

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

WILLIAM ESPANHOL DE CARVALHO

**IDENTIFICAÇÃO DE UMA MALHA DE MISTURA UTILIZANDO UM
ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2016

WILLIAM ESPANHOL DE CARVALHO

**IDENTIFICAÇÃO DE UMA MALHA DE MISTURA UTILIZANDO UM
ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel..

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi

Co-orientador: Prof. Dr. Wagner Endo



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica**



FOLHA DE APROVAÇÃO

William Espanhol de Carvalho

Identificação de uma malha de mistura utilizando um algoritmo de evolução diferencial

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 19:00hs do dia 08/11/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Wagner Endo - (Coorientador)

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Alessandro Goedel - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me aberto as melhores portas e conduzido meus passos para que chegasse até aqui, por me iluminar nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Joel e Rosângela por todo o esforço que sempre fizeram para que eu chegasse até aqui, por me darem toda a confiança e suporte necessário e pelo amor incondicional.

A minha família, por acreditarem e torcerem por mim e pela compreensão nos momentos de ausência.

A minha namorada Júlia, por todo o companheirismo, carinho, por compartilhar comigo e os momentos alegres e pela paciência e incentivo nos momentos de desânimo.

Aos meus queridos amigos que fiz em Cornélio Procópio, que ajudaram a tornar mais felizes e leves alguns anos da minha vida.

Aos professores Dr. Marcelo Favoretto Castoldi e Dr. Wagner Endo, pela dedicação e prontidão durante a orientação deste trabalho.

Aos professores Dr. Murilo Silva e Dr. Alessandro Goedel pelas valiosas e imprescindíveis dicas de correção à proposta inicial deste trabalho.

Agradeço a todos os professores que contribuíram de alguma forma para meu desenvolvimento ao longo do curso.

O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo (Churchill, Winston L. S., 1874 – 1965).

RESUMO

CARVALHO, William Espanhol. **IDENTIFICAÇÃO DE UMA MALHA DE MISTURA UTILIZANDO UM ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**. 52f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Processos industriais têm suma importância e destaque no meio econômico. A medida em que ficam mais complexos e dinâmicos, é imprescindível que toda uma gama de novas tecnologias seja usada para atingir os objetivos produtivos. Dentro desse contexto surgem os controladores de processo, hoje essenciais para que uma planta industrial funcione com eficiência e segurança. Para que os controladores de processo atuem de forma significativa, é necessário que seus parâmetros característicos sejam bem dimensionados, bem como os parâmetros da própria malha de trabalho. O objetivo desse trabalho é realizar a identificação de parâmetros de uma malha de um processo de mistura da planta industrial através de um algoritmo de evolução diferencial. O trabalho é desenvolvido em um processo de mistura no qual a curva de temperatura é caracterizada como uma resposta a uma entrada degrau. A partir de dados coletados de uma Planta Didática Industrial, o presente trabalho visa apresentar uma maneira de se identificar os parâmetros de uma malha de mistura, através do uso de um algoritmo evolutivo diferencial e sua implementação simultânea no Matlab e *Simulink*[®].

Palavras-chave: Planta Didática Industrial; Identificação, de Parâmetros, Proporcional Integral; Evolução Diferencial.

ABSTRACT

CARVALHO, William Espanhol. **IDENTIFICATION OF A FLOW CONTROL LOOP USING A DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM**. 52p. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Processos industriais automatizados são cada vez mais comum no nos dias de hoje.

Industrial processes have huge importance and highlight in the economic scenario. The extent to which become more complex and dynamic, it is essential that a whole range of new technologies to be used to achieve the production goals. In this context appear the process controllers, today essential for an industrial plant to operate efficiently and safely. For the process controllers operate significantly, it is necessary that its characteristic parameters to be properly dimensioned, as well as the parameters of the grid itself. The aim of this paper is to identify the parameters of a grid of a mixing process of the plant through a differential evolution algorithm. The work is carried out in a mixing process in which the temperature curve is characterized as a response to a step input. From data collected from an industrial didactic plant, this paper presents a way to identify the parameters of a mixture grid through the use of an evolutionary algorithm differential and its simultaneous implementation in Matlab and *Simulink*[®].

Keywords: Didactic industrial plant; Identification, Parameters, PI and Differential Evolution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Planta ou processo a ser controlado.....	15
Figura 2 - Sistema de controle a malha fechada ou com realimentação.....	16
Figura 3 - Redes de Comunicação <i>Profibus</i> e suas aplicações.	20
Figura 4 - Fluxograma do DE.	25
Figura 5 - Planta Didática Industrial SMAR 3.	27
Figura 6 – Diagrama de tubulação e instrumentação da Planta Didática Industrial. .	28
Figura 7 - Arquitetura de comunicação da Planta Didática Industrial.	29
Figura 8 - Tela de supervisão de controle para as topologias de controle de antecipação e controle por realimentação.....	30
Figura 9 - Tela de supervisão de controle para as topologias de controle em cascata.	31
Figura 10 - Diagrama de instrumentação/tubulação da topologia de controle por antecipação.....	32
Figura 11 - Diagrama de blocos com controle por antecipação no tanque de aquecimento.....	33
Figura 12 - Diagrama de tubulação e instrumentação da topologia do controlador por realimentação da Planta Didática.....	34
Figura 13 - Diagrama de blocos com controle por realimentação no tanque de mistura.	34
Figura 14 -Diagrama de tubulação e instrumentação da topologia de controle em cascata na Planta Didática Industrial.	35
Figura 15 - Diagrama de blocos do Controle em Cascata.....	36
Figura 16 - Supervisão em tempo real do supervisório da malha de aquecimento. ...	38
Figura 17 - Supervisão em tempo real do supervisório da malha de mistura.....	39
Figura 18 - Diagrama de blocos do sistema de identificação.	40
Figura 19 - Curva da temperatura do tanque aquecimento.	43
Figura 20 - Curva da temperatura do tanque de mistura.....	44
Figura 21 - Curva da temperatura do tanque de mistura com filtro.	45
Figura 22 - Variação de temperatura para a malha de mistura filtrada.	46
Figura 23 - Curva medida e a estimada.	48

LISTA DE SIGLAS

ED	Evolução Diferencial
IHM	Interface-homem-máquina
FO	Função Objetivo
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1	PROBLEMA.....	11
1.2	JUSTIFICATIVA.....	11
1.3	OBJETIVOS.....	12
1.3.1	Objetivo Geral.....	12
1.3.2	Objetivos Específicos.....	12
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	SISTEMAS DE CONTROLE	14
2.1.1	Sistema de controle de malha aberta	15
2.1.2	Sistema de controle de malha fechada.....	15
2.2	CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL (PI)	16
2.2.1	Controlador Proporcional.....	17
2.2.2	Controlador Proporcional-Integral.....	18
2.3	REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL E SISTEMA DE SUPERVISÃO.....	19
2.3.1	Sistema de supervisão.....	20
2.4	MÉTODOS HEURÍSTICOS	21
2.4.1	Algoritmo Evolutivo	22
2.4.2	Evolução Diferencial	23
3.	ARQUITETURA DA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL	26
3.1	PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL	26
3.2	ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO E CONTROLE	28
3.2.1	Sistema de Automação e Controle	29
3.2.2	Sistema de Supervisão	29
3.3	TOPOLOGIAS DOS CONTROLADORES	31
3.3.1	Controle de Antecipação.....	31
3.3.2	Controle de Realimentação	33
3.3.3	Controle em Cascata	34
4.	METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DA MALHA DE MISTURA DA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL	37
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49

1. INTRODUÇÃO

As plantas industriais estão cada vez mais complexas devido à busca por redução de custo, como o consumo de energia, flexibilização da produção, melhoria na qualidade dos produtos e a redução de estoques, enquanto continuam sendo mais e mais conduzidas aos seus limites operacionais (ALVES, 2010).

Com o aparecimento de novos equipamentos industriais, é de vital importância que o estudante de graduação tenha contato com essa instrumentação e aprenda a realizar ensaios de laboratórios, analisar seus resultados e propor soluções para os possíveis problemas. Dentro desse contexto, a Planta Didática Industrial pode ser considerada uma das principais articulações entre o meio praticado na área industrial com o meio acadêmico, pois possibilita ao aluno simular um ambiente industrial (CONCEIÇÃO, 2004).

O maior desafio do controle de processo é manter as variáveis deste, como por exemplo, temperatura, vazão, pressão, nível e outros, dentro dos valores estipulados no projeto, e é a operação das plantas industriais que deve satisfazer as exigências do mesmo frente a todo tipo de influências, sejam elas perturbações ocasionais ou mudanças operacionais.

Para isso, os processos industriais possuem um sistema de funcionamento baseado na autossuficiência. Esse sistema, que emprega a tecnologia da automação, efetua medições e introduz correções, aplicando conceitos de instrumentação e controle automático, portanto, sem a necessidade da interferência do homem (AGUIRRE, 2007).

O uso de controladores de processos é recorrente em plantas industriais e, o conhecimento do sistema a ser controlado, é essencial para que estes sejam bem projetados. Tal projeto é fundamental para que o sistema possa atingir os diferentes objetivos operacionais como segurança de processo, especificações de produtos e restrições econômicas ou ambientais (ORENSTEIN, 2013).

Os tipos de controles mais comuns em processos industriais e Plantas Didáticas Industriais são os controladores Proporcional, Integral e Derivativo (PID), dado a sua robustez e facilidade de implementação (SILVA, 2011, p.15). A atividade de identificação de sistemas é uma peça fundamental em estruturas de controle mais sofisticados e trabalha em conjunto a esses controladores.

O princípio básico por trás da identificação de sistemas consiste no ato de perturbar o processo de interesse a fim de se obter uma representação do mesmo. Para isto, é aplicado um sinal conhecido a um conjunto de variáveis que podem ser manipuladas, chamadas de entradas. Após a aplicação deste sinal, as respostas do sistema no decorrer do tempo são medidas, e um procedimento dedicado pode utiliza-las para identificar os parâmetros do modelo matemático que representa este sistema.

Uma técnica que pode ser utilizada para tal tarefa são algoritmos evolutivos como, por exemplo, o algoritmo de Evolução Diferencial (ED). Tal algoritmo tem seu funcionamento baseado em métodos naturais e genéticos que utilizam apenas as informações da função a ser otimizada, buscando o valor ótimo através de regras de probabilidade e operando de maneira estocástica, desvinculando-se das derivadas utilizadas nos métodos determinísticos.

1.1 PROBLEMA

A identificação de parâmetros de um sistema é de grande importância para plantas industriais. No decorrer do uso de planta industriais seus parâmetros específicos vão se modificando ou são, até mesmo, perdidos, o que pode acarretar em perda de eficiência ou erros nos resultados esperados, comprometendo, os estudos em andamento.

A complexidade dos problemas de sistemas industriais estudados pode resultar em modelos matemáticos de difícil representação, com funções não-lineares, descontínuas, não diferenciáveis, multimodais (possui muitos pontos de mínimo ou de máximo) e dessa forma a necessidade de se possuir uma forma de ou método de identificação que se encaixe em um determinado tipo de problema para o sistema é de fundamental importância.

1.2 JUSTIFICATIVA

A atividade de identificação de sistemas é uma peça fundamental em estruturas de controle mais sofisticadas. Diversos algoritmos, como controle preditivo e controle robusto, além de ferramentas de otimização, dedicam boa parte de seus esforços para obter formas satisfatórias de se descrever os sistemas que se deseja

controlar. Modelos que se aproximem da realidade e sejam de fácil manipulação podem fazer a diferença entre um projeto ser bem-sucedido ou apenas uma ferramenta sem uso prático.

Os ajustes finos de controle de temperatura, vazão e nível em plantas industriais são essenciais para um bom desempenho da mesma, da mesma forma parâmetros de um sistema real também são de extrema importância pois esses sofrem alterações devido ao próprio uso. Como nem sempre é possível obtê-los dos fabricantes, é necessária uma forma de determiná-los corretamente. Portanto, técnicas que auxiliam na estimativa desses parâmetros são buscadas incessantemente em trabalhos e pesquisas, como Fonseca (2012) e Silva (2011), sempre visando apresentar resultados satisfatórios. Nesse trabalho uma dessas alternativas é a utilização de algoritmos evolutivos diferenciais (ED) para a estimação de parâmetros de uma malha de mistura.

1.3 OBJETIVOS

Esse tópico pretende mostrar quais os objetivos que este estudo pretende obter.

1.3.1 Objetivo Geral

Identificar parâmetros relacionados a uma malha de mistura de uma Planta Industrial por meio de um Algoritmo de Evolução Diferencial (ED) simples e eficiente.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver a fundamentação teórica sobre plantas industriais e sistemas de controle.
- Revisão bibliográfica acerca do método de otimização de Evolução Diferencial (ED).

