



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ARTHUR SILVA PEREIRA DE ASSIS

**MODELAGEM E CONTROLE DE UMA PLANTA PILOTO
TÉRMICA DO TIPO CASCO-TUBOS UTILIZANDO A
TECNOLOGIA WIRELESSHART**

Campina Grande, Paraíba
Abril de 2015

ARTHUR SILVA PEREIRA DE ASSIS

MODELAGEM E CONTROLE DE UMA PLANTA PILOTO
TÉRMICA DO TIPO CASCO-TUBOS UTILIZANDO A
TECNOLOGIA WIRELESSHART

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Controle e Automação

Orientador:

Professor Péricles Rezende Barros

Campina Grande, Paraíba
Abril de 2015

ARTHUR SILVA PEREIRA DE ASSIS

MODELAGEM E CONTROLE DE UMA PLANTA TÉRMICA DO
TIPO CASCO-TUBOS UTILIZANDO A TECNOLOGIA
WIRELESSHART

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Controle e Automação

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Péricles Rezende Barros
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãs, minha namorada e a toda minha família que, com muita atenção, amor e carinho, me ajudaram a realizar mais uma conquista da minha vida.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso trata da identificação e controle da malha de vazão e identificação da malha de nível de uma planta piloto de um trocador de calor do tipo casco-tubos. A planta foi instalada no Laboratório de Instrumentação e Controle da Universidade Federal de Campina Grande. A rede de sensores foi configurada utilizando o protocolo WirelessHART. Foram feitos experimentos de resposta ao degrau para realizar a identificação das malhas, com auxílio de ferramentas computacionais como o Matlab e Simulink. Após o projeto do controlador da malha de vazão, foi feito um experimento em malha fechada com o intuito de validar o modelo obtido na identificação e o controlador sintonizado à partir dele.

Palavras-chave: Trocador de calor casco-tubos, WirelessHART, OPC, Identificação.

ABSTRACT

This report presents an identification and control for a flow control loop and an identification for a level control loop of a pilot shell and tube heat exchanger plant. The plant was installed and is located at the Instrumentation and Control Laboratory at the Federal University of Campina Grande. The sensor network was configured using WirelessHART protocol. Step response experiments were made to identify the control loops, with the aid of computational tools such as Matlab and Simulink. At the end, a validation experiment for the closed loop of the flow loop control was made to analyze and verify the accuracy of the identification of the model.

Keywords: Shell and Tube Heat Exchanger, WirelessHART, OPC, Identification.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Trocador de calor do tipo casco-tubos de 7,6 m de comprimento e 0,98 m de diâmetro.	1
Figura 2. Estrutura de um trocador de calor do tipo casco-tubos. O fluido quente, em vermelho, flui pelos tubos enquanto o fluido frio, em azul, flui pelo casco.	4
Figura 3. Estrutura física da planta. O processo quente está representado pelas linhas em vermelho, enquanto que o processo frio pelas linhas em azul.	5
Figura 4. Imagem real da planta em estudo.	6
Figura 5. Estrutura da corrente quente.	7
Figura 6. Estrutura da corrente fria.	8
Figura 7. Diagrama da malha de vazão.	10
Figura 8. Diagrama da malha de temperatura.	11
Figura 9. Diagrama da malha de nível.	11
Figura 10. Estrutura de rede da planta.	14
Figura 11. Fluxo de informação da planta.	15
Figura 12. Interface gráfica do gateway da Emerson.	16
Figura 13. Interface gráfica do RSLogix5000 com as variáveis disponíveis no servidor OPC do CLP.	17
Figura 14. Interface HART USB Viator.	18
Figura 15. Cliente OPC em execução.	18
Figura 16. System Identification Tool.	19
Figura 17. Esquemático do coletor de dados da malha de vazão desenvolvido no Simulink.	20
Figura 18. Experimento de resposta ao degrau da malha de vazão.	21
Figura 19. Validação dos resultados dos modelos identificados. O modelo com atraso está representado pela cor verde, já o sem atraso pela cor azul.	22
Figura 20. Resposta ao degrau da malha de vazão fechada, realizada pelo <i>PID Tuner</i>	23
Figura 21. Esquemático do coletor de dados da malha de nível desenvolvido no Simulink.	26
Figura 22. Experimento de resposta ao degrau da malha de nível.	27
Figura 23. Validação dos resultados do modelos identificado para a malha de Nível.	28
Figura 24. Configuração dos parâmetros do bloco PID no CLP da Rockwell.	24
Figura 25. Gráfico do experimento em malha fechada da vazão.	25

SUMÁRIO

Resumo.....	v
Abstract	vi
Lista de Ilustrações	vii
Sumário	viii
1 Introdução.....	1
2 Objetivos	3
3 Estrutura Física da Planta	4
3.1 Trocador de Calor	4
3.2 Corrente Quente	6
3.3 Corrente Fria	7
4 Malhas de Controle.....	9
4.1 Malha de Vazão	10
4.2 Malha de Temperatura	10
4.3 Malha de Nível.....	11
5 Estrutura de Rede	12
5.1 Padrão OPC.....	12
5.2 Protocolo WirelessHART	13
6 Materiais e Métodos	Error! Bookmark not defined.
6.1 Configuração da Planta	15
6.1.1 Servidor OPC da Emerson.....	15
6.1.2 Servidor OPC da Rockwell.....	16
6.1.3 Cliente OPC.....	17
6.2 Identificação da Malha de Vazão.....	19
6.2.1 Resposta ao Degrau da Malha de Vazão	19
6.2.2 Identificando a Malha de Vazão	21
6.3 Projeto do Controlador da Malha de Vazão	23
6.4 Identificação da Malha de Nível	24
6.4.1 Resposta ao Degrau da Malha de Nível.....	26
6.4.2 Identificando a Malha de Nível	27
7 Resultados	Error! Bookmark not defined.
8 Conclusão	29
Bibliografia.....	30
Apêndice A – Código Fonte do Cliente OPC	Error! Bookmark not defined.

