



**COBENGE 2005**

**XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia**

"Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças"

12 a 15 de setembro - Campina Grande Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFPE

## **PLANTA INDUSTRIAL PARA CONTROLE DE UM TROCADOR DE CALOR**

**Hélvia Hortência Barcelos Carvalho** – [helviah2000@yahoo.com.br](mailto:helviah2000@yahoo.com.br)

**Davi Felipe Schultz** – [davifsbr@yahoo.com.br](mailto:davifsbr@yahoo.com.br)

**Wagner Moreira Lupinacci** – [lupinaccieng@yahoo.com](mailto:lupinaccieng@yahoo.com)

**Francisco José Gomes, D.Sc.** – [chicogomes@terra.com.br](mailto:chicogomes@terra.com.br)

Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia Elétrica, PET-Programa de Ensino Tutorial. - Bairro Martelos - CEP 36036-330 – Juiz de Fora – Minas Gerais

**Resumo:** *O presente trabalho trata do projeto, construção e estudos de aplicabilidade de uma planta industrial: um trocador de calor acoplado a um sistema de tanques duplos, com reservatório. Objetiva-se trazer, para o âmbito educacional, problemas e dificuldades geralmente só encontradas na prática industrial, bem como suas técnicas e soluções, normalmente não acessíveis ao estudante de engenharia, em suas prática laboratoriais. Assim, o projeto desenvolvido visa a oferecer aos alunos de Engenharia a oportunidade de lidar com problemas de maior porte, presente em diversos sistemas industriais, principalmente, no "chão-de-fábrica", onde se pode demonstrar didaticamente a operação de várias malhas de controle, utilizando os mesmos instrumentos e "softwares" utilizados em aplicações industriais: inversores, sensores industriais de nível, vazão e temperatura, Controladores Lógico Programáveis - CLPs, controladores industriais de vários modos - ON-OFF, Proporcional, Proporcional - Integral e Proporcional - Integral - Derivativo, com e sem auto - sintonia, operando de forma sistêmica.*

*O projeto possibilita ao aluno uma formação interdisciplinar, abrindo espaço para estudos práticos e teóricos tais como estimação de modelos utilizando técnicas de balanço de massa e energia ou paramétricas, permitindo comparação entre simulações computacionais e observações práticas, topologias diferenciadas de malhas de controle aberta ou realimentadas tais como SISO, MIMO e "Feedforward", utilização de algoritmos clássicos e modernos de controle, inclusive baseados em inteligência computacional, automação industrial baseada em CLPs, estudo e aplicação de inversores de potência, entre outras.*

*A planta opera em condições similares às encontradas na realidade industrial, possibilitando ao aluno um contato com uma realidade com a qual irá conviver, que geralmente não está disponível na vida acadêmica.*

**Palavra-Chave:** Controle industrial, Trocador de calor, Malhas de controle, Tanques duplos, Controladores lógicos programáveis.

## 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho trata de projeto, construção e estudos de aplicações de uma planta didática com características industriais: um sistema de tanques duplos acoplados a um trocador de calor, baseada em componentes e equipamentos normalmente encontrados em "chão-de-fábrica". Objetiva-se, com isto, trazer para o âmbito educacional problemas, dificuldades e soluções normalmente encontradas no projeto, operação e manutenção de sistemas industriais, situações estas com as quais o aluno de engenharia elétrica, na maioria dos casos, não possui contato no ambiente acadêmico. Esta situação, normalmente encontrada nos diversos cursos de Engenharia, geralmente uma decorrência dos escassos recursos disponíveis, obriga os alunos a trabalharem somente com pequenos projetos, ditos de finalidade didática, que são importantes e contribuem para o desenvolvimento das habilidades necessárias aos estudantes, mas deixam lacunas na formação dos alunos, pois não refletem a realidade industrial com a qual irá conviver imediatamente após sua graduação. A proposta do projeto foi oferecer aos alunos de Engenharia Elétrica e/ou de Controle e Automação a oportunidade de lidar com situações existentes na realidade industrial, utilizando para isto uma planta didática, onde podem ser demonstradas operações de malhas de controle diferenciadas, utilizando, porém os mesmos componentes, instrumentação, equipamentos e "softwares" de configuração utilizados rotineiramente na operação e configuração de processos industriais.