- Desenvolver um algoritmo Evolutivo Diferencial que possa ser utilizado para estimar os parâmetros de uma malha de mistura de uma planta industrial.
- Validar o algoritmo desenvolvido identificando os parâmetros de transferência do processo de mistura da Planta Didática Industrial.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura desse trabalho de conclusão de curso é composta da seguinte maneira; o capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica e conceitual sobre os principais assuntos relacionados ao trabalho como; sistemas de controle, controlador proporcional-integral (PI), redes de comunicação industrial e sistema de supervisão; o capítulo 3 apresenta um estudo da Planta Didática Industrial, juntamente com suas topologias de controle; no capítulo 4 é descrita a metodologia e implementação do trabalho; no capítulo 5 os resultados obtidos no trabalho com o uso do algoritmo Evolução Diferencial (ED); por fim, o capítulo 6 as considerações finais são efetuadas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como finalidade mostrar os conteúdos teóricos que foram abordados para a construção desse trabalho. Será feita uma breve revisão sobre sistemas de controle, controle de malha fechada, redes de comunicação industrial e conceitos sobre Algoritmos Evolutivos.

2.1 SISTEMAS DE CONTROLE

Sistema de controle é um conjunto de componentes conectados ou relacionados, de modo a regular um outro sistema. Para Ogata (2003) a expressão sistema tem o significado de um arranjo ou conjunto de componentes conectados ou relacionados de maneira a formar ou agir como uma unidade.

Um sistema não precisa necessariamente ser físico, o termo pode ser usado em referência a sistemas econômicos, biológicos, elétricos, mecânicos, entre outros. Já controle tem o significado: é o termo usualmente empregado no sentido de regulação, direcionamento ou comando.

Na engenharia, sistemas de controle têm significado mais voltado a sistemas que são utilizados para controlar ativamente variáveis como, temperatura, pressão, vazão, tensão, frequência, posição e velocidade angulares de motores.

Abaixo há algumas expressões utilizadas na engenharia de sistema de controle (OGATA, 2003, p. 5):

- **Variável de referência:** serve de referência (no sentido de comportamento desejado) para a variável a ser controlada.
- **Variável controlada:** é qualquer variável que se deseja controlar. A variável controlada é geralmente representada pela variável de saída do sistema de controle.
- **Variável de controle (ou manipulada):** é a quantidade determinada pela ação de um controlador. A variável de controle é geralmente identificada como a variável de entrada da planta.

- **Controlador:** é qualquer sistema conectado à planta, e responsável pela definição da variável de controle, visando fazer com que a variável controlada responda de acordo com o especificado pela variável de referência.

Na sua forma mais simples, um sistema de controle fornece uma saída de controle para uma dada entrada ou estímulo (NISE, 2002, p. 2). A Figura 1 mostra um exemplo desse processo.

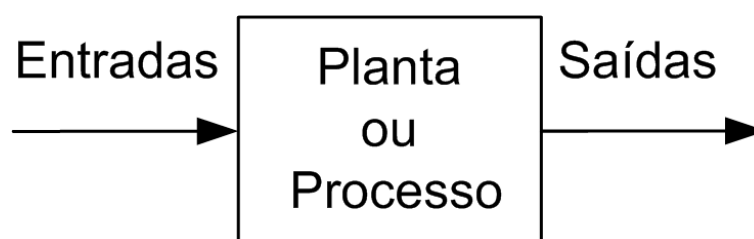


Figura 1 - Planta ou processo a ser controlado.
Fonte: Autoria Própria.

2.1.1 Sistema de controle de malha aberta

Sistemas de malha aberta são sistemas que a leitura da saída não afeta a ação do controle. Em outras palavras, num determinado sistema de controle de malha aberta não existe realimentação: os valores assumidos pela variável de controle não dependem dos valores da variável de saída (OGATA, 2003, p. 5).

A maior vantagem desse sistema é sua simplicidade de atuação. Já sua desvantagem é não poder corrigir a ação de quaisquer perturbações que sejam adicionadas ao sinal atuante do controlador, esse tipo de sistema é comandado unicamente com base na entrada (NISE, 2002, p. 9).

2.1.2 Sistema de controle de malha fechada

Sistemas de controle de malha fechada ou realimentação são sistemas que possuem uma realimentação onde se permite que a saída (ou alguma variável controlada do sistema) seja comparada com a entrada do sistema (OGATA, 2003, p. 5).

Comparados com sistemas de malha aberta, os sistemas de malha fechada apresentam vantagens em relação à sensibilidade a perturbações e a capacidade de corrigir os efeitos das mesmas (NISE, 2002, p. 9).

A Figura 2 mostra um esquema de sistema de malha fechada.

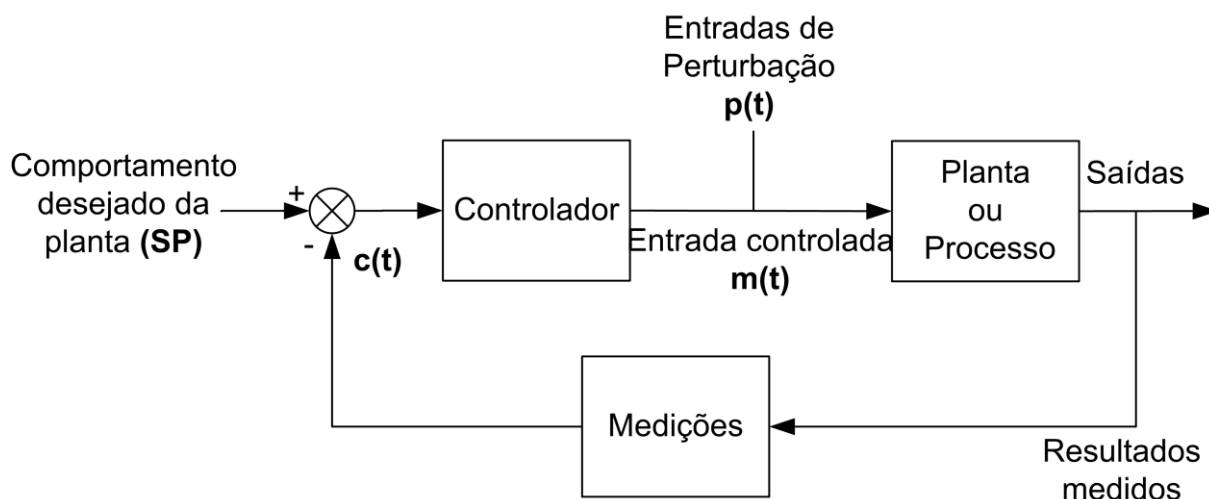


Figura 2 - Sistema de controle a malha fechada ou com realimentação.
Fonte: (SILVA, 2011, p. 22.).

Esse processo tem o funcionamento à medida que uma perturbação ($p(t)$) entra em um processo ou planta, a variável controlada ($c(t)$) é prejudicada desviando o seu ponto de operação (*setpoint*) e, dessa maneira, o controle por realimentação compensa essa perturbação pela manipulação de outra entrada no processo, a variável manipulada ($m(t)$). O controle por realimentação age no erro entre a variável manipulada ($m(t)$) e a variável controlada ($c(t)$). Este deve ser visto como uma estratégia de controle reativa que espera até o sistema ser perturbado ($p(t)$), para depois tomar as ações corretivas. (SMITH; CORRIPIO, 1997 apud SILVA, 2011, p. 23).

2.2 CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL (PI)

De certa maneira, quando o desempenho de um projeto não é realizado apenas com um sistema de malha fechada, um controlador ou compensador deve ser usado. Controladores são usualmente escolhidos dentro dos seus tipos básicos de estrutura, o que facilita a análise do seu comportamento e o projeto dos seus

parâmetros (MATIAS, 2002, p. 19). Geralmente, quanto mais complexa é a estrutura do controlador maior o número de parâmetros e suas complexidades.

Para processos industriais, a partir de experimentos (procedimentos estatísticos, filtragem dados, etc.) é possível obter dados para o desenvolvimento de modelos matemáticos. O modelo final é representado pela função de transferência, uma forma conhecida da relação existente entre os sinais de entrada e saída (COELHO; COELHO, 2004).

Sendo assim, o bloco controlador é necessário em sistemas que utilizam controle de malha fechada, possibilitando que haja ajustes de acordo com as necessidades do sistema. Dessa forma, pode-se ter quatro configurações possíveis de controladores a partir de uma estrutura proporcional, integral e derivativo.

- Controlador Proporcional;
- Controlador Proporcional-Integral;
- Controlador Proporcional-Derivativo;
- Controlador Proporcional-Integral-Derivativo.

De acordo com Ferreira (2016) os efeitos causados em um sistema de controle procedentes das ações dos processos de configurações proporcional, integral e derivativo seguem abaixo.

- **Ação proporcional (P):** Acelera a resposta de um sistema controlado, utilizando o erro como variável de controle.
- **Ação integral (I):** Melhora a resposta do sistema em regime permanente, aumentando a precisão da resposta do sistema de controle.
- **Ação derivativa (D):** Atua essencialmente sobre a resposta transitória do sistema.

2.2.1 Controlador Proporcional

O controlador proporcional (P) é aquele que simplesmente fornece uma relação linear (ganho K) entre o valor da variável controlada ($R(s)$) e a variável manipulada ($Y(s)$), onde a função transferência ($G(s)$) é dada pela Equação (1).

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = K \quad (1)$$

A vantagem do controlador proporcional é de ser muito simples. Neste, o aumento do ganho K tende a diminuir os erros em regime permanente, porém seu aumento excessivo pode levar o sistema a instabilidade e ampliar os ruídos.

2.2.2 Controlador Proporcional-Integral

O controlador Integral (I) puro tem por finalidade de reduzir ou até eliminar os erros estacionários de um controle, através de uma integral do valor do erro no tempo, obtendo um reajuste (MATIAS, 2002, p.20). Na Equação (2) é descrita a equação de um controlador integral.

$$u(t) = K \int e(t) dt \Rightarrow G(s) = \frac{K}{s} \quad (2)$$

Onde:

$u(t)$: o sinal de controle

e : o erro gerado pelo sinal de saída e de entrada.

t : tempo

K : é o ganho proporcional.

Na prática, o controle integral é utilizado em conjunto com o controle proporcional formando o controle proporcional – integral (PI). Sua ação é dada pela Equação (3).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \Rightarrow G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3)$$

onde:

$R(s)$: variável de entrada

$Y(s)$: variável de saída

K_p : ganho proporcional

K_i : ganho integral

T_i : tempo de integrador atingir o valor K_p

A ação integrativa acelera o movimento do processo em direção à referência, diminuindo (ou até eliminando) o erro residual que ocorre quando usa-se o controlador somente proporcional (OGATA,2003, p. 55).

Dessa forma, o objetivo do trabalho é voltado para identificação do parâmetros de malha de mistura, assim o embasamento sobre controladores fica destacado no controlador PI.

2.3 REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL E SISTEMA DE SUPERVISÃO

Redes industriais são estruturas de comunicação digital que permitem a troca de informações entre diferentes equipamentos/componentes computadorizados no ambiente industrial. Sua arquitetura deve fazer com que os sinais trafeguem desde o chão de fábrica até o nível de informação gerencial (LUGLI; SANTOS, 2011).

Os protocolos de comunicação se caracterizam por promover a troca de informações entre todo o sistema de automação da empresa, viabilizando a comunicação entre os módulos de entrada e saída do sistema de controle, os sistemas de supervisão, dados de diagnósticos, sensores, atuadores e elementos de campo de um modo geral (SILVEIRA; SANTOS, 1998).

Criado em 1989, o *Profibus* é um protocolo de comunicação de sistema aberto e abrange uma larga escala de aplicações na indústria, principalmente no setor de manufatura e de controle de processos. Para cabeamento, utiliza-se cabos de cobre ou de fibra de vidro (ALTUS, 2013).

É um protocolo totalmente independente de um fabricante específico e com um sistema de comunicação padronizado e assegurado pelas normas internacionais.

O protocolo *Profibus* é subdividido em três grupos, a família *Decentralized Periphery* (DP), *Process Automation* (PA) e *Fieldbus Message Specification* (FMS). A Figura 3 mostra a arquitetura da rede *Profibus* (SMAR, 2015, p. 21).

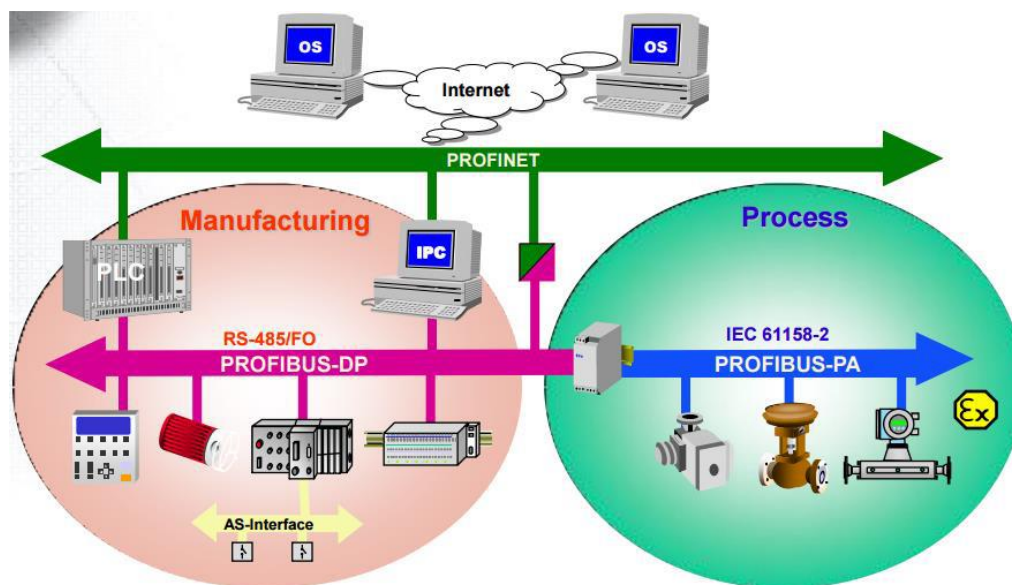


Figura 3 - Redes de Comunicação *Profibus* e suas aplicações.
Fonte: (SMAR, 2015).