1 INTRODUÇÃO

Na prática, todos os processos químicos envolvem produção ou absorção de energia em forma de calor. O trocador de calor é comumente utilizado em processos químicos para transferir calor de um fluido quente, através de uma barreira sólida, para um líquido frio. Existem vários tipos de trocador de calor utilizado na indústria, mas o sistema de troca de calor mais utilizado é do tipo casco-tubos [1].

Trocadores de calor do tipo casco-tubos são, provavelmente, o tipo mais comum e são aplicados em uma vasta faixa de operação de temperatura e pressão [2]. Eles apresentam uma maior taxa de transferência de calor de superfície para volume, quando comparados aos trocadores de dois tubos, e são fáceis de manufaturar em uma larga variedade de tamanhos e configurações. Um trocador do tipo casco-tubos industrial pode ser visto na Figura 1.



Figura 1. Trocador de calor do tipo casco-tubos de 7,6 m de comprimento e 0,98 m de diâmetro¹.

Por serem robustos eles podem operar a altas pressões. Sua construção facilita a desmontagem para manutenções e limpezas periódicas. Trocadores de calor do tipo casco-tubos são utilizados em várias aplicações como: refrigeradores, geração de energia, aquecedores e condicionadores de ar, processos químicos e aplicações médicas.

¹ Disponível em: <<http://www.mac-tpi.com/thermal-nitro/process-nitro/>>

O trocador de calor do tipo casco-tubos é uma extensão da configuração de dois tubos. Ao invés de um único tubo dentro de um tubo maior, um trocador de calor casco-tubos consiste de um conjunto de tubos que estão envolvidos por um casco cilíndrico. Nesse tipo de trocador de calor um fluido flui pelos tubos, e o segundo fluido flui pelo espaço entre os tubos e o casco.

No desenvolvimento do trabalho será feita, inicialmente, uma abordagem do funcionamento do trocador de calor do tipo casco-tubos, do protocolo de comunicação utilizado, WirelessHART, e da estrutura física e de rede da planta piloto em estudo. Na próxima etapa, será feita a identificação de um modelo e o projeto um controlador PID para uma das malhas do sistema. Em seguida será feita uma análise e discussão dos resultados obtidos à partir de experimentos em malha fechada da malha controlada. O trabalho é finalizado com as conclusões das atividades desenvolvidas e com sugestão de propostas de melhorias que podem ser desenvolvidas em trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos explicar o funcionamento de um trocador de calor, mostrar como o sistema foi configurado no que diz respeito à comunicação dos sensores com o computador e o CLP, assim como realizar a identificação e o controle da malha de vazão e a identificação da malha de nível. A planta piloto em estudo está localizada no Laboratório de Instrumentação e Controle da Universidade Federal de Campina Grande.

3 ESTRUTURA FÍSICA DA PLANTA

3.1 TROCADOR DE CALOR

O principal componente da planta é o trocador de calor do tipo casco-tubos. Como o próprio nome implica, este tipo de trocador de calor consiste de um casco (um grande vazo de pressão) com um feixe de tubos passando por seu interior. Um fluido corre no interior dos feixes de tubos e o outro fluido corre externamente a estes, dentro do grande tubo que os envolve, chamado de casco. Dessa forma, há uma troca de calor sem que haja um contato direto dos fluidos em questão. Neste projeto, por motivos de simplicidade, a água foi o fluido escolhido tanto para o casco quanto para os tubos.

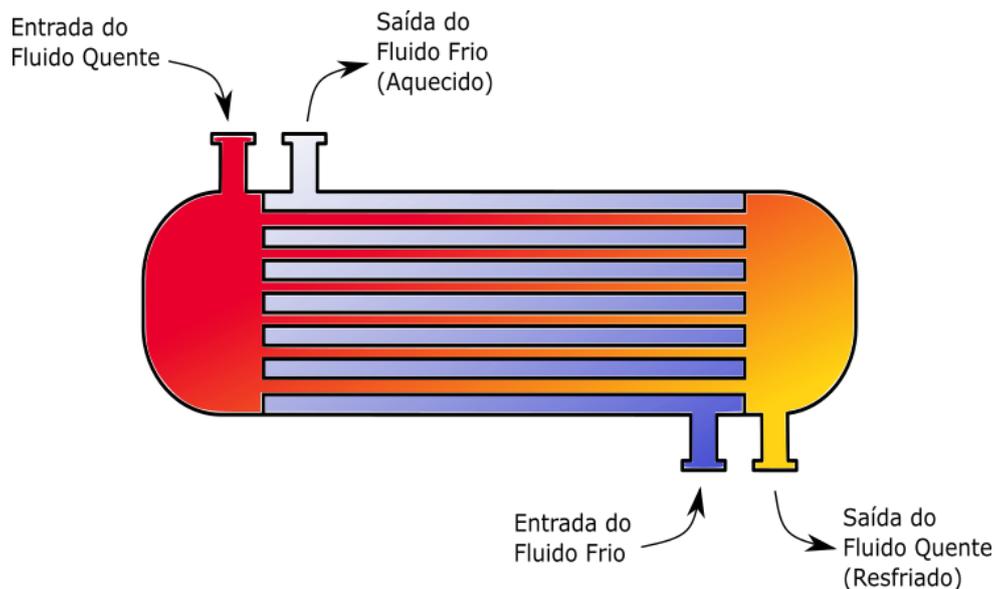


Figura 2. Estrutura de um trocador de calor do tipo casco-tubos. O fluido quente, em vermelho, flui pelos tubos enquanto o fluido frio, em azul, flui pelo casco.