Diversas situações, teóricas e práticas, podem ser realizadas na planta desenvolvida: estudos práticos e teóricos tais como estimação de modelos utilizando técnicas de balanço de massa e energia ou paramétricas, permitindo comparação entre simulações computacionais e observações práticas, topologias diferenciadas de malhas de controle aberta ou realimentadas tais como SISO, MIMO e "Feedforward", utilização de algoritmos clássicos e modernos de controle, inclusive baseados em inteligência computacional, automação industrial baseada em CLPs, estudo e aplicação de inversores de potência, entre outras.

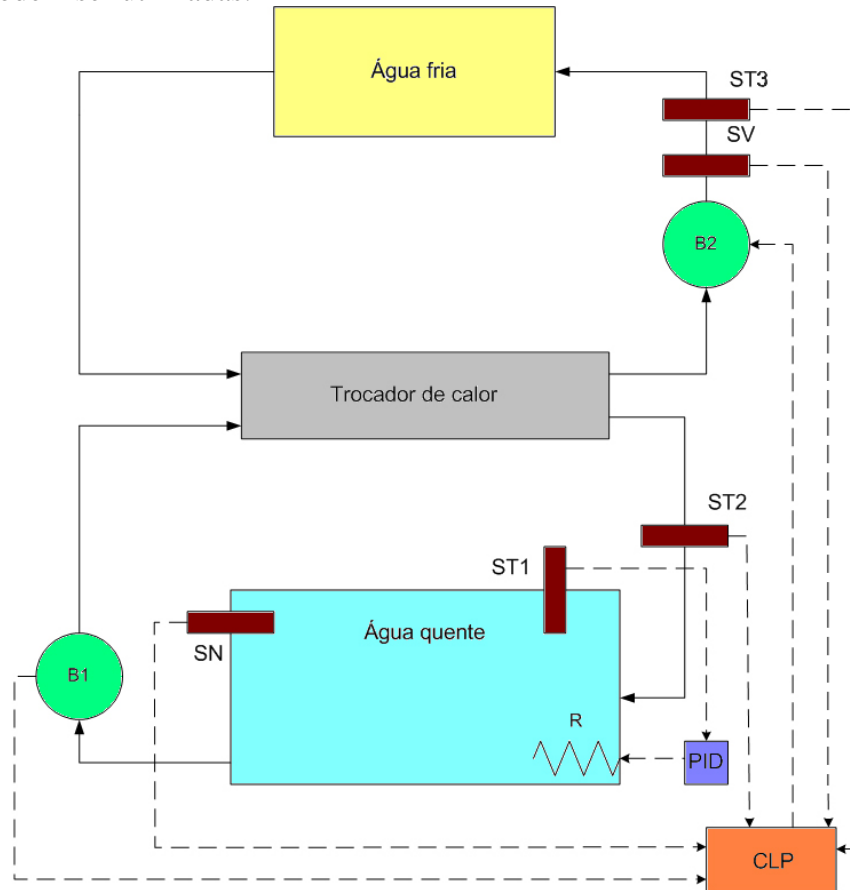
Pelas características colocadas fica claro que a realização deste projeto pode ser revelar de grande importância para diversas áreas ligada à engenharia de processos especialmente na parte de Controle e Automação. Destaca-se, como observação final, que todo o projeto, especificação e implementação da planta foi realizada pelos próprios alunos, em um trabalho que se revelou extremamente produtivo e onde foi possível um alto aprendizado para todos os envolvidos.

O trabalho está estruturado como segue: a seção 2 apresenta a planta industrial como um todo, explicando como a mesma poderá ser utilizada pelos alunos, a seção 3 aborda todos os seus componentes e suas respectivas aplicações, a seção 4 explica o seu funcionamento e a última seção trata das possibilidades futuras de utilização da planta.

