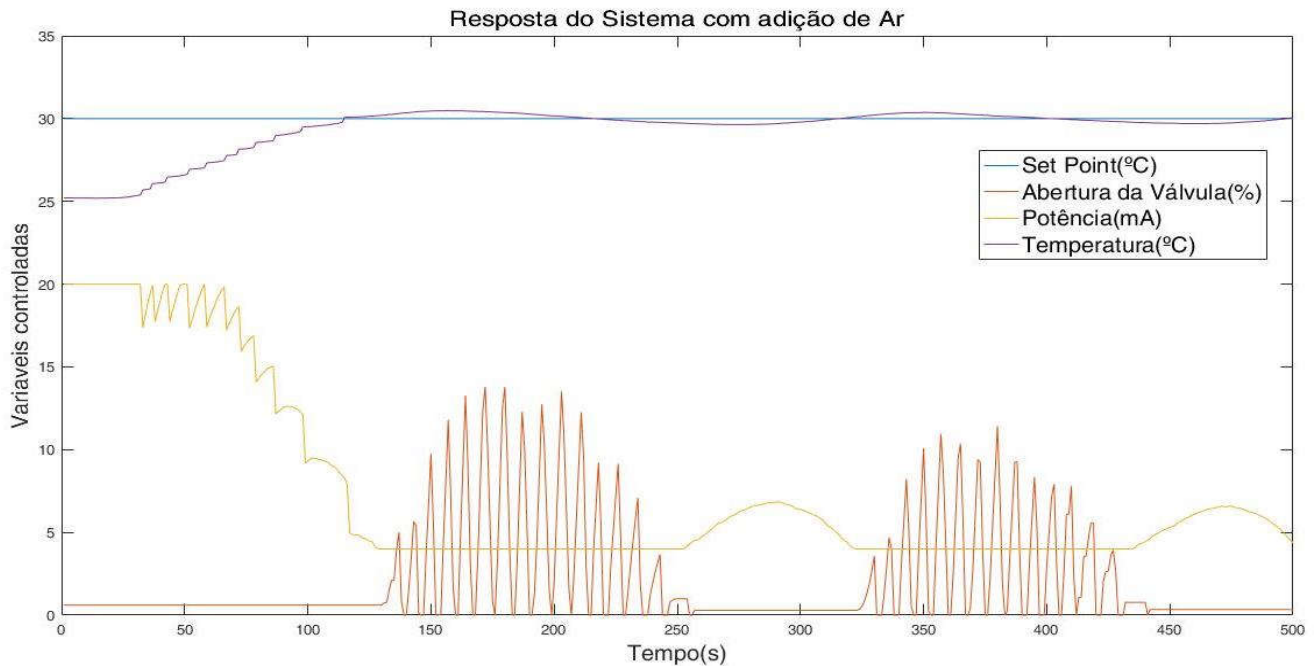


Figura 34 - Ensaio com utilização de uma agitação com ar comprimido e água para controle da vazão.

A *Figura 34* mostra o valor de temperatura oscilando em torno de 30°C (valor de set point para esse segundo ensaio). Ao analisar as curvas de Potência e Abertura de Válvula é possível perceber também a ação de controle de modo reverso. Para esse ensaio, nota-se que quando a temperatura ultrapassa o valor de set point é possível perceber o começo da abertura da válvula chegando ao máximo de 15%, o que acentua as oscilações intensificando assim o efeito devido a grande força da mola. Já quando a temperatura fica abaixo do valor de set point é possível perceber que o máximo valor do sinal do conversor 4-20 mA é aproximadamente 7mA.

No trabalho citado, para um controle de temperatura, o sistema atua para aumentar o valor da temperatura e ao ultrapassar o set point, aguarda para a própria dinâmica faça com o que valor diminua para o set point novamente (como por exemplo o sistema perdendo calor para o ambiente fazendo com o que a temperatura caia). Comparando com esses ensaios, nota-se um avanço no método de controle pois tem-se uma atuação em ambas as direções, ou seja, não é necessário que o sistema, ao ter o valor sua variável controlada superando o set point, aguarde que a própria dinâmica retorne o valor da variável para um valor desejado e vice-versa.