Os seguintes componentes fazem parte da estrutura física da planta:

- Tanque de nível do fluido quente
- Tanque de armazenamento do fluido quente
- Bomba de imersão do tanque de armazenamento do fluido quente
- Aquecedor
- Trocador de calor do tipo casco-tubos

- Radiador
- Tanque de armazenamento do fluido frio
- Bomba do tanque de armazenamento do fluido frio
- Válvula para controle do tanque de nível
- Válvulas de alimentação e descarte dos tanques
- Vários sensores wireless para medições de temperatura, vazão e nível.

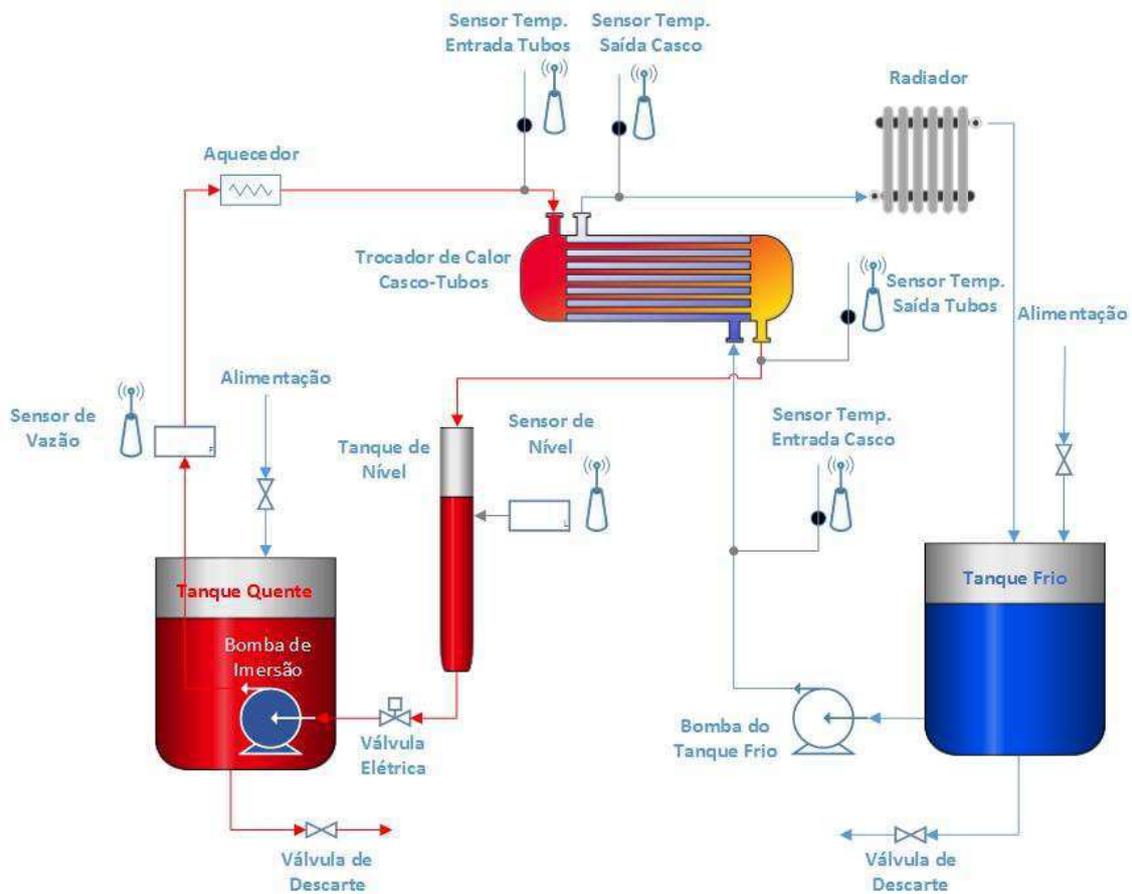


Figura 3. Estrutura física da planta. O processo quente está representado pelas linhas em vermelho, enquanto que o processo frio pelas linhas em azul.

A Figura 4 ilustra a planta real localizada no Laboratório de Instrumentação e Controle da Universidade Federal de Campina Grande.



Figura 4. Imagem real da planta em estudo.

A planta pode ser dividida em duas correntes de processo, um com a presença do fluido quente, chamado de corrente quente, e outro com a presença do fluido frio, chamado de corrente fria.

3.2 CORRENTE QUENTE

O ciclo de vida da corrente quente inicia-se no tanque de armazenamento do fluido quente, de onde este é bombeado pela bomba de imersão em direção ao aquecedor. Em seguida, o fluido é levado para os tubos do trocador de calor. Neste ponto do processo, o fluido que estava quente é parcialmente resfriado e depois despejado no tanque de nível. Por fim, o fluido passa pela válvula de controle do fluxo de saída do tanque de nível em direção ao tanque quente, encerrando o ciclo de vida da corrente quente.