## 2. A PLANTA INDUSTRIAL

A planta didática, com características industriais, foi concebida em dois módulos distintos, porém complementares: um sistema de tanques duplos acoplados a um trocador de calor. Esta concepção permitirá aos alunos trabalharem com as variáveis básicas utilizadas nas estruturas de controle aplicáveis a processos industriais: nível de reservatórios, vazão de fluidos, temperaturas do sistema e, em um segundo momento, com pressões manométricas positivas. A interação entre estas quatro variáveis, que incorporam praticamente todas as complexidades básicas existentes em processos industriais, permitirá aos alunos uma visão bem consolidada das estruturas,

interações e dificuldades existentes no controle de processos reais, bem como as respectivas soluções que podem ser utilizadas.



CLP - Controlador Lógico Programável  
 PID - Controlador proporcional diferencial e integral  
 R - Resistência para aquecimento da água  
 SN - Sensor de nível  
 ST1 - Sensor de temperatura do reservatório de água quente  
 ST2 - Sensor de temperatura da água resfriada  
 SV - Sensor de vazão  
 B1 - Bomba 1 (água quente)  
 B2 - Bomba 2 (água fria)

Condutores  
 ← - - - -  
 Tubulações  
 ← - - - -

Figura 1 - Visão esquemática da planta construída no projeto

### 3. COMPONENTES

#### 3.1. Módulo do trocador de calor

De acordo com a Figura 1, o módulo do Trocador de Calor consiste engloba um reservatório, com capacidade para 250 litros, que alimenta o denominado "circuito secundário", destinado à refrigeração do sistema. Este circuito secundário é complementado por um radiador de refrigeração (radiador automotivo) e uma bomba de circulação hidráulica trifásica. São utilizados na planta dois tipos de bombas, uma para água fria, e outra com rotor em bronze com selo

mecânico em Viton para água quente, isto é, possibilitando operação do sistema em temperaturas superiores a 70°C. As bombas foram devidamente aterradas e fixadas na estrutura do trocador, e são acionadas por inversores alimentados em uma tensão de 240 V trifásica, além de fornecem uma corrente máxima de saída de 2,3 A. Os inversores alteram as vazões dos fluidos no trocador de calor e no circuito de refrigeração variando a frequência de alimentação das bombas. Os dois inversores são comandados por saídas analógicas do CLP, e trabalham com frequências que variam de 0 a 240 Hz.

O "circuito primário", responsável pela parte de aquecimento, consiste de um tanque com capacidade de 75 litros, pressurizável até 2atm, aquecido por duas resistências trifásicas de 8 kW. O trocador de calor, componente fundamental deste módulo, é do tipo casco-tubo, composto por um feixe de tubos envolvido por um casco cilíndrico (Figura 2). A água quente circula internamente ao feixe e o fluido de refrigeração entre os tubos, permitindo maximizar a troca de calor pela grande superfície de contato. O circuito primário pode operar com vazões de até 7,5 m<sup>3</sup>/h o circuito secundário suporta vazões de até 6,8 m<sup>3</sup>/h Todo o sistema foi conectado com tubulação de cobre, diâmetro de 3/4" e projetado para operar com temperatura máxima de 90°C. Como sensores de temperatura foram utilizados termopares PT100 com dois terminais e saída de 4-20mA.