Na Planta Didática Industrial existe o controlador (DF95) que é multifuncional e tem a capacidade gateway PROFIBUS- HSE (*High Speed Ethernet*). Dessa forma, esse controlador usa um canal PROFIBUS-DP e dois canais PROFIBUS-PA, onde há uma comunicação entre esses dois tipos (SILVA, 2011, p. 48).

2.3.1 Sistema de supervisão

Sistemas supervisórios são sistemas digitais de monitoramento e operação da planta que gerenciam variáveis de processo. Estas são atualizadas continuamente e podem ser guardadas em bancos de dados locais ou remotos para fins de registro histórico (MORAES; CASTRUCCI, 2007).

Os primeiros sistemas supervisórios, também chamados de SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisiton*), permitiam informar periodicamente o estado atual do processo industrial, monitorando sinais representativos de medidas, como também, estados dos dispositivos através de um painel com lâmpadas e

indicadores, sem que houvesse qualquer interação com o usuário/operador (SOUZA, 2005).

Atualmente, as redes de automação são largamente utilizadas, apresentando vantagens em relação aos sistemas convencionais de cabeamento: redução da fiação, facilidade de manutenção, flexibilidade na configuração da rede e, principalmente, diagnósticos dos dispositivos (MORAES; CASTRUCCI, 2007).

2.4 MÉTODOS HEURÍSTICOS

Os métodos heurísticos são de grande importância para a pesquisa de quantificação de proximidade de determinados objetivos. Esses métodos foram elaborados para gerar soluções factíveis para problemas complexos e de grandes dimensões, para os quais os algoritmos de soluções exatas não são suficientes para gerar soluções. (SUCUPIRA, 2004, p. 2).

A metaheurística é uma subárea da heurística, cuja finalidade é a otimização estocástica. Para Luke (2009) a metaheurística é a classe geral de algoritmos e técnicas que empregam algum grau de aleatoriedade para encontrar soluções tão ótimas quanto possível para problemas reconhecidamente difíceis.

As metaheurísticas de melhoria ou refinamento são técnicas de busca local que iniciam como uma solução factível (gerada por um método heurístico ou aleatório) e melhoram com intercalações ou trocas de vizinhança. Além da busca local, existe também a busca populacional, onde um conjunto de soluções factíveis pode ser re combinado para produzir soluções ainda melhores (COSTA, 2011).

A finalidade de se utilizar um método computacional heurístico é encontrar, preferencialmente, a melhor solução para um problema proposto. Ou seja, dada uma função objetivo (FO), deseja-se maximizar ou minimizar os seus resultados (GUEDES, 2014, p. 30).

Este subcapítulo tem como finalidade introduzir o embasamento teórico sobre a definição de Algoritmo Evolutivo (AE), com ênfase em algoritmo Evolutivo Diferencial, do inglês *Differential Evolution* (ED).

2.4.1 Algoritmo Evolutivo

Os Algoritmos Evolutivos (AE) são métodos naturais e genéticos que utilizam apenas as informações da função a ser otimizada, buscando o valor ótimo através de regras de probabilidade e operando de maneira estocástica, desvinculando-se das derivadas utilizadas nos métodos determinísticos.

Para Delbem, (2008) os Algoritmos Evolutivos são métodos baseados na teoria da evolução e genética e que são capazes de se adaptar a problemas de diversas naturezas, sempre visando encontrar soluções factíveis.

Como mencionado anteriormente, o AE é baseado no mecanismo de seleção natural e genética de populações, onde os indivíduos melhores qualificados trocam informações genéticas em uma estrutura heurística de busca (LINDEM, 2008).

Para melhor esclarecimento do AE é necessário conhecer alguns termos referentes à sua nomenclatura. Desse modo, os termos são definidos da seguinte maneira: os indivíduos que formam uma população são denominados cromossomos (computacionalmente são os vetores); um cromossomo é composto por genes (elementos de um vetor), onde cada valor do gene é chamado de alelo e cada posição deste é chamado de *locus* (GUEDES, 2014, p. 31 apud PACHECO, 1999).

As populações (grupo de cromossomos) são os genótipos e seus atributos são os fenótipos. Cada um desses indivíduos possui um valor correspondente a quão apropriada é a sua solução para um determinado problema, denominado de *fitness* (PACHECO, 1999).

A seguir, na Tabela 1, está representada a analogia do AE com o sistema biológico.

Tabela 1 - Analogia entre um Algoritmo Evolutivo e o sistema natural.

Natureza	Algoritmo Evolutivo
Cromossomo	População, vetor
Genes	Elementos do vetor
Alelo	Valor no vetor
Loco	Posição no vetor
Genótipo	Estrutura
Fenótipo	Estrutura submetida ao problema

Fonte: Adaptada de Pacheco, 1999, p.2

2.4.2 Evolução Diferencial

Dentre os Algoritmos Evolutivos destaca-se a Evolução Diferencial desenvolvido por *Storn e Price* (1995), sendo que sua abordagem tem uma configuração um pouco diferente em relação à busca por soluções factíveis se comparado com algoritmos genéticos (OLIVEIRA, 2006).

A diferença do ED para o AE ocorre no cruzamento e na mutação. O ED sugerido por Price (1995), tem como seu método utilizar as diferenças entre os vetores como uma perturbação à população (candidatos a solução). Logo as características mais significantes dessa técnica são: ter poucas variáveis de controle e ser de rápida convergência (STORN, 2006).

Algumas características da otimização numérica do ED são (SANCHES, 2013 apud CHENG, 2001).

- Busca estocástica originária da seleção natural;
- Difícilmente fica preso em ótimos locais, porque busca a solução ótima global manipulando uma população de soluções, ou seja, busca soluções simultaneamente em vários espaços de busca;
- Eficaz em soluções de problemas de otimização com função objetivo descontínua, pois não requer informações sobre as suas derivadas;
- Permite que os parâmetros de entrada e saída sejam manipulados com números ordinários reais, que gera mais eficiência nos recursos computacionais;
- Eficaz com populações pequenas;
- Se comparado com o algoritmo genético, o ED tem seus resultados obtidos em menor tempo, devido ao seu cruzamento e mutação.

O ED tem um princípio de funcionamento que pode ser dividido em quatro etapas. A primeira etapa corresponde à geração da população inicial, obtida por meio de uma seleção aleatória de N_p indivíduos, e logo a partir dessa primeira população o *fitness* já é calculado. Em seguida, na segunda etapa, a mutação gera uma outra população, denominada população mutada. Tal população é determinada através da adição da diferença vetorial ponderada entre dois indivíduos aleatórios da

população a um terceiro indivíduo, sendo todos os três indivíduos selecionados aleatoriamente da população N_p . Dessa forma, são gerados os vetores modificados (vetor doador).

Matematicamente, o processo de mutação pode ser representado de acordo com a equação (4).

$$V_{i,q+1} = X_{\alpha,q} + F * (X_{\beta,q} - X_{\gamma,q}) \quad (4)$$

Na equação (4), $V_{i,q+1}$ corresponde ao elemento q da população mutada $q+1$, os termos $X_{\alpha,q}$, $X_{\beta,q}$ e $X_{\gamma,q}$ são os três indivíduos selecionados aleatoriamente da população inicial V , F é um fator de ponderação aplicado na diferença ponderada, e seu valor varia entre 0 e 1, e significa o tamanho do passo a ser dado na direção dessa diferença.

A terceira etapa é o cruzamento (*crossover*), a combinação entre o indivíduo da população inicial (vetor alvo) com o indivíduo da população mutada (vetor doador), originando uma população experimental. O critério desse cruzamento é feito por comparação conforme mostrado na Equação (5).

$$U_{i,q+1} = \begin{cases} V_{i,q+1}, & \text{se } ri \leq CR \\ X_{si,q}, & \text{se } ri > CR \end{cases} \quad (5)$$

O “ ri ” é um número gerado aleatoriamente com resultado no intervalo 0 a 1, X_{si} são componentes do vetor alvo X_s , V_i são componentes do vetor doador V , CR é a probabilidade do cruzamento ocorrer, representa a probabilidade do vetor experimental herdar os valores das variáveis do vetor doador, e está compreendido entre 0 e 1, sendo fornecido pelo programador.

Por fim, a quarta etapa é a fase de seleção onde um teste é feito sobre a população gerada. Se o custo do vetor experimental for menor que o custo do vetor alvo, então o vetor experimental será escolhido para próxima geração, caso contrário o vetor alvo continua como próxima geração. A Figura 4 ilustra o fluxograma do DE.

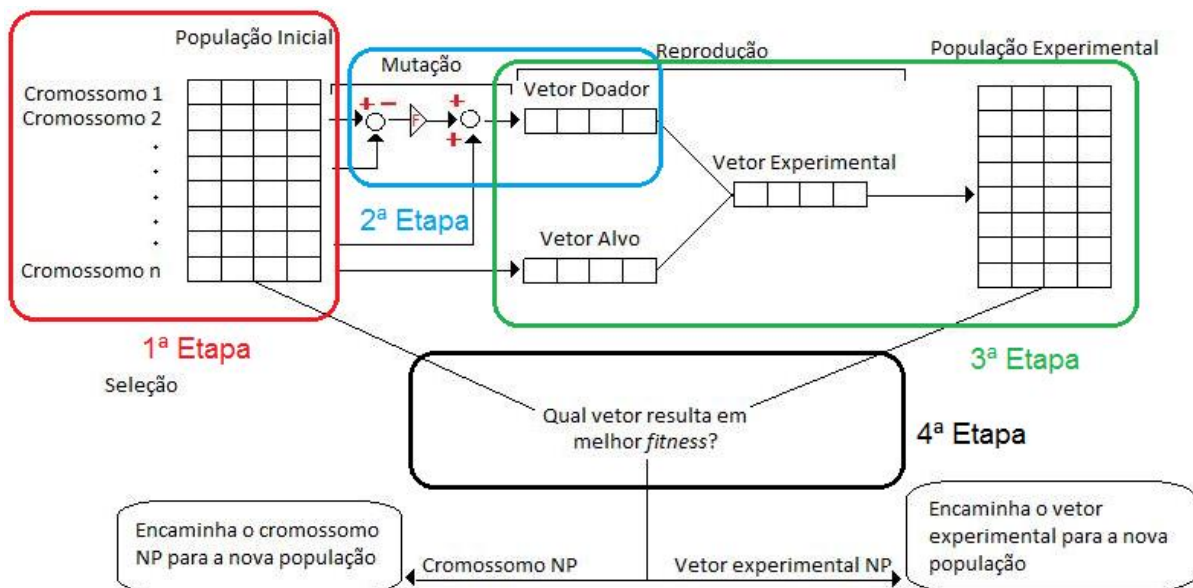


Figura 4 - Fluxograma do ED.
 Fonte: Rodrigues (2016, p. 16).

O procedimento é finalizado através de um critério de parada, o qual pode ocorrer por um número máximo de iterações ou encontrar o valor dentro de uma precisão pré-determinada.

Dessa forma, a perspectiva de usar um código do algoritmo ED para buscar parâmetros eficientes para um sistema de controle industrial abre um leque de possibilidades para identificação de sistemas de automação.

3. ARQUITETURA DA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL

Nesta seção, são apresentadas algumas características da Planta Didática Industrial.

3.1 PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL

A Planta Didática Industrial é uma ferramenta de ensino que permite que o meio acadêmico tenha uma visão mais clara e prática sobre a automação e controle industrial. Está localizada no laboratório de instrumentação e processamento de sinais na sala G103 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Cornélio Procópio (UTFPR-CP).

A Planta Didática Industrial ilustrada na Figura 5, tem uma arquitetura fundamentada em um sistema físico real de escala reduzida, no qual seu funcionamento demonstra diversas operações de malhas de controle. Suas aplicações simulam dois processos industriais, um de aquecimento e um de mistura de água.

Através de seus registros, a Planta Didática Industrial permite ao usuário realizar mudanças nos valores internos dos equipamentos e nos modos operacionais das malhas de controle, podendo ser operada de uma ou várias estações (SMAR, 2015, p. 13).



Figura 5 - Planta Didática Industrial SMAR 3.
Fonte: Smar (2015, p 1).

No processo de aquecimento da água que é realizado através de um conversor de potência, é fornecida energia para o aquecimento de resistências localizadas no interior de um tanque. Dessa forma, por meio da relação da vazão de água fria que entra no tanque um controlador decide enviar mais ou menos potência para as resistências, com objetivo de manter a temperatura constante (SMAR, 2015, p. 29).

No segundo processo (de mistura), a água quente proveniente do tanque de aquecimento (Tanque 1) e a água que vem do reservatório se misturam. Dessa maneira, é possível fazer um controle da temperatura da água do tanque de mistura.