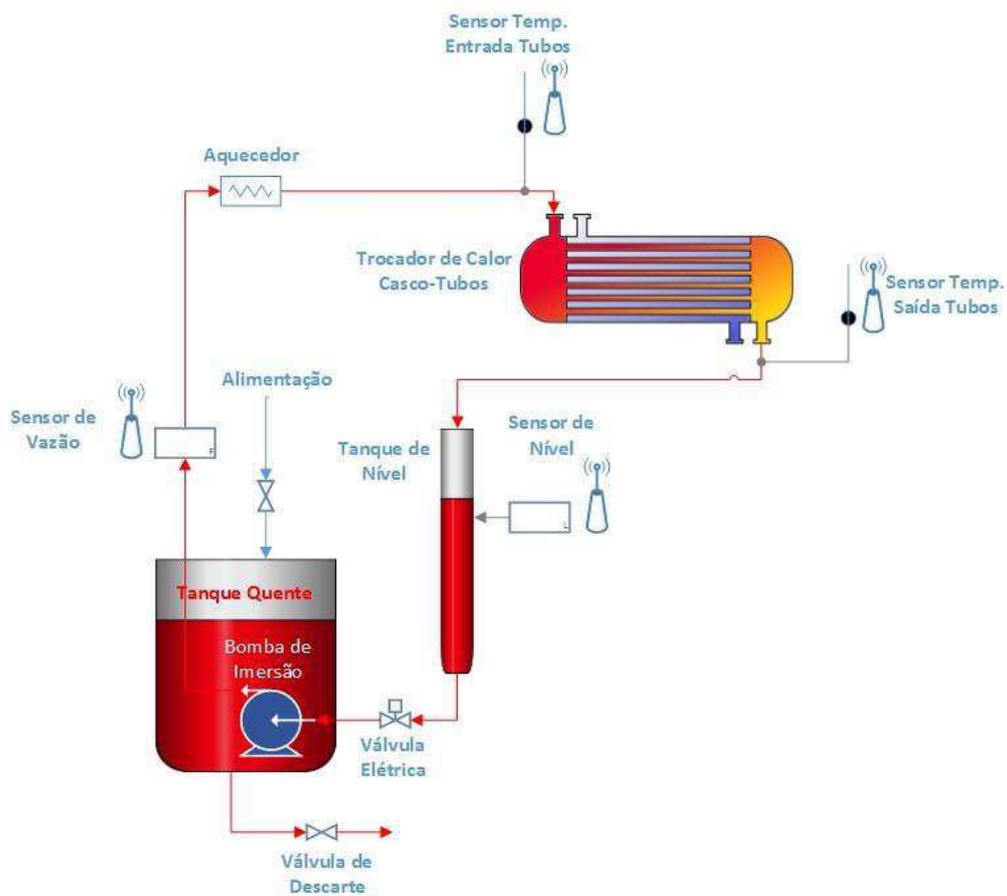


Figura 5. Estrutura da corrente quente.

3.3 CORRENTE FRIA

Esta corrente tem início no tanque frio, de onde o fluido frio é bombeado até o trocador de calor. O fluido passa pelo casco. Neste momento há uma troca de calor com o fluido que está passando, simultaneamente, pelos tubos. Após a troca de calor o fluido frio é parcialmente aquecido, sendo então levado até um radiador para que seja novamente resfriado e retorne ao tanque frio.

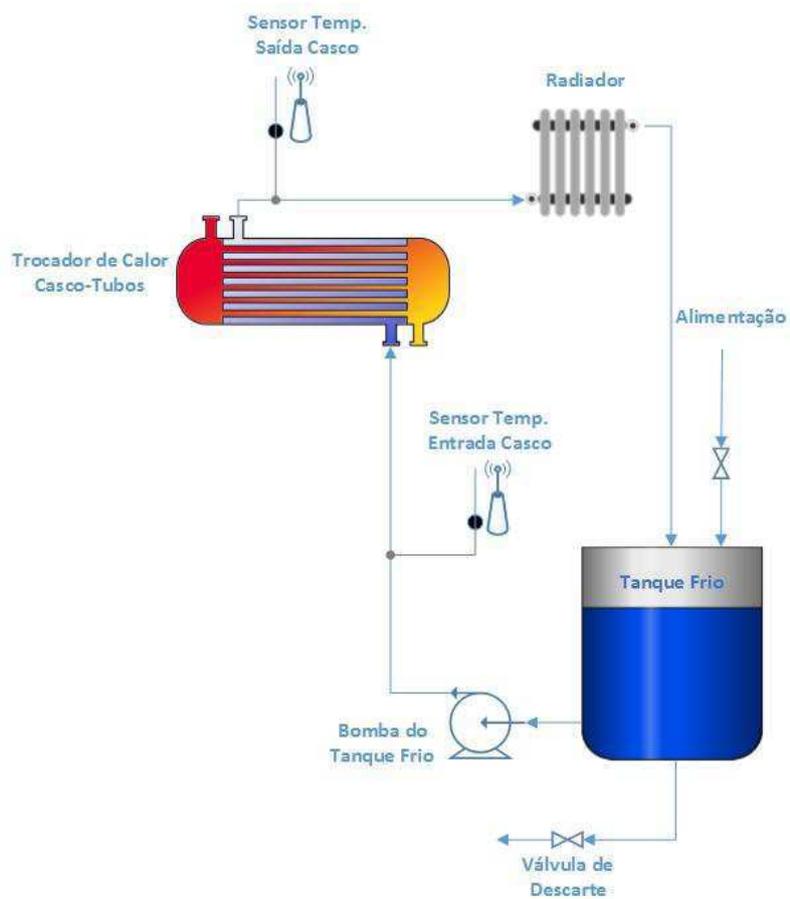


Figura 6. Estrutura da corrente fria.