Ademais, na *Figura 34*, nota-se que o valor da temperatura oscila muito mais próximo do valor de set point e o formato da curva é bem mais suave. Esse novo comportamento pode ser explicado devido a correção dos efeitos não lineares tempo morto e estratificação da temperatura. O tempo morto é o intervalo de tempo entre o instante em que o sistema sofre uma variação qualquer e o instante em que esta começa a ser detectada pelo elemento sensor [16]. Já a estratificação é um fenómeno comum nos corpos de água, que consiste na formação de camadas horizontais de água com diferentes densidades, estáveis, ordenadas de forma a que as menos densas flutuem sobre as mais densas, com um grau mínimo de mistura entre elas. Embora existam vários mecanismos que conduzem à estratificação, a origem mais comum é a térmica e resulta na formação de uma camada de água mais quente, e por isso menos densa, que se acumula junto à superfície do corpo de água, sobrenadando a água mais fria e densa da região mais profunda. A manutenção da estratificação depende da inexistência de correntes de convecção ou da ausência de mistura induzida pela agitação [17]. Assim, ao aplicar uma agitação com ar comprimido, os efeitos não lineares são atenuados o que auxilia assim no controle da variável temperatura.

4 CONCLUSÕES

Em função dos testes realizados e dos resultados obtidos, pode-se concluir que a implementação realizada apresentou resultados satisfatórios em relação a eficiência do método. Ao analisarmos o sobre sinal máximo obtido pela resposta do sistema observamos uma diferença de 1,5°C em relação ao Set Point, ou seja, um erro de aproximadamente 6% para o primeiro experimento. Já para o segundo experimento (com a adição de ar a água) o sobre sinal máximo obtido pela resposta do sistema observamos uma diferença de 0,5°C em relação ao Set Point, ou seja, um erro de aproximadamente 1,6%. Com isso pode-se comprovar a eficiência da metodologia aplicada. Além disso foi observado uma oscilação muito grande do valor saída para a válvula de controle de vazão o que mostra ser necessário, para trabalhos futuros, adaptação do equipamento para permitir controles mais suaves e precisos.

5 REFERÊNCIAS

- [1] Ronilson Rocha (2004). Proposta De Planta Piloto: Controle De Vazão E Temperatura De Líquidos – Congresso Brasileiro de Ensino e Engenharia
- [2] Smar – Arigos Técnicos. Link: <http://www.smar.com/brasil/artigo-tecnico/medicao-da-temperatura>
- [3] Smar. (2012). Manual de operação planta didática 3. Manual – 2012
- [4] Smar (2008). Manual dos Procedimentos de Instalação, Operação e Manutenção – Foundation Fieldbus.
- [5] Smar. (2016). Manual de instrução, manutenção e operação – Transmissor de pressão Fieldbus – LD302. Manual – 2016
- [6] Smar. (2015). Manual de instrução, manutenção e operação – Posicionador de Válvulas Fieldbus – FY302. Manual – 2016
- [7] Smar. (2016). Manual de instrução, manutenção e operação – Conversor Fieldbus – FI302. Manual – 2016
- [8] Smar. (2016). Manual de instrução, manutenção e operação – Transmissor de temperatura Fieldbus – TT302. Manual – 2016
- [9] Design and Development of Wireless Foundation Fieldbus Industrial Networks – 2013 IEEE
- [10] Smar. (2007) Manual de Instruções dos Blocos Funcionais
- [11] OGATA, K. Modern Control Engineering. 5. ed
- [12] Citisystems Automação Industrial (2016). Artigo Técnico - O Controle PID de Forma Simples e Descomplicada. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/controle-pid/>> Acesso em: 10 de outubro de 2018.
- [13] Novus (2003). Artigo Técnico - Controle PID Básico.
- [14] Camila Morais (2017). Planta Didática Smar Pd3: Modelagem E Simulação Do Tanque De Aquecimento
- [15] Guilherme Martins Leandro (2014). Ajuste Dos Parâmetros Do Controlador Pi Da Malha De Vazão Da Pd3 Da Smar
- [16] SENAI – ES (1999). Fundamentos De Controle De Processo. Disponível em: <<http://www.dequi.eel.usp.br/~felix/Controle.pdf>>
- [17] Water on the Web (2015). Density Stratification. Disponível em: <http://www.waterontheweb.org/under/lakeecology/05_stratification.html>