Na Figura 6, o processo do lado esquerdo é o processo de aquecimento da água e o do lado direito é o processo de mistura.

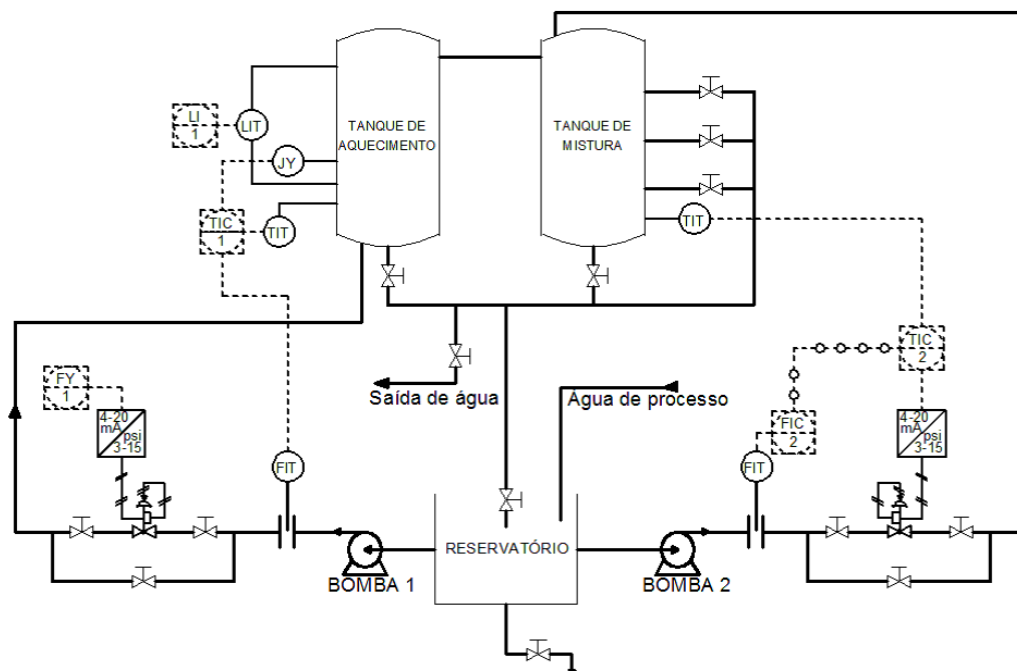


Figura 6 – Diagrama de tubulação e instrumentação da Planta Didática Industrial.
Fonte: Silva (2011, pág. 48).

3.2 ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO E CONTROLE

A arquitetura de comunicação e controle da Planta Didática Industrial está fundamentada entre as tecnologias de um controlador *Profibus* (DF95) e um controlador lógico programável (DF75).

O controlador *Profibus* (DF95) atua nos instrumentos de campo como válvulas de controle, transmissores de temperatura, transmissores de vazão e controladores PID. Esse controlador tem uma característica multifuncional com capacidade de *gateway Profibus-HSE (High Speed Ethernet)*, que elimina a necessidade de acopladores DP/PA, pois possui um canal *Profibus-DP* e dois canais *Profibus-PA*, permitindo a comunicação entre os dispositivos de campo do tipo *Profibus-DP* e *PA* (SILVA, 2011, p.48).

O DF75 é um controlador HSE do tipo controlador lógico programável (CLP) que tem como seu principal objetivo o intertravamento e controle discreto, que atua sobre os acionamentos das bombas, sensores de níveis, alarmes e sinalizações do painel (SMAR, 2015, p. 23).

A Figura 7 apresenta a arquitetura de comunicação da planta.

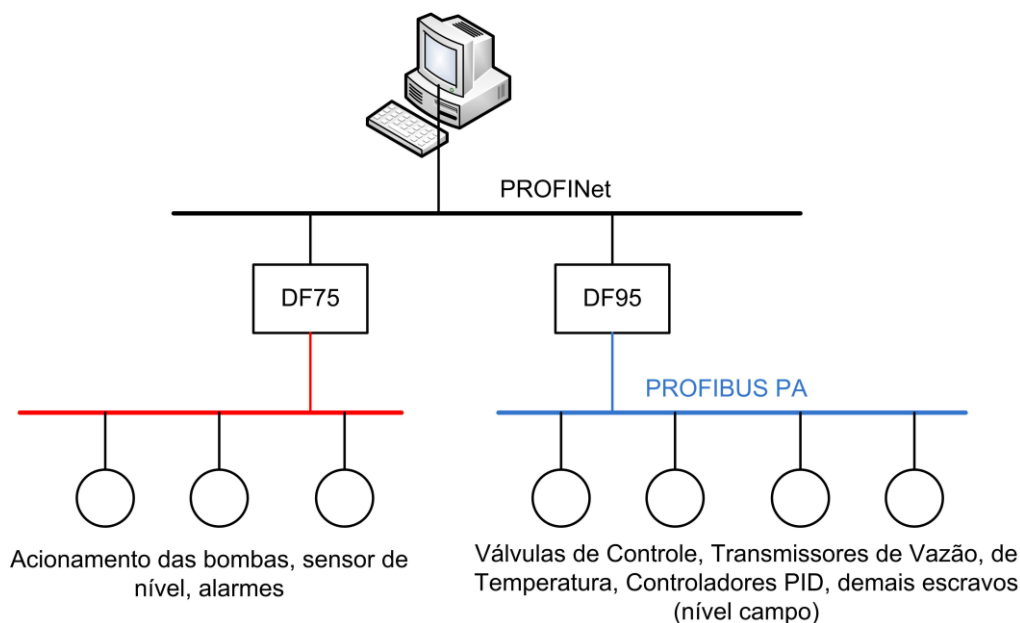


Figura 7 - Arquitetura de comunicação da Planta Didática Industrial.
Fonte: Silva (2011, pág. 48).

3.2.1 Sistema de Automação e Controle

A configuração das entradas e saídas do sistema, comunicação e estratégias de controle são gerenciadas pelo *Studio302*, ferramenta que integra todos os aplicativos disponíveis no sistema de automação industrial da Planta Didática Industrial, o *System302* (SMAR, 2015, p.31).

O *System302* é um sistema de controle de processos que centraliza o gerenciamento de processos e dispositivos. Esse sistema possui uma infraestrutura embasada em *Ethernet*, conseqüentemente é possível a utilização de protocolos de comunicação padronizados e não-proprietários, como o HSE – *High Speed Ethernet*. (SMAR, 2015, p. 32). A conectividade com a Internet/Intranet gera a vantagem de um gerenciamento de unidades a partir de uma sala de controle central

3.2.2 Sistema de Supervisão

Para o Planta Didática Industrial o sistema de supervisão é o *ProcessView*, integrado ao *System302*, esse programa tem como características efetuar a aquisição de dados dos equipamentos e apresentar as informações da malha de controle através de telas gráficas e ilustrações, isso pode ser feito com o sistema já funcionamento (SMAR, 2015, p. 21).

O *ProcessView* é baseado na arquitetura *OLE for Process Control* (OPC) e Cliente/Servidor destinadas a interface-homem-máquina (IHM) bem como supervisão e controle de processos. A Figura 8 representa a tela de supervisão e controle das topologias de controle por antecipação, controle por retroalimentação e a Figura 9 a tela de supervisão e controle da topologia de controle em cascata.

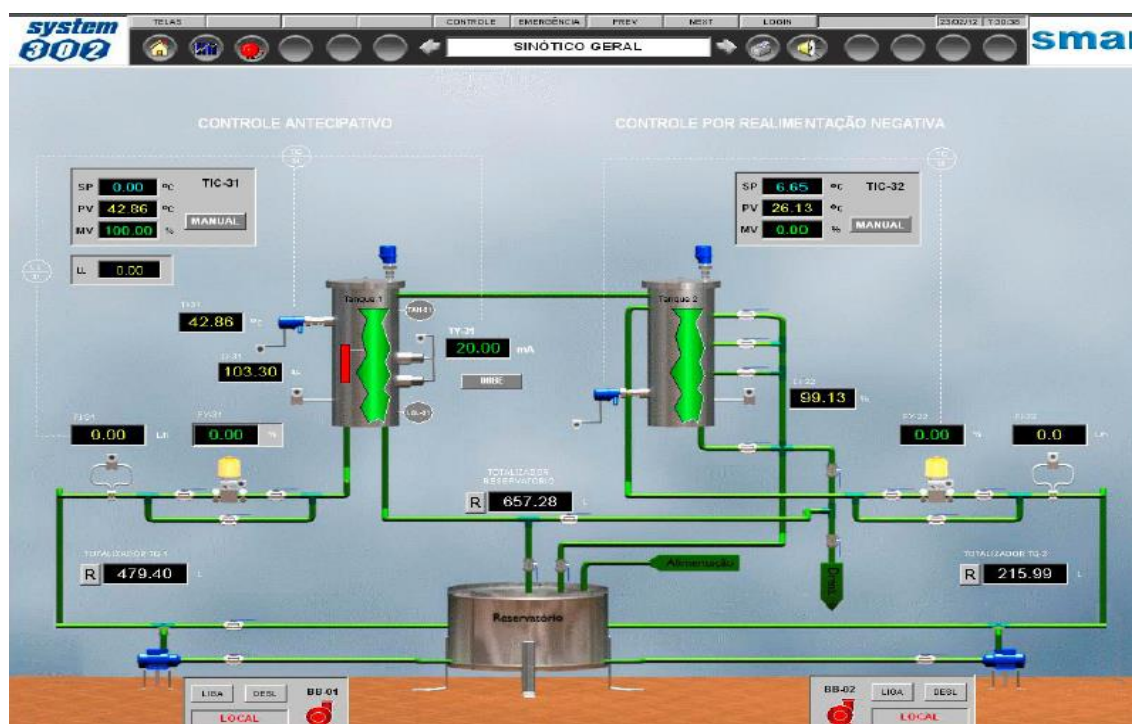


Figura 8 - Tela de supervisão de controle para as topologias de controle de antecipação e controle por realimentação.
Fonte: Smar (2015, p. 28).

Esses programas foram construídos em ambiente *Microsoft Windows*, o que facilita ao usuário devido à familiaridade com a plataforma e a troca de informações com outros aplicativos *Windows* devido à presença do OPC, garantindo a padronização dos dados a serem trocados (SMAR, 2015, p. 33).

Dentre os softwares componentes do *ProcessView* destacam-se o *GraphWorX* que é utilizado na criação de telas animadas, o *TrendWorX* que é destinado à coleta de dados em tempo real, o *AlarmWorX* que é utilizado no gerenciamento global de alarmes e eventos ocorridos na planta (SILVA, 2011, p. 50).

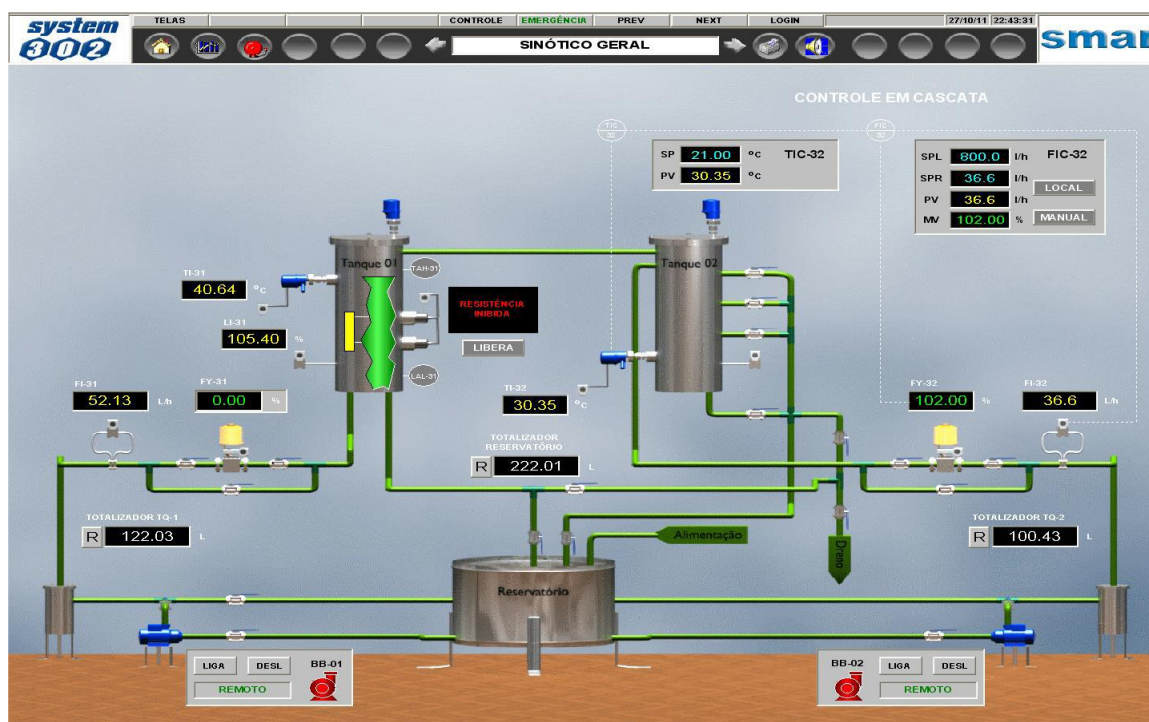


Figura 9 - Tela de supervisão de controle para as topologias de controle em cascata.
Fonte: Smar (2015, p. 29).