4 MALHAS DE CONTROLE

Os sensores wireless instalados na planta realizam a leitura de diversos parâmetros do sistema como temperatura, vazão e nível dos fluidos envolvidos. Também, tem-se à disposição as variáveis manipuláveis, que são utilizadas para a atuação do controle no sistema, como velocidade de rotação da bomba, tensão na resistência de aquecimento e a abertura (em porcentagem) da válvula de controle de nível. As variáveis presentes na planta piloto, tanto as medidas quanto as manipuláveis, são mostradas, respectivamente, na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1. Variáveis medidas da planta.

Variável	Unidade
Vazão do Fluido na Saída do Tanque Quente	<i>L/h</i>
Nível do Fluido no Tanque de Nível	<i>mm</i>
Temp. do Fluido na Entrada dos Tubos	<i>°C</i>
Temp. do Fluido na Saída dos Tubos	<i>°C</i>
Temp. do Fluido na Entrada do Casco	<i>°C</i>
Temp. do Fluido na Saída do Casco	<i>°C</i>

Tabela 2. Variáveis manipuláveis da planta.

Variável	Unidade
Tensão na Bomba de Imersão (Tanque Quente)	<i>V</i>
Velocidade de Rotação da Bomba (Tanque Frio)	<i>RPM</i>
Tensão na Resistência do Aquecedor	<i>V</i>
Abertura da Válvula de Nível (Tanque de Nível)	<i>%</i>

A seguir, serão apresentadas as malhas propostas para a realização do controle da planta.

4.1 MALHA DE VAZÃO

Na malha de vazão, o controlador tem como objetivo controlar o fluxo do fluido na saída do tanque quente, deixando-o próximo a um valor de referência especificado. Para isso, dispõe-se de um sensor de vazão e uma bomba de imersão. Deve-se impor uma tensão nos terminais da bomba de imersão de modo a estabelecer um fluxo na saída da malha com valor igual a um valor de referência desejado. A Figura 7 ilustra o diagrama da malha de vazão.

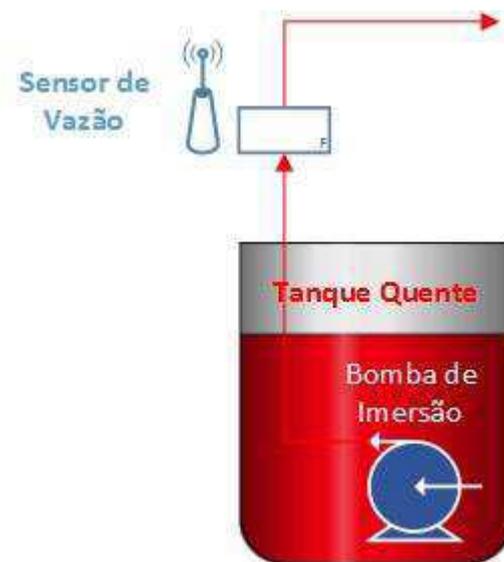


Figura 7. Diagrama da malha de vazão.

4.2 MALHA DE TEMPERATURA

Essa é a principal malha da planta, pois é ela quem realiza o objetivo do projeto, que é a troca de calor entre um fluido quente e um frio. As variáveis envolvidas nesta malha são a temperatura do fluido quente na saída dos tubos do trocador de calor, após ter sido parcialmente resfriado pelo fluido frio, e a velocidade de rotação da bomba do tanque frio.

O objetivo do controlador da malha é manter a temperatura do fluido quente na saída dos tubos do trocador de calor em um valor de referência, controlando a velocidade de rotação da bomba do tanque frio. A Figura 8 ilustra o diagrama da malha de temperatura.

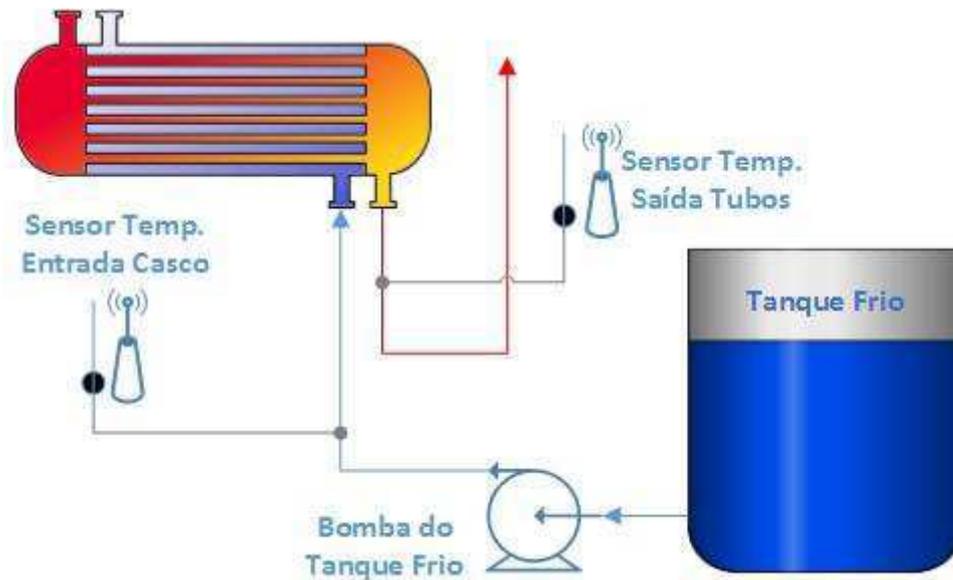


Figura 8. Diagrama da malha de temperatura.