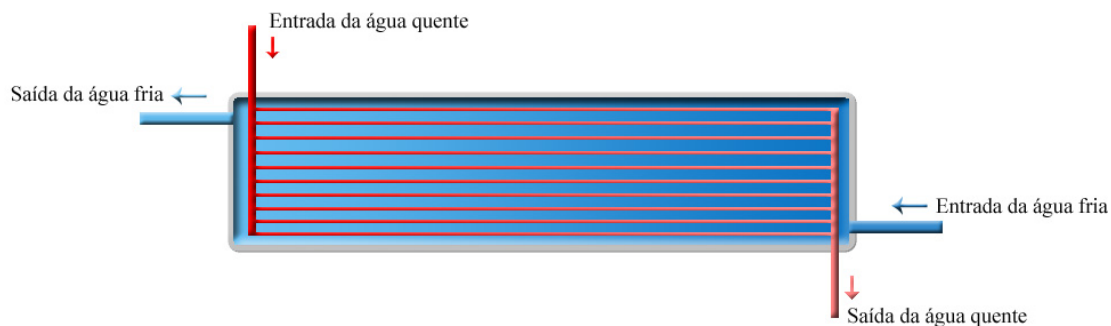


Figura 2 – Corte longitudinal do trocador

O monitoramento da vazão do fluido ao longo do trocador de calor foi efetuado com um sensor de vazão tipo turbina que, com a passagem do fluido, movimenta uma turbina transferindo energia cinética ao rotor, gerando uma frequência de giro que é detectada por um sensor eletromagnético. Ele é alimentado com 24Vdc, tem um consumo de 20mA e gera um sinal de saída de 4-20mA.

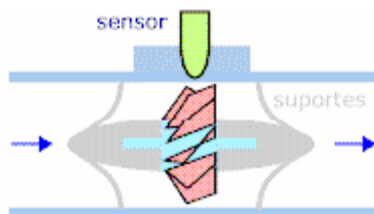


Figura 3 – Corte longitudinal do sensor de vazão

O sinal do sensor é enviado para um Controlador Lógico Programável - CLP, que controla os inversores das bombas dos circuitos primário e secundário.

### **3.2. Sensor de nível**

O sensor de nível localizado no tanque de aquecimento de água é do tipo capacitivo, e determina o nível do fluido através da variação da capacitância do mesmo, tendo em vista que quanto maior o nível maior a capacitância. Esse sensor funcionará como um dispositivo de segurança e tem a função de evitar que os resistores sejam acionados sem que haja fluido no entorno dele.

### **3.3. Sistema de Controle**

O projeto e a implementação do sistema de controle da planta está fundamentado nas leis de controle, nas quais estão inseridos os critérios de estabilidade e as ações de controle que proporcionarão resultados mais ou menos eficazes, e foram efetuados de maneira a possibilitar, ao aluno, um contato com a diversidade de soluções existentes nos ambientes industriais. Sabe-se que, nestes ambientes, no denominado "chão-de-fábrica" são extensivamente utilizados os Controladores Lógicos Programáveis - CLPs efetuando o controle direto das diversas malhas, de forma independente ou acoplados a controladores do tipo PID ou equivalentes. Esta combinação permite não só o controle direto, mas inclusive a hierarquização das estruturas, com níveis supervisórios ou mesmo otimizatórios. Adicionalmente, há que trazer ao aluno as informações e possibilidades de trabalho com os algoritmos de controle digitais, baseados ou não em inteligência computacional, como os algoritmos DMC, Auto-ajustáveis, "dead-beats", nebulosos e outros mais. Outros aspectos que devem ser ressaltados são as diversas técnicas possíveis de modelagem, estimação de parâmetros, otimização e procedimentos correlatos, para os quais são necessários a aquisição e tratamento digital dos dados provenientes da planta.

Com estes objetivos traçados, a planta foi montada com um Controlador Lógico Programável (CLP) que possui 4 módulos sendo um de processamento com capacidade de programação de 12Kbytes Flash, 8E/8S "N" e comunicação RS232, um para expansão digital com 24E/24S "N" (24Vcc), um de expansão analógica com 4E/4S, um específico para sensor de temperatura PT100 com 4 entradas, além de uma IHM.

Para operação isolada, ou de forma complementar ao CLP foi incorporado à planta um controlador PID, o qual possui duas entradas para termopares de vários modelos, duas saídas 0-12Vdc para relé e sistema de auto-regulação.

A inserção do CLP e do PID como estruturas possíveis de controle foi completada com a possibilidade de tratamento digital integral da planta, utilizando para isto a digitalização dos sinais. Para isto, os sensores de nível e vazão foram especificados para operar com sinais de saída de 4 a 20mA e que, mediante uma placa conversora PCL-711, são adquiridos por um computador, onde torna-se possível a execução de uma variedade de estratégias de controle, estimação, modelagem e otimização do processo. O sinal de temperatura, proveniente dos termopares exigiu um estágio adicional de tratamento, condicionando-o para a faixa de 4 a 20 mA.