3.3 TOPOLOGIAS DOS CONTROLADORES

Nesta seção serão apresentadas as topologias dos controladores implementadas na Planta Didática Industrial, onde se encontram as topologias de controle por antecipação, controle por realimentação e controle em cascata, estas utilizam, cada uma, um controlador PID.

3.3.1 Controle de Antecipação

Controle por antecipação é um modelo que descreve um tipo de sistema que reage a perturbações com a finalidade de manter algum estado desejado de um sistema. O objetivo deste controle, é medir perturbações, e compensá-las sem que a variável de controle desvie de seu valor de *setpoint*. Logo, os desvios da variável de controle são minimizados (SMITH; CORRIPIO, 1997).

Na Planta Didática Industrial o controle por antecipação é executado no tanque de aquecimento, onde seu objetivo é manter a temperatura do tanque sempre com um valor constante pretendido. Com a principal malha sendo a de

temperatura, este controle é responsável por enviar energia para um grupo de resistências elétricas que irão aquecer a água deste tanque.

Após efetuar o controle, esta malha recebe um ganho proveniente da vazão de água, que acelera a demanda de potência necessária para manter a temperatura constante. Essa estratégia garante que as variações provocadas pela entrada no tanque de aquecimento tenham respostas rápidas (SILVA, 2011, p.52).

A Figura 10 e 11 representam os diagramas de instrumentação/tubulação da Planta Didática Industrial e o diagrama de blocos dessa topologia de controle, respectivamente.

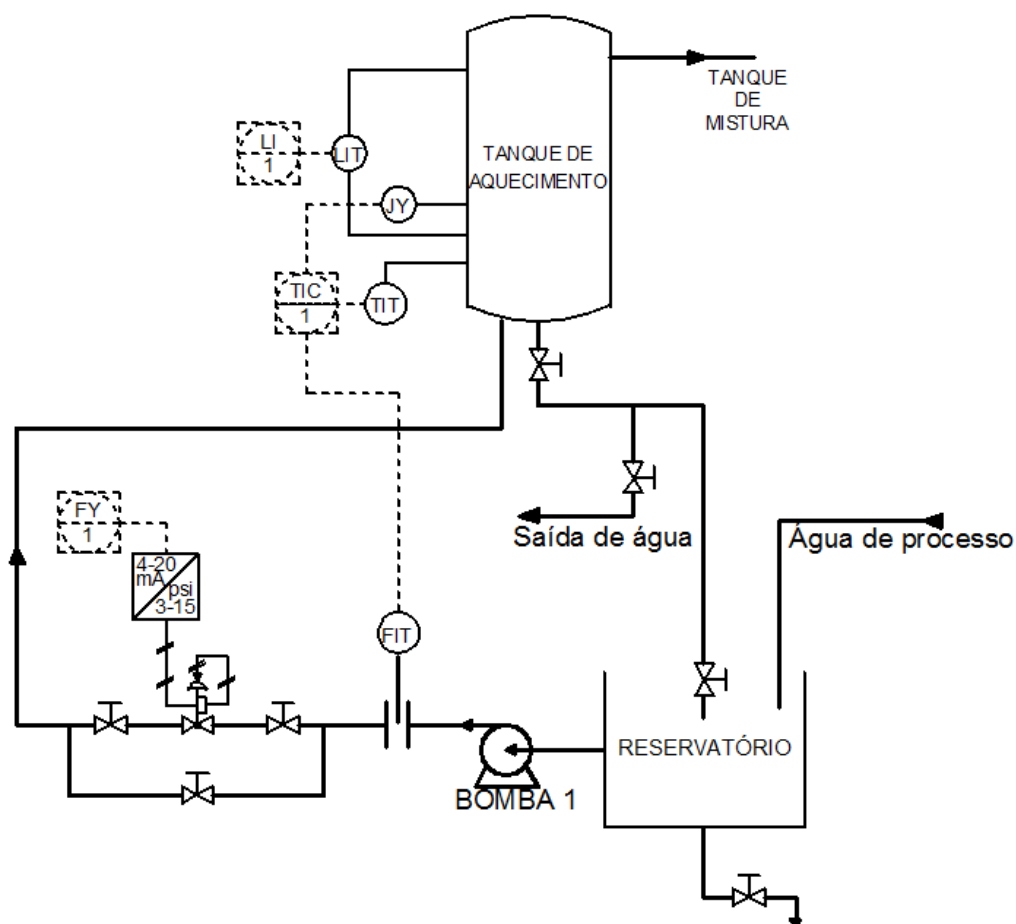


Figura 10 - Diagrama de instrumentação/tubulação da topologia de controle por antecipação.

Fonte: Silva (2012, p.52).

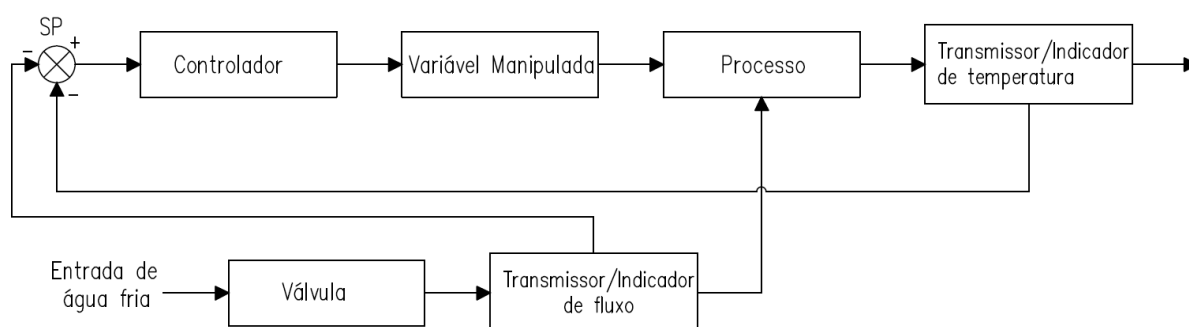


Figura 11 - Diagrama de blocos com controle por antecipação no tanque de aquecimento.
Fonte: Silva (2012, p.53).

3.3.2 Controle de Realimentação

Realimentação é a propriedade do sistema de malha fechada a qual permite que a saída (ou alguma variável controlada do sistema) seja comparada com a entrada do sistema (*Setpoint*). Dessa maneira, esse sistema faz com que o controlador atue na diferença (erro) entre o valor de *setpoint* o de saída (OGATA,2003, p. 9).

Essa estratégia na planta é feita na malha principal de mistura. O objetivo é manter a temperatura constante, através do controle da vazão de água fria a qual entra nesse tanque e se mistura com a água quente do tanque (SILVA, 2012, p. 54).

A temperatura é medida e comparada com o valor de *setpoint* desejado, então o controlador envia o sinal para aumentar ou diminuir a vazão de água fria (abrindo ou fechando a válvula). Nas Figuras 12 e 13 são mostrados o diagrama de tubulação e instrumentação e o diagrama de blocos dessa topologia de controle, respectivamente.

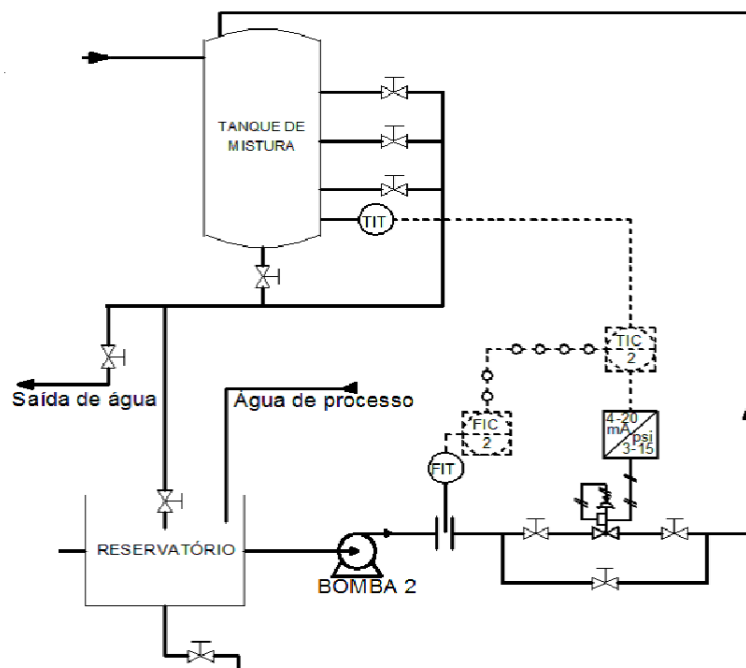


Figura 12 - Diagrama de tubulação e instrumentação da topologia do controlador por realimentação da Planta Didática.
 Fonte: Adaptação da Silva, 2011, p. 48.

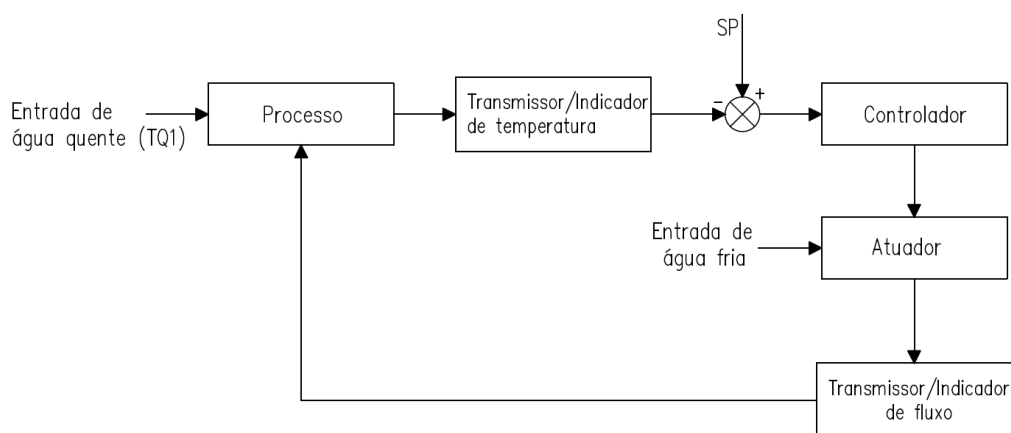


Figura 13 - Diagrama de blocos com controle por realimentação no tanque de mistura.
 Fonte: Adaptado de Silva (2012, p.53).

3.3.3 Controle em Cascata

O controle em cascata caracteriza-se por tomar uma ação corretiva no sistema após uma perturbação no processo, contudo, antes que a variável de controle primária seja afetada (SMITH; CORRIPIO, 1997). Esse controle é normalmente implementado quando a malha de controle simples já não corresponde satisfatoriamente.

Nesse método, utilizam-se duas malhas de controle com duas variáveis controladas atuando em uma mesma variável manipulada, no qual o *set point* do controlador da malha interna (controlador escravo) é dado pela saída do controlador da malha externa (controlador mestre) (OGATA,2003).

Na Planta Didática Industrial esse controle é aplicado no tanque de mistura (Tanque 2) como uma forma de controlar a temperatura do líquido. A finalidade deste controle é manter a temperatura da água no tanque de mistura respondendo às variações de temperatura da água do tanque de aquecimento. A malha de vazão de água fria recebe como *setpoint*, a saída do controle de temperatura do tanque de mistura provocando assim, a ação da válvula de água fria quando a temperatura for diferente da solicitada (SMAR, 2015, p. 28).

As Figuras 14 e 15 mostram o diagrama de tubulação e instrumentação e o diagrama de blocos que representam essa etapa.

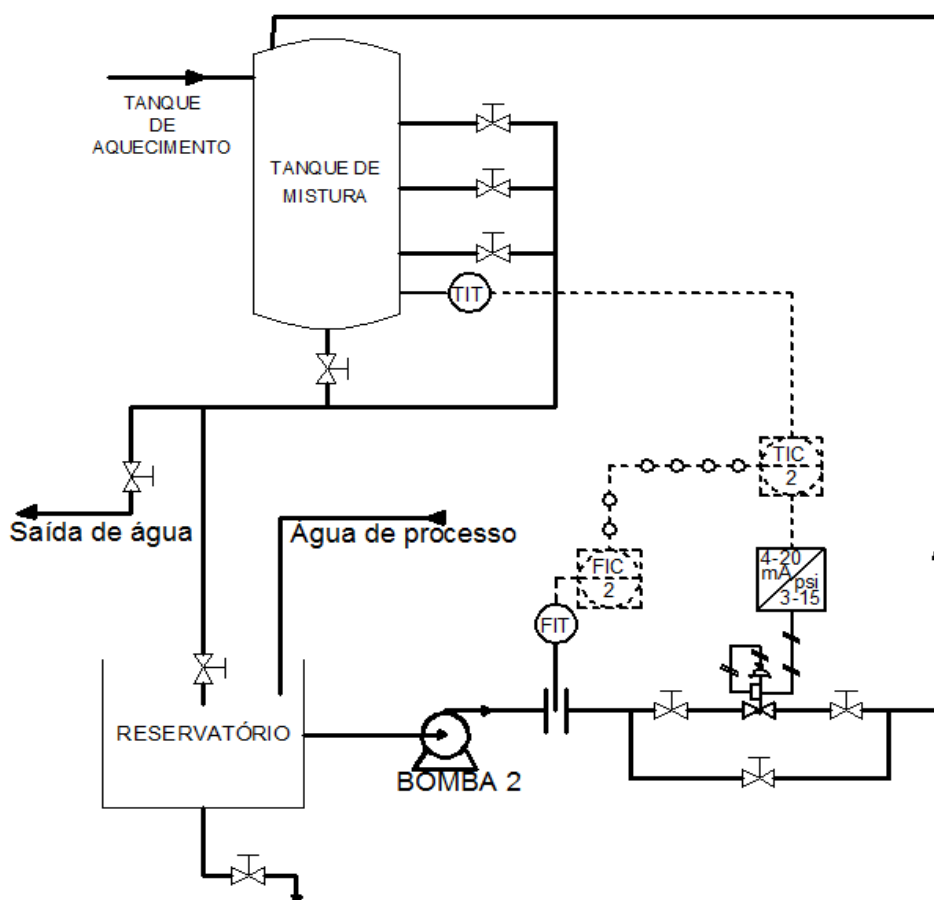


Figura 14 -Diagrama de tubulação e instrumentação da topologia de controle em cascata na Planta Didática Industrial.