4.3 MALHA DE NÍVEL

O objetivo do controlador desta malha é manter o nível do tanque em um determinado valor de referência. Para isso, o fluxo do fluido de entrada é variado. A válvula elétrica presente na saída do sistema se mantém constante. A regulação do nível do tanque dá-se aumentando ou diminuindo o fluxo do líquido de entrada.

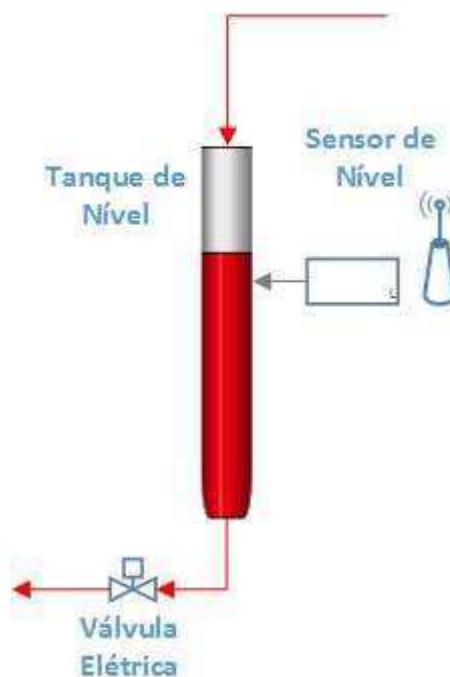


Figura 9. Diagrama da malha de nível.

5 ESTRUTURA DE REDE

Soluções sem fio oferecem mais benefícios além de apenas eliminar o cabeamento e de reduzir o custo de instalação, como manutenção mais eficiente, maior flexibilidade e mobilidade. O protocolo WirelessHART foi utilizado para a realização da leitura dos sensores, exceto para o sensor de vazão, cujo protocolo utilizado foi o HART, devido a limitações no tempo de amostragem. A comunicação com os atuadores foi realizada através de saídas analógicas e digitais do controlador lógico programável da Allen-Bradley modelo 1769 da série.

Para integrar a comunicação do computador que supervisiona a planta, os sensores da rede WirelessHART e o CLP, foi utilizado o padrão de comunicação industrial OPC. Este padrão foi escolhido pelo fato de permitir a comunicação entre dispositivos de diversos fabricantes diferentes sem que haja uma dependência dos drivers dos proprietários.

5.1 PADRÃO OPC

OPC (OLE for Process Control) são especificações baseadas nas tecnologias OLE, COM e DCOM, que foram desenvolvidas pela Microsoft para sistemas que operam com arquitetura baseada em Microsoft Windows [5]. Essa especificação define um padrão de objetos, interfaces e métodos para o uso em controle de processos e em aplicações de automação em geral para facilitar a interoperabilidade.

OPC foi desenvolvido para conectar softwares baseados em Windows e hardwares de controle. O padrão define métodos consistentes que acessam o dado de dispositivos não importando o seu tipo, fabricante ou versão, permitindo que o desenvolvimento de um software não precise se preocupar com o hardware a que ele vai se conectar. Assim o programa pode ser escrito apenas uma vez e depois ser reutilizado em diversas aplicações.

Uma vez que um servidor OPC é escrito para um dispositivo em particular, ele pode ser conectado por qualquer aplicação que seja capaz de se conectar com este dispositivo como um cliente OPC. Estes servidores usam a tecnologia OLE da Microsoft

que é baseada na COM (tecnologia que permite a comunicação entre softwares variados) para se conectar com os clientes. A tecnologia COM permite um padrão de troca de informação em tempo real entre as aplicações em software e o hardware que controla o processo a ser monitorado.

5.2 PROTOCOLO WIRELESSHART

O WirelessHART é um protocolo de comunicação de rede sem fio seguro, confiável e de fácil uso, utilizado na automação de processos. Ele acrescenta ao protocolo HART, que já bem conhecido e o mais utilizado na instrumentação de processos inteligentes, a capacidade de operar sem fios, mantendo a compatibilidade com dispositivos HART, comandos e ferramentas [4]. Ele é o primeiro padrão de comunicação sem fio aberto da indústria internacional (IEC 62591, EN 62591).

Os três principais elementos de uma rede WirelessHART são:

- **Dispositivos de campo sem fio** conectados a processos ou equipamentos da planta. Este dispositivo pode ser um dispositivo WirelessHART de fábrica ou um dispositivo HART já existente e instalado com um adaptador WirelessHART acoplado.
- **Gateways** conectam estes dispositivos a rede de comunicação da planta.
- **Um Gerenciador de Rede** é responsável pela configuração da rede, pelo agendamento da comunicação entre dispositivos, pelo gerenciamento das rotas das mensagens e pelo monitoramento da saúde da rede.