Estas características adotadas para a planta irão permitir desenvolvimentos posteriores, dos quais o primeiro programado é o desenvolvimento de um ambiente integrado de controle,

baseado em rede de campo, já havendo a opção pela instalação de uma rede CAN-Bus, que está sendo implementada.

#### 4. FUNCIONAMENTO

A planta projetada encontra-se, atualmente, com o módulo do Trocador de Calor já operacional e dentro da filosofia proposta para o projeto, toda a concepção e montagem está sendo efetuada pelos próprios alunos envolvidos no projeto. Esta postura foi extremamente importante na medida que possibilitou a colocação, por parte dos envolvidos, das principais deficiências e pontos de dúvida que julgaram haver em sua formação, posicionamento este que, depois de analisado e discutido com o grupo, possibilitou diversas alterações na concepção inicial.

Esta planta é composta por um reservatório onde fica a água aquecida, um outro contendo água à temperatura ambiente e um trocador de calor, por onde a água vinda dos dois reservatórios deve passar para que se possa atingir a temperatura desejada.

Na Planta foram usados três termopares com o objetivo de medir as seguintes temperaturas, a do reservatório onde a água esta sendo aquecida e das duas saídas do trocador de calor. O do reservatório (ST1) envia dados para o controlador PID onde este controla a chave estática da resistência, de acordo com a Figura 4. Desta forma, o chaveamento da mesma aplicará tensão nos terminais dos resistores quando solicitado pelo sistema, transformando assim potência elétrica em térmica.

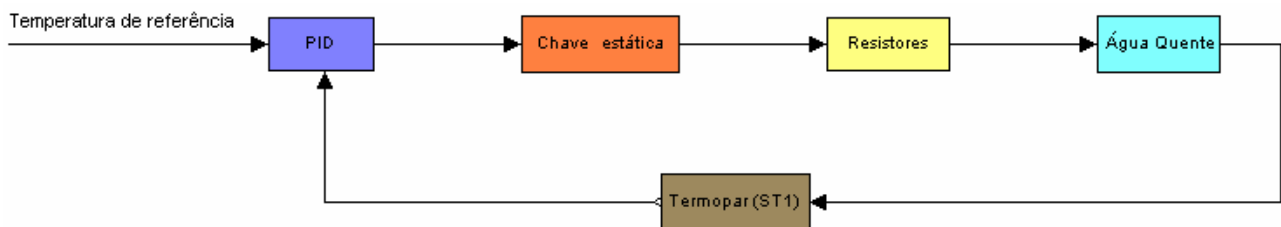


Figura 4 – Diagrama de blocos do acionamento do controlador PID

Os outros dois (ST2 e ST3) enviam sinais para o CLP cuja função é controlar os inversores das bombas. Estas se encontram na saída do reservatório de água quente e na entrada do radiador.

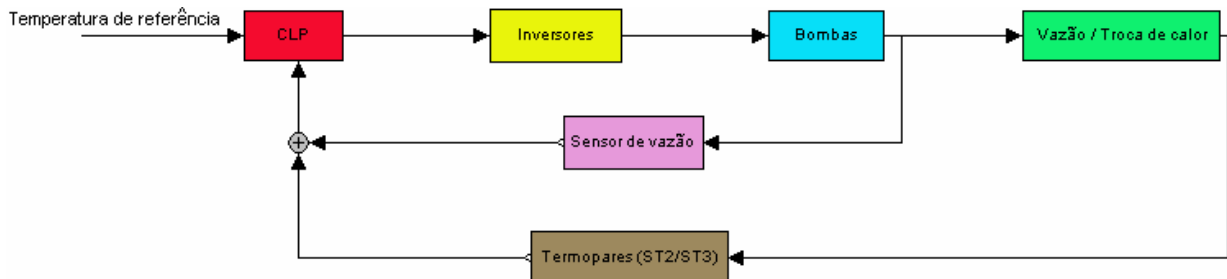


Figura 5 – Diagrama de blocos do acionamento do controlador CLP

As velocidades das massas de água que passam pelo trocador de calor são controladas de modo que a temperatura desejada seja atingida o mais rápido possível. As duas bombas que compõem o sistema, uma trifásica ligada à tubulação de água quente e a outra monofásica ligada à tubulação de água fria são acionadas pelos inversores de frequência que controlam a sua velocidade de rotação, controlando assim a vazão das massas de água através das tubulações e conseqüentemente do trocador de calor.