Fonte: Adaptado de Silva, 2011, p. 54.

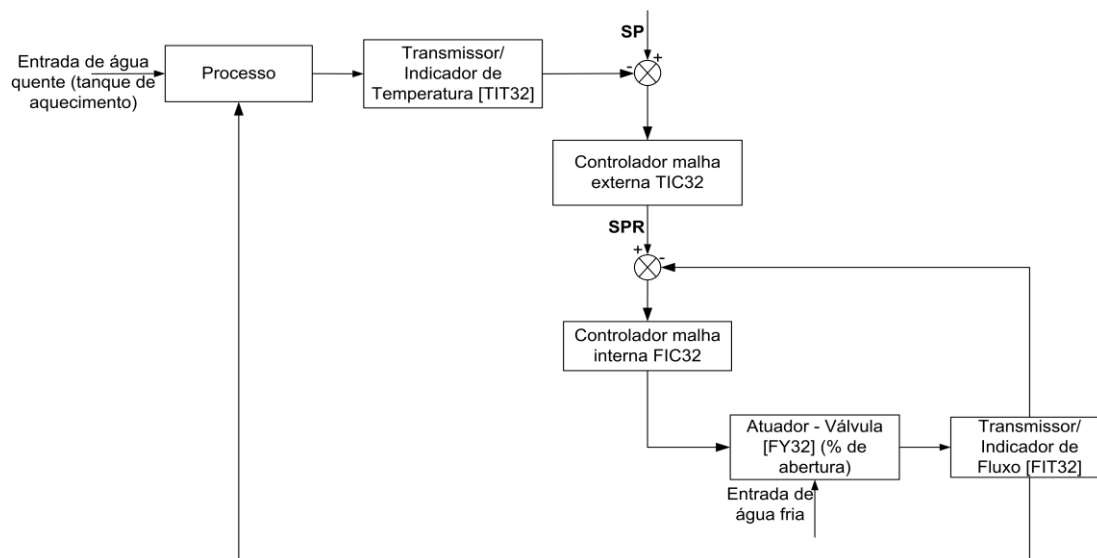


Figura 15 - Diagrama de blocos do Controle em Cascata.
Fonte: Adaptado de Silva, 2011, p. 55.

4. METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DA MALHA DE MISTURA DA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL

Esse capítulo descreve a metodologia utilizada para a realização da aquisição dos parâmetros da malha de mistura da Planta Industrial. Na primeira parte do projeto foi feito um estudo da Planta Didática Industrial em relação a seu princípio de funcionamento, desde a forma correta de ligar, até o processo de aquisição de dados.

Com o conhecimento do princípio de funcionamento da Planta didática Industrial, foram feitos ajustes em seu processo para gerar informações expressivas para esse trabalho. Os processos da planta envolvidos nesse trabalho são de aquecimento e de mistura da Planta Didática Industrial.

4.1 TANQUE DE AQUECIMENTO

A malha de aquecimento em malha aberta tem a sua curva de resposta obtida a partir da porcentagem de abertura da válvula de entrada de água fria. Os ajustes definidos para obter a curva de resposta referente a esse trabalho foram de 10% de abertura de entrada de água fria e o aquecimento das resistências do tanque em 100% da sua capacidade. Por se tratar de um sistema físico real, os valores dos dados selecionados na planta estão sujeitos a variações causadas por diversos fatores, como entrada de ar nas tubulações, troca de calor dos equipamentos, dentre outros.

Dessa maneira, respeitando os limites de funcionamento do processo de aquecimento, definiu-se um valor de temperatura constante de 42°C. Para esse projeto o valor desse processo é considerado ideal. Os indicativos dos valores do tanque de aquecimento estão na Figura 16.

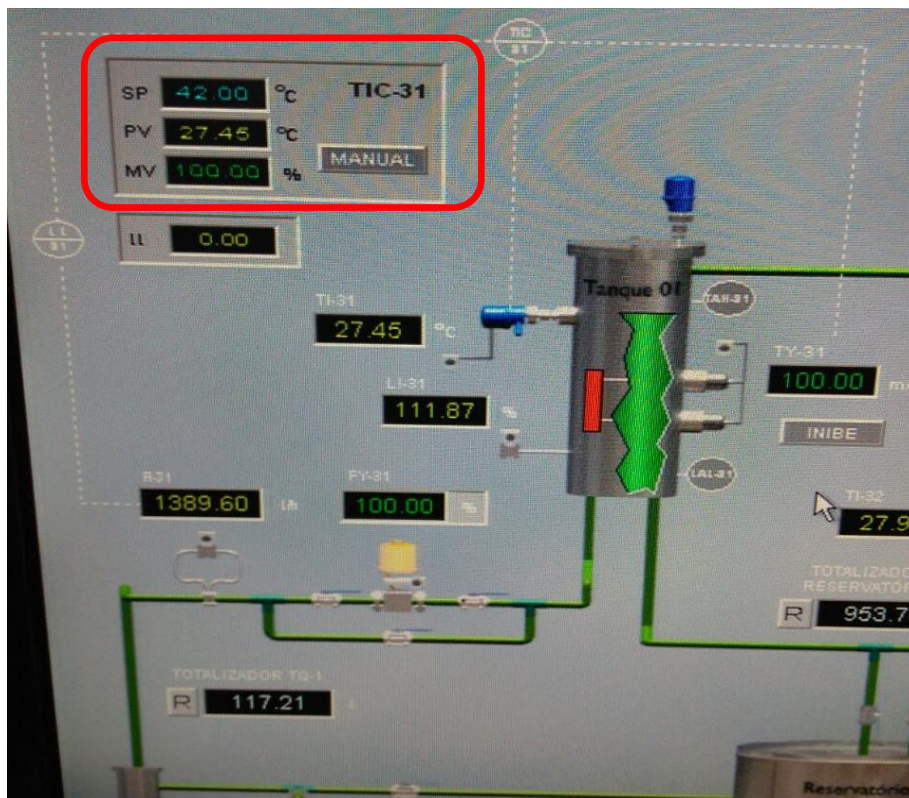


Figura 16 - Supervisão em tempo real do supervisório da malha de aquecimento.
Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 16, SP é o valor da variável controlada (*setpoint*), o PV é o valor medido em tempo real, e MV é a porcentagem de aquecimento das resistências em tempo real.

4.2 TANQUE DE MISTURA

O processo de mistura é o principal processo para a geração de dados. No qual o princípio de funcionamento para a obtenção da sua curva de resposta foi realizado da seguinte maneira. Fixou-se um determinado volume de água (nesse caso $\frac{1}{4}$ da capacidade do tanque 2), esperou a temperatura do tanque 2 entrar em equilíbrio com a temperatura do tanque 1 em 42°C.

Logo, para obter a curva de uma mistura foi selecionado um valor de *setpoint* (36°C) para o tanque de mistura. O controle de vazão de entrada de água do reservatório (água fria) foi selecionado em modo automático, com o objetivo do controlador estabelecer a vazão necessária de entrada de água fria no tanque de mistura.

Determinados fatores são primordiais para que o processo de mistura seja satisfatório. O primeiro é saber que o fluxo de entrada de água aquecida fornecida ao tanque 2 é controlada pela válvula que controla a entrada de água no tanque 1. Para manter estável a temperatura da água de entrada do tanque 2 deve-se manter fixa uma determinada porcentagem de abertura de entrada de água da malha de aquecimento e uma determinada porcentagem de aquecimento, como descrito na seção 4.1. O segundo é a consideração da temperatura ambiente no dia da coleta dos dados, devido o tanque do reservatório ser exposto, nesse caso no dia do teste a temperatura ambiente foi de aproximadamente 25,36°C.

A Figura 17 mostra os valores selecionados para o tanque de mistura no supervisão da planta.

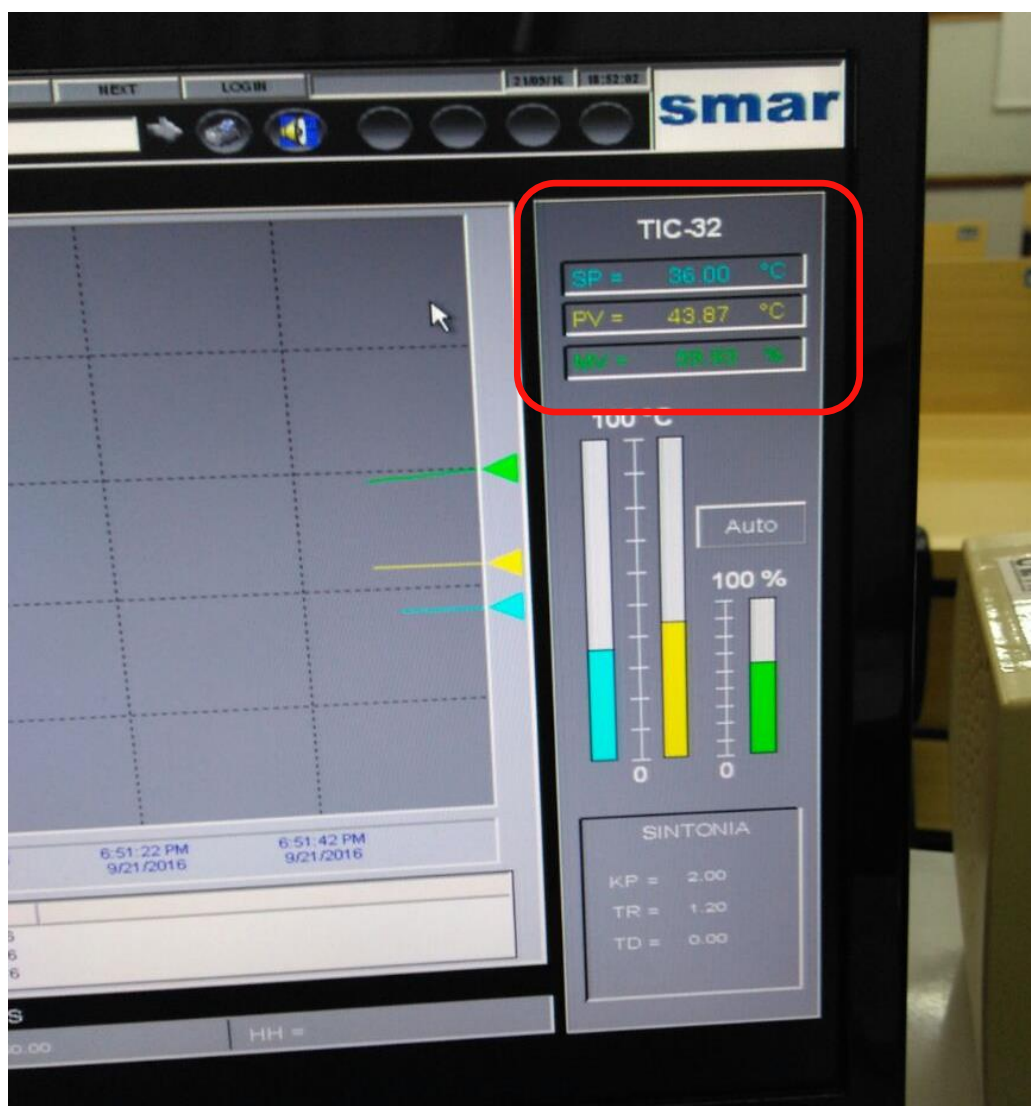


Figura 17 - Supervisão em tempo real do supervisão da malha de mistura.
Fonte: Autoria Própria.

Onde SP é o valor da variável controlada (*setpoint*), o PV é o valor medido em tempo real, e MV é a porcentagem de abertura da válvula de vazão de água fria.

4.3 IDENTIFICAÇÃO DE UM SISTEMA DE MALHA DE MISTURA UTILIZANDO A PROPOSTA DO ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Dentre as várias configurações possíveis de controle da Planta Didática Industrial, buscou-se aquela, que de forma mais simples, pudesse ser eficiente no controle da temperatura do tanque 2.

Aplicada uma perturbação no sistema inicialmente em equilíbrio à 42°C, inicia-se o trabalho do controlador em reconhecer a dada variação e assim aplicar as medidas necessárias afim de se atingir o novo valor desejado de 36°C.