Cada dispositivo na malha da rede pode servir de rota de mensagens de outros dispositivos. Em outras palavras, um dispositivo não precisa se comunicar diretamente com um Gateway, pois ele pode apenas encaminhar sua mensagem para o dispositivo mais próximo. Isso estende a abrangência da rede e fornece uma rota de comunicação redundante, aumentando a confiabilidade.

O Gerenciador de Rede determina as rotas redundantes com base na latência, na eficiência e na confiabilidade. Para garantir que rotas redundantes se mantêm abertas e

não obstruídas, as mensagens circulam continuamente pelos caminhos redundantes. Assim, quando uma mensagem não atinge seu destino por um caminho, ela é automaticamente roteada novamente através de um caminho conhecido e redundante, sem que haja perda de dados.

Na planta deste projeto há 1 gateway, 1 ponto de acesso e 6 sensores WirelessHART, sendo 4 de temperatura, 1 de vazão e 1 de nível. A Figura 10 ilustra a estrutura de rede da planta.

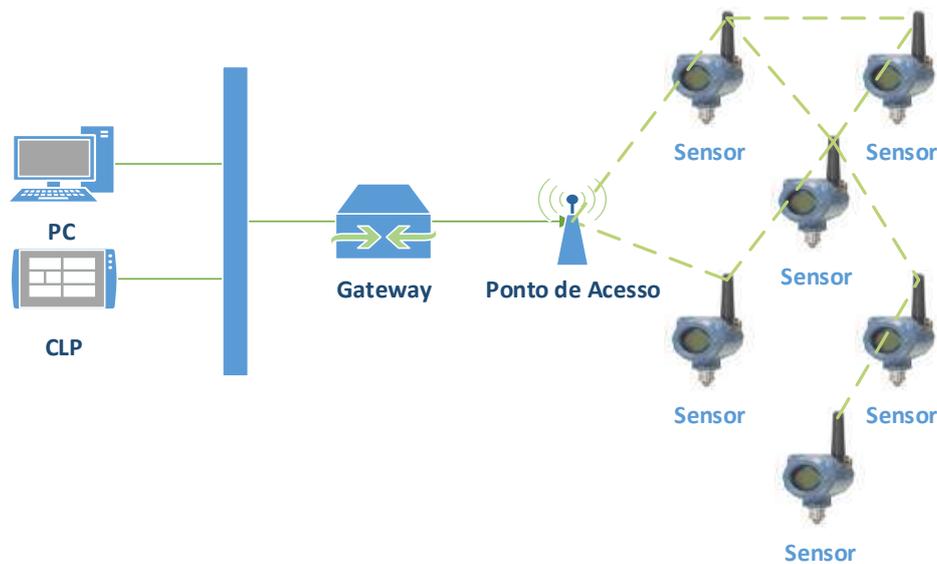


Figura 10. Estrutura de rede da planta.

6 CONFIGURAÇÃO DA PLANTA

O fluxo de informação da planta se dá da seguinte forma, os valores dos sensores são lidos pelos sensores WirelessHART e enviados ao gateway, sendo assim disponibilizados pelo servidor OPC da Emerson, com um IP próprio na rede interna criada. Para que o CLP receba esses valores, a fim de realizar o controle da planta, é necessário que um cliente OPC leia os dados disponíveis no servidor OPC da Emerson (gateway) e escreva no servidor OPC da Rockwell (CLP). A Figura 11 ilustra o fluxo de informação da planta.



Figura 11. Fluxo de informação da planta.

Para a criação do cliente OPC, foi utilizada o ambiente integrado de desenvolvimento da Microsoft, Visual Studio 2013. O código está disponível no apêndice.

6.1.1 SERVIDOR OPC DA EMERSON

O protocolo WirelessHART possui um gerenciador de rede, como foi dito na seção 5.2. O gerenciador de rede AMS faz esse papel e foi através dele que o gateway foi configurado, estando disponível através do IP 150.165.52.51.

O gateway oferece uma interface gráfica para visualização e gerenciamento dos dispositivos da rede WirelessHART. Também, nesta interface, que pode ser visualizada pelo browser como visto na Figura 12, é possível escolher as variáveis do servidor OPC que se deseja acompanhar.