Todo este processo de controle de vazão é realizado pelo CLP (Figura 5), o qual recebe os sinais provenientes dos termopares já citados e dos sensores de vazão. Através destes sinais analógicos é gerado um sinal também analógico, o qual é enviado às entradas dos inversores de frequência que promovem a variação das vazões.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho tratou do projeto, construção e estudos de aplicações de uma planta de controle industrial. Essa planta foi construída para o laboratório de controle da UFJF com intuito de auxiliar no processo de ensino e aprendizagem, mais especificamente, na área de controle e automação, da engenharia elétrica.

A característica diferencial da mesma está na oportunidade que ela oferece aos alunos de lidarem com uma ferramenta de maior porte, e presente em diversos sistemas industriais. Esta opção permite aos estudantes aprenderem, de forma prática e dinâmica, a operação de várias malhas de controle, utilizando os mesmos instrumentos e softwares de configuração desenvolvidos para aplicação em controle industrial. Além disso, ela se apresenta de extrema utilidade para estudos, análises e modelagem de sistemas de controle menores.

Como trabalho futuro, acoplar-se-á à estrutura apresentada um sistema com três tanques interligados munidos de sensores de nível, com objetivo de controlar a quantidade de água armazenada em cada tanque através da vazão entre os mesmos.

### *Agradecimentos*

Ao Programa de Educação Tutorial – PET/SESu/UFJF – Engenharia Elétrica, pelo suporte ao desenvolvimento do mesmo, aos amigos Cláudio do Carmo e Jaina Pires, e ao companheiro petiano Frederico Ghetti. Agradece-se especialmente ao engenheiro Francisco Raposo pelo apoio que foi fundamental para o desenvolvimento do projeto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COUTO DE MORAES, C. & CASTRUCCI, P. **Engenharia de Automação Industrial**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GEORGINI, M. **Automação Aplicada**. São Paulo: Érica, 2000.

INCROPERA, F. & DEWITT, D. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

<http://www.atos.com.br>

<http://www.contechind.com.br>

<http://www.ab.com/manuals/>

<http://www.schneider.ind.com.br>

## **Industrial Plant to control the Heat Exchanger**

**Abstract:** *The present work is a project about construction and studies of applicability of an industrial plant. The heat exchanger attached to a system of double tanks, with a reservoir. Our goal is to bring problems and difficulties usually found in the practical industry to our classroom, as well as technique and solution to those problems not accessible to the engineering students. So our project was developed to give the students the possibility of dealing with problems in a bigger scale. Problems presented in several industry system, specially in the factory, where we can demonstrate the operation of several controller links using the same instruments of those used by factories in a didactical way: inverters, level industry sensors, sensors of temperature and outflow, PLC, industry controllers of many ways- ON-OFF, Proportional, Proportional-Integrated, Proportional-Integrated-Derivative, with or without-syntony, operating in a systemic order.*

*The project allows the students to have an interdisciplinary formation. It gives them the opportunity to study the estimation of model using mass and energy balance techniques or parametric, showing them the difference between the computing simulation and practical observations such as SISO, MIMO and FEEDFORWARD. It also shows the use of classical algorism and modern controls, especially the computing intelligence, industrial automation based on PLC, studies and applicability of power inverters among others.*

*The plant operates in similar conditions of those found in the industrial reality. With this project the students will be in contact with an industrial reality which they will someday face in life.*

**Key-words:** *Heat Exchanger, Control, Programmable Logic Controller, PID*