A curva de resposta obtida então pelo processo de mistura é uma resposta ao degrau aplicado. O sistema pode ser descrito pelo diagrama de blocos mostrado na Figura 18.

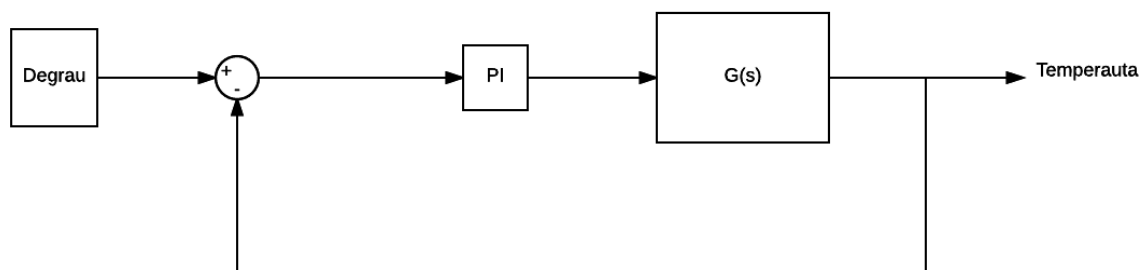


Figura 18 - Diagrama de blocos do sistema de identificação.
Fonte: Autoria própria.

A Equação 6 descreve a função transferência em malha aberta da planta.

$$G(s) = \frac{K}{As^2 + Bs + 1} \quad (6)$$

Onde os coeficientes K , A e B são os parâmetros a serem identificados.

O algoritmo desenvolvido é um aproximador dos parâmetros da função transferência definida, no qual a função objetivo (FO) tem o desempenho de minimizar o erro entre a curva de mistura medida na planta e a curva estimada pelos

parâmetros da função transferência no sistema, ou seja, o *fitness* do ED. O cálculo dessa FO é dado pelo erro de mínimos quadrados. O funcionamento do algoritmo ED é dado a seguir.

Algoritmo DE: Pseudocódigo do ED para estimação dos parâmetros da função transferência.

Entrada de dados: Temperatura do tanque de mistura

(i) INICIO: Declaração das variáveis.

- Tamanho da população;
- Limite do intervalo das variáveis;
- Fator de ponderação (F);
- Taxa de cruzamento (CR);

(ii) PRIMEIRA ETAPA: Criação da população inicial e calcula o *fitness*.

Primeira população: [K, A, B]

Calcula-se o *fitness* de cada indivíduo da população inicial.

Organização a população de acordo com o seu *fitness*.

% Início da Evolução Diferencial (ED)

Quando (*fitness* > *fitness_desejado*), **faça:**

(iii) SEGUNDA ETAPA: Mutação do DE.

Seleciona três indivíduos aleatórios para participar da mutação.

Realiza a diferença vetorial entre o segundo e o terceiro indivíduo selecionado

Aplica o fator de ponderação (F) sobre a diferença

Soma o vetor ponderado com primeiro indivíduo selecionado

Avalia o *fitness* do indivíduo mutado.

Compara com o *fitness* desejado.

(iv) TERCEIRA ETAPA: Crossover.

Executa a equação (5).

Calcula o *fitness* do indivíduo experimental.

(v) QUARTA ETAPA: Critério de seleção

Calcula-se o *fitness* do vetor alvo.

Calcula-se o *fitness* do vetor experimental.

O *fitness* que mais se aproximar é do valor desejado é selecionado.

Gera os valores de K, A e B.

FIM

Na Equação 7 mostra o cálculo do *fitness* relacionado a algoritmo DE.

$$\text{fitness} = \sum_{i=1}^n \frac{(T_{i,\text{med}} - T_{i,\text{sim}})^2}{n} \quad (7)$$

Onde:

T_{med} : é a temperatura medida em cada instante de tempo i .

T_{sim} : é a temperatura simulada em cada instante de tempo i .

n : número de amostras no tempo i .

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os ambientes de coletas de dados da planta industrial, as curvas de respostas do processo identificado e os valores dos parâmetros da função transferência atingidos pelo algoritmo.

5.1 TANQUE DE AQUECIMENTO

Como descrito na seção 4.1 a função do tanque de aquecimento para o projeto é fornecer uma proporção fixa de água constante no valor estabelecido de 42°C. A Figura 19 ilustra o valor medido e a sua média do tanque de aquecimento.

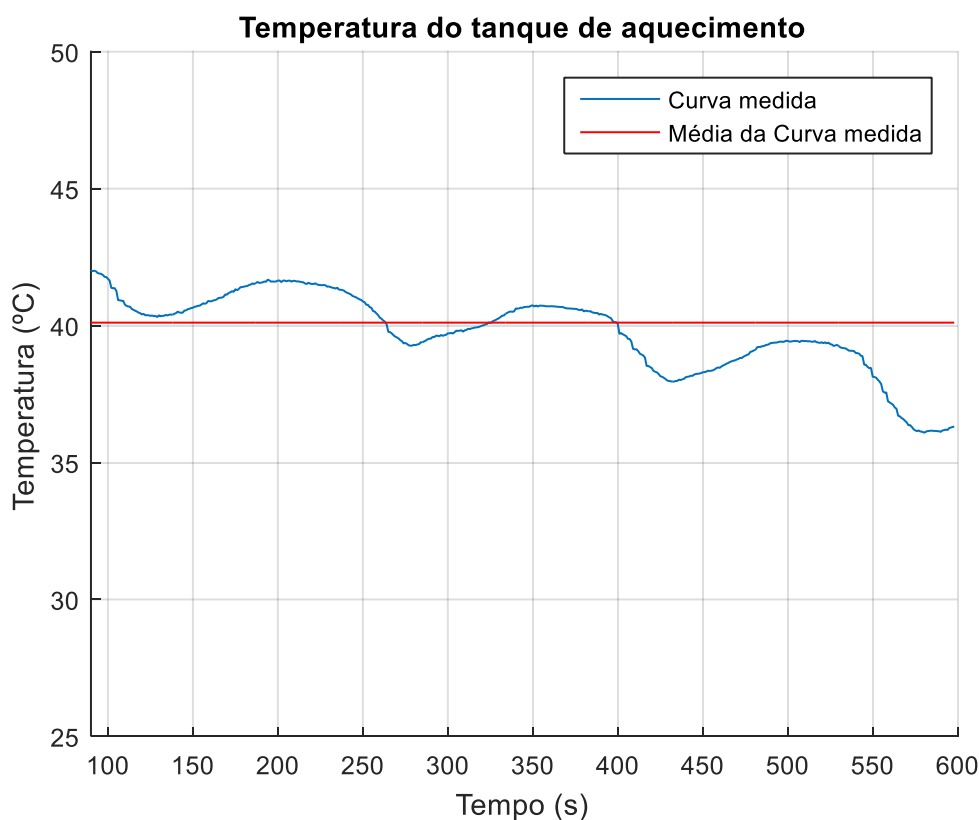


Figura 19 - Curva da temperatura do tanque aquecimento.
Fonte: Autoria própria.

5.2 TANQUE DE MISTURA

No processo de mistura a aplicação realizada com a temperatura inicial de aproximadamente 42°C ($T_0 = 42,35^\circ\text{C}$) praticamente em estado de equilíbrio com o

tanque de aquecimento, o experimento iniciou-se com o propósito de chegar a um novo valor de temperatura selecionado de 36°C. O período de realização do ensaio foi de 10 minutos equivalente à 600 segundos. A Figura 20 mostra a curva da temperatura do tanque de mistura em função do tempo.

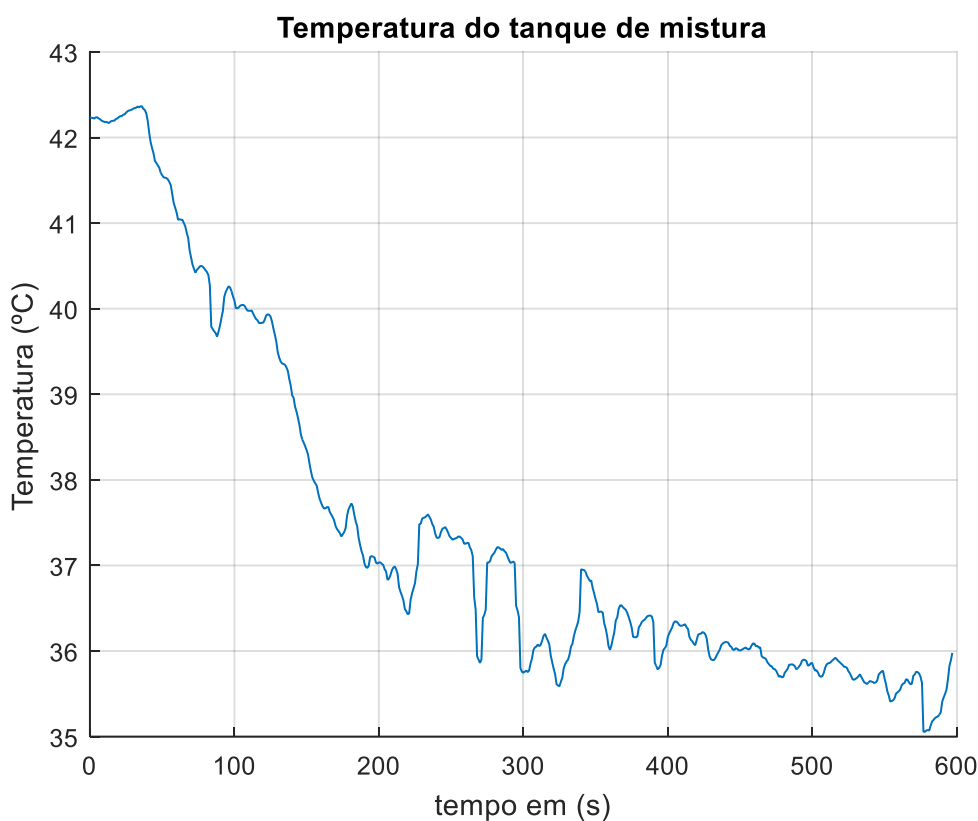


Figura 20 - Curva da temperatura do tanque de mistura.
Fonte: Própria autoria.

Para este caso foi aplicado um degrau de temperatura de 6°C. Para melhor compreensão da curva de resposta, foi realizada uma filtragem e alteração da relação de variação de temperatura pode ser observada na Figura 21. A Figura 22 apresenta uma normalização da resposta frente à aplicação de um degrau unitário

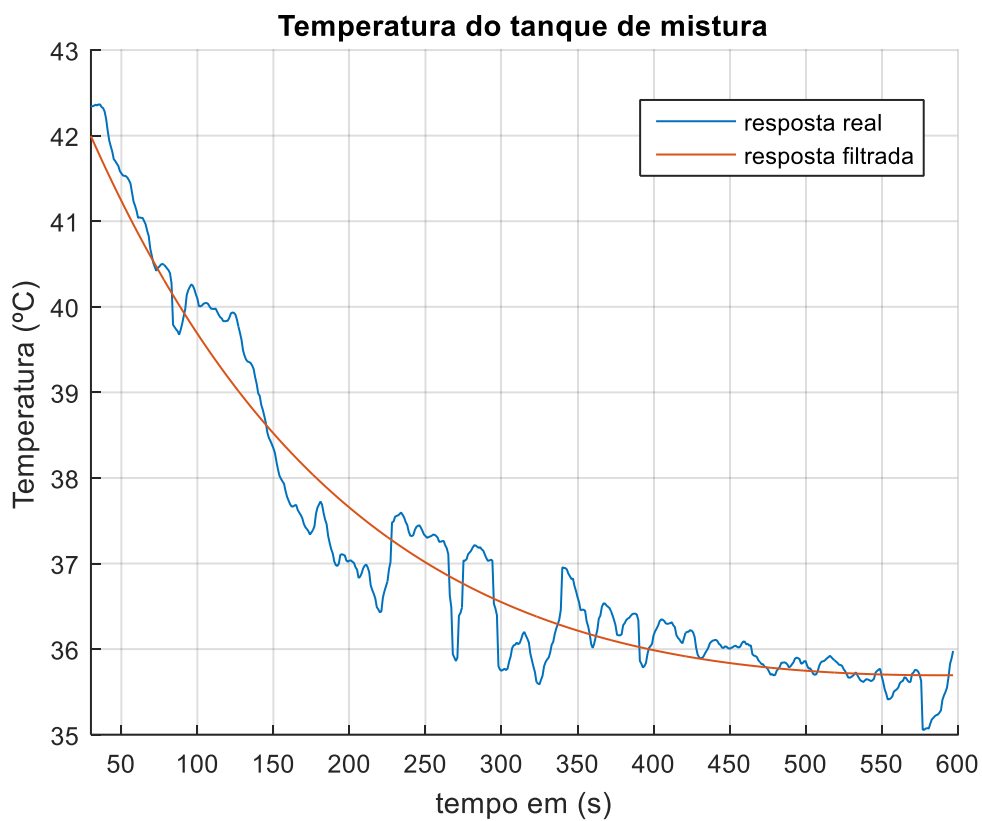


Figura 21 - Curva da temperatura do tanque de mistura com filtro.
Fonte: Própria autoria.

Foi utilizado um filtro para diminuir a forma de ruídos da curva de resposta real. Tendo em vista, que os ruídos dessa curva poderiam dificultar a identificação, ou fazer com a identificação não atingisse uma solução factível para o problema.

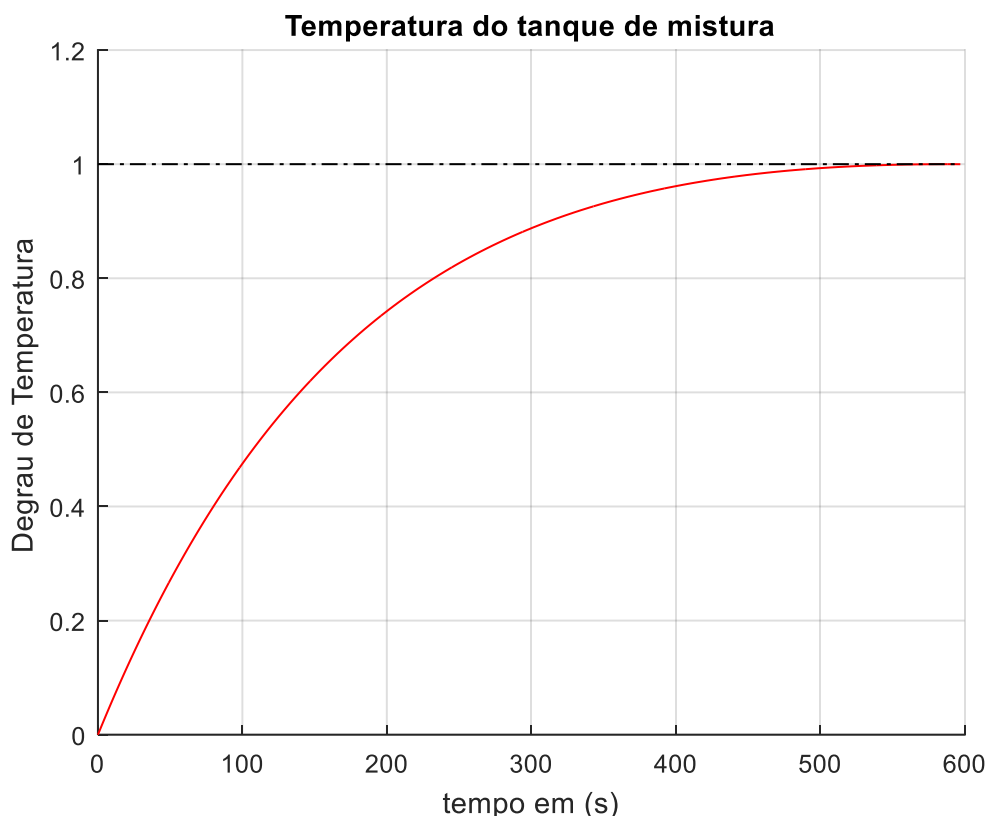


Figura 22 - Variação de temperatura para a malha de mistura filtrada.
Fonte: Própria autoria.

5.3 IDENTIFICAÇÃO DOS COEFICIENTES DA FUNÇÃO TRANSFERENCIA

Para realização da identificação dos coeficientes da função transferência $G(s)$, utilizou o *software Simulink*[®], no qual a topologia utilizada é a da Figura 18. A aplicação da proposta foi feita através de uma comunicação entre o Matlab e o *Simulink*[®], em outras palavras o algoritmo ED gera valores para os coeficientes da função transferência dada por (6) e os transfere para a simulação, logo sua saída é comparada com a curva medida.

Para execução dessas simulações o algoritmo ED foi executado definidos com uma população de 50 cromossomos, quantidade de iterações em 40 e fator de ponderação 0,1 ($F=0,1$).

Para não se desviar do comportamento desejado e ocasionar a instabilidade, foram estipulados limites para os coeficientes da função transferência (K , A e B) indicados na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites estipulados para os coeficientes.
Limites dos coeficientes

$0 \leq K \leq 10$
$25 \leq A \leq 230$
$9 \leq B \leq 90$

Fonte: Própria autoria.

Assim, os melhores parâmetros identificados na função transferência $G(s)$, através do algoritmo DE são indicados na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes da função transferência.

Coeficientes da FT	Resultados
K	1,022
A	96,631
B	132,281

Fonte: Própria autoria.

A execução de todas essas simulações e identificações foram feitas em um sistema com processador Intel core i5, CPU 1,8 GHz e memória RAM de 6GB. O processo de execução teve seu tempo estimado em aproximadamente 70 segundos ou 1 minuto e 10 segundos. Através dessa simulação pode constatar que o maior erro estimado entre a curva medida e a simulada é de 0,0023 ou 0,23%. A Figura 23 mostra a curva medida e a simulada.

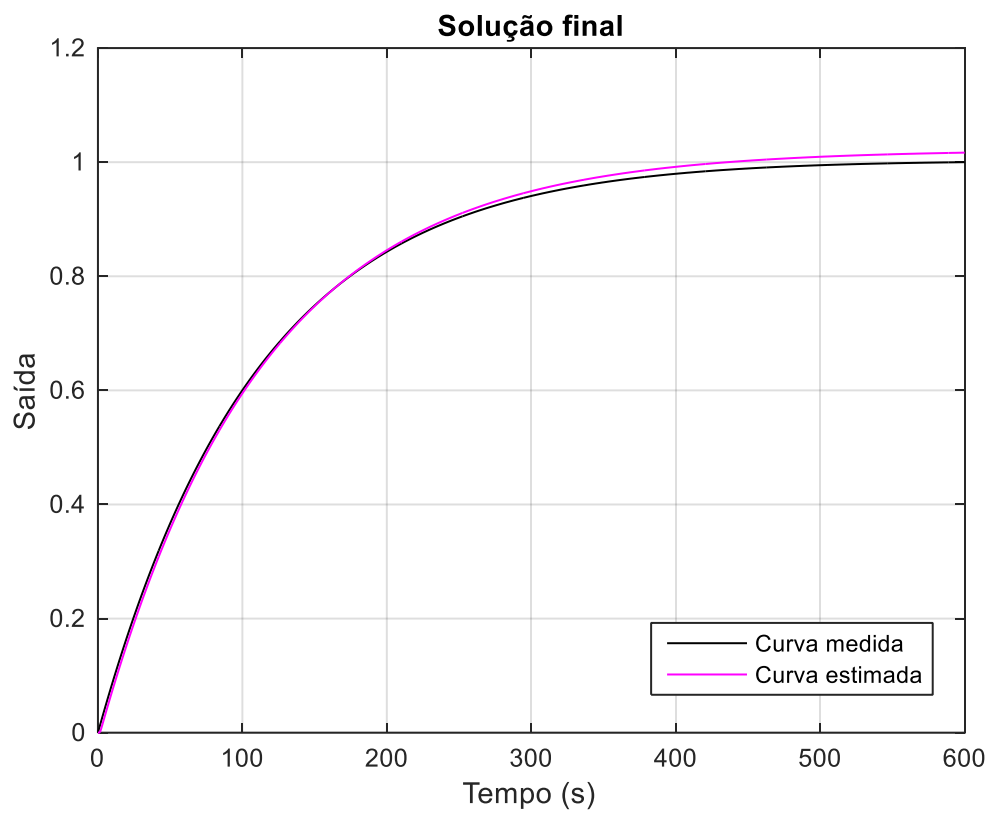


Figura 23 - Curva medida e a estimada.
Fonte: Própria autoria.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado um estudo sobre os controles de processos de uma planta industrial em que o paradigma era a identificação de parâmetros de uma função transferência de uma malha de mistura, onde o método utilizado fugia das técnicas convencionais. Esse projeto foi realizado em uma planta didática industrial por se tratar de um sistema semelhante a um sistema físico real que por condições do próprio uso ou falta dele sofrem alterações na sua funcionalidade, comprometendo informações e resultados importantes para os usuários. Através de ensaios realizados na planta, utilizando suas interfaces, fica nítida a gama de trabalhos acadêmicos relacionados a controles que podem ser desenvolvidos e aplicados em situação de produção.

Os processos envolvidos nesse trabalho de conclusão foram de aquecimento e um sistema de mistura de água, onde o foco maior estava no processo de mistura. Nos experimentos realizados dentro do sistema de mistura buscavam encontrar uma resposta característica a uma entrada degrau. De tal modo por meio de diversos testes realizados chegou-se a determinados valores que puderam ser considerados relevantes para esse trabalho.

O desempenho da evolução diferencial utilizada nesse trabalho está vinculado a sua estratégia nos critérios de seleção, mutação e cruzamento. Sendo assim como primeiro contato com o desenvolvimento desse algoritmo pode-se considerar satisfatório pelo funcionamento da estratégia do algoritmo, que conseguiu atingir uma margem de erro percentual 0,23 em relação a resposta original.

A complexibilidade de sistemas industriais semelhantes ao da Planta Didática Industrial podem apresentar resultados inesperados. Mesmo com todos os ajustes elaborados de forma correta para uma simulação, há sempre possibilidades de os testes reais não corresponder às expectativas. Assim, para trabalhos futuros, deve se observar e comparar os resultados obtidos buscando validar os valores alcançados verificando a funcionalidade e o comportamento da planta visando o melhor desempenho da mesma.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L.A. **Introdução à Identificação de Sistemas**. 3. ed. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 2007.

ALTUS, **Manual de Utilização da Rede PROFIBUS**. Porto Alegre, RS. Altus. 52 p.

ALVES, José L. L. **Instrumentação, Controle e Automação de Processos**. 2010. LTC. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

COELHO, A. A. R.; COELHO, L. dos S. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares**. Florianópolis, SC: Ed. Da UFSC, 2004.

CONCEIÇÃO, E. **APOSTILA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE**. Santa Catarina: UNISUL, 2004, 130 p.

COSTA, C. R. **Condução de Experimentos Computacionais com Métodos Heurísticos**. 2011. 150f. Dissertação Mestrado em Computação – Instituto de Informática. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

DELBEM, Alexandre Cláudio B. **Fundamentos de Algoritmos Evolutivos** Relatório Técnico: Notas Didáticas do ICMC-USP, 2008.

FERREIRA, Luiz R. S. **Estudo e desenvolvimento de um sistema de controle discreto para interface homem-máquina touchscreen**. 2016 113p. Trabalho de Conclusão de Curso UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, Cornélio Procópio, 2016.

GUEDES, Jacqueline J. **Estimação de Parâmetros de Motores de Indução Trifásicos Utilizando Evolução Diferencial**. 2015, 58f. Trabalho de Conclusão de Curso UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, Cornélio Procópio, 2015.

LINDEN, Ricardo. **Algoritmos genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.

LUGLI, Alexandre B.; SANTOS, Max M. **Redes Industriais: Evolução, Motivação e Funcionamento**. InTech Artigos, 2011. 5 p.

LUKE, S. (2009). **Essentials of Metaheuristics**. Disponível em: <<http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/>>. Acesso em: 1 mar. 2016.

MATIAS, J. **Teoria de controle PID**. Florianópolis, v. 4, n. 25, abril 2002.
OGATA, K. **Discrete-time Control Systems**. Prentice Hall, Third Edition, 2003.

OLIVEIRA, Giovana T. da S. **Estudo e aplicações da evolução diferencial**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2006.

ORENSTEIN, Leonardo P. **Procedimento para identificação de sistemas dinâmicos em Ambiente industrial**. 2013, 107f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PACHECO, Marco A. C. **Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações**. ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada. PUC-RJ, 1999.

RODRIGUES, A. B. **Análise da Eficiência Energética de um Acionamento V/F utilizando Evolução Diferencial**. 2015, 21f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2015.

SANCHES, Danilo S. **Algoritmos Evolucionários Multi-Objetivo Para Reconfiguração de Redes em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 152f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharias de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

SILVA, L. R. B.; ENDO, W.; LISBÔA, A. R. B. S. **Expectativas da Utilização de uma Planta Didática Industrial como Objeto de Aprendizagem em um Curso de Graduação em Engenharia**. Anais: XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE. Belém-PA, 2011.

SILVA, L. R. B. **Estudo aplicado de topologias de controle de processos utilizando uma planta didática industrial**, 2011. 115p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2011.

SILVEIRA, P. R.; SANTOS, W. E. **Automação e Controle Discreto**. 4. ed. São Paulo, SP: Editora Érica, 2002.

SMAR. **Manual de instruções e operações de manutenção**. Barueri: Smar, 54 p.

SMAR. **Plataforma de Controle e Automação de Processos (system302)**. Disponível em: < <http://www.smar.com/brasil/system302/>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

SOUZA, Rodrigo B. **Uma Arquitetura para Sistemas Supervisórios Industriais e sua Aplicação em Processos de Elevação Artificial de Petróleo**. 53f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2005.

STORN, R. PRICE, K. **Differential Evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces**. Technical Report TR-95-012, International Computer Science Institute, Berkeley, mar, 1995.

SUCUPIRA, Igor R. **Métodos Heurísticos Genéricos: Metaheurísticas E Hiper-heurísticas**. 2004, 40f. Trabalho de Conclusão de Curso Universidade de São Paulo, 2004.