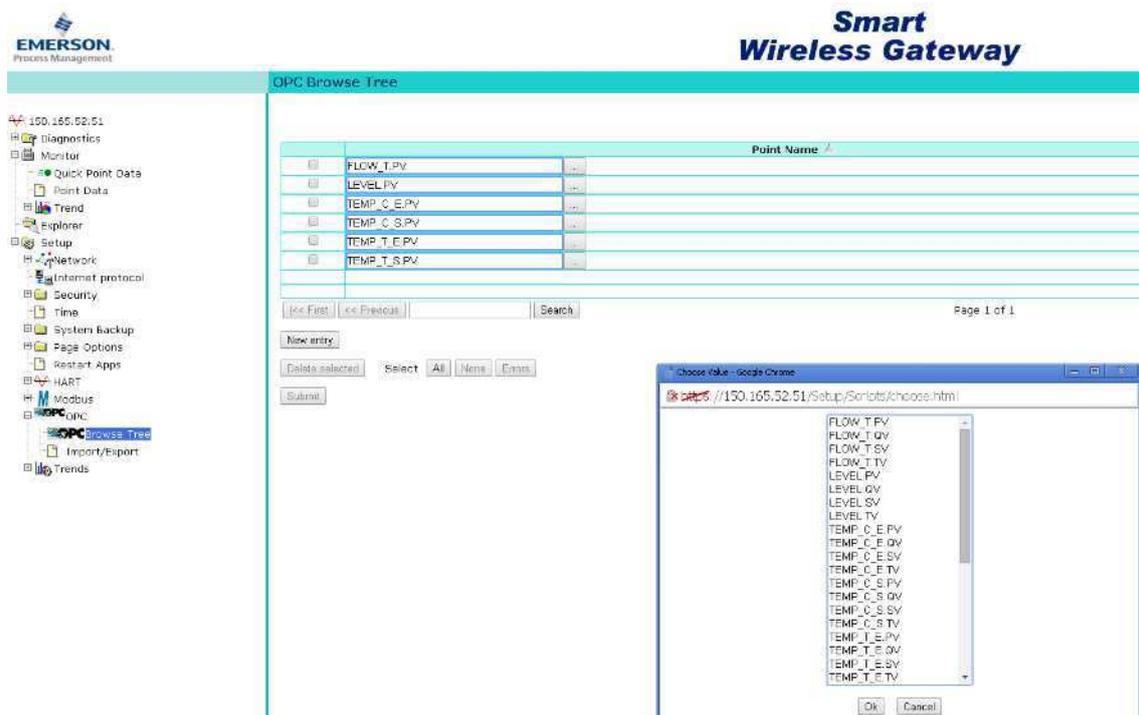


Figura 12. Interface gráfica do gateway da Emerson.

6.1.2 SERVIDOR OPC DA ROCKWELL

A configuração das variáveis OPC do CLP são feitas diretamente pela interface gráfica em que o programa ladder é desenvolvido, o RSLogix5000. As variáveis que forem declaradas dentro da janela de tags de controle (*Controller Tags*), são automaticamente disponibilizadas pelo servidor OPC do CLP.

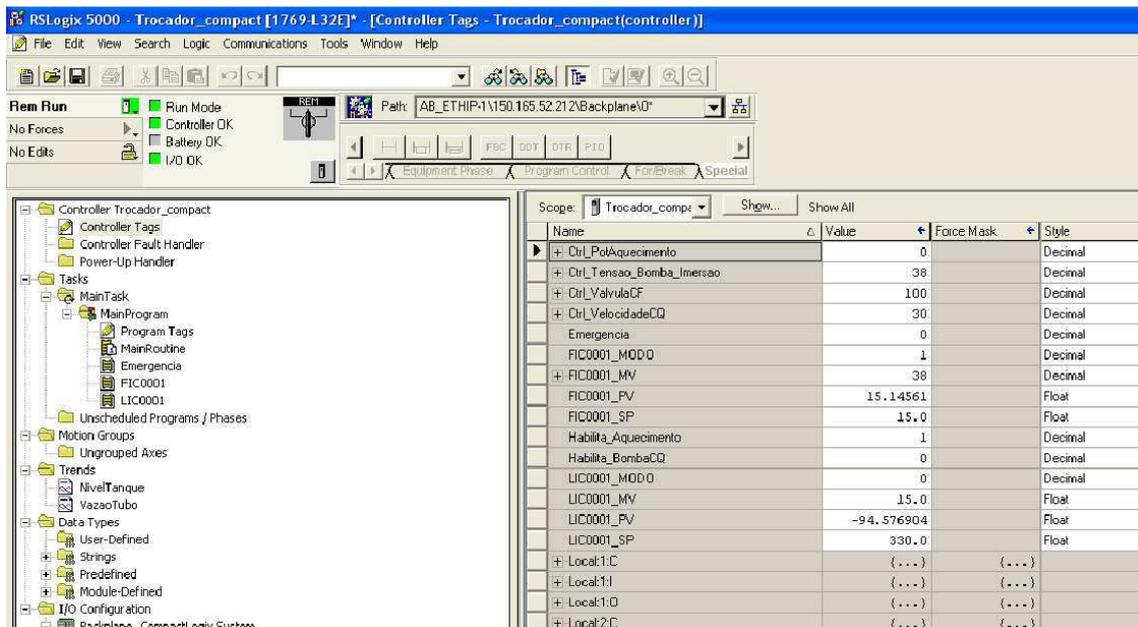


Figura 13. Interface gráfica do RSLogix5000 com as variáveis disponíveis no servidor OPC do CLP.

As variáveis utilizadas para o controle da vazão, ilustrado na Figura 13, foram:

- FIC0001_MODO que indica que o controlador está habilitado, caso seu valor seja 1, e desabilitado, caso contrário.
- FIC0001_MV representando o valor da variável manipulada, que neste caso é a tensão na bomba de imersão em porcentagem.
- FIC0001_PV é o valor da variável de processo, que é o fluxo da água em L/h.
- FIC0001_SP é o valor de referência escolhido para o fluxo.

6.1.3 CLIENTE OPC

O cliente OPC que lê do servidor da Emerson e escreve no servidor da Rockwell, foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação C# e o ambiente integrado de desenvolvimento Visual Studio 2013, da Microsoft. Na verdade, o código já tinha sido desenvolvido anteriormente. Portanto, foram feitas algumas adaptações.

Percebeu-se a necessidade de aumentar a taxa de amostragem do sensor de vazão. Para isso, foi utilizado uma interface HART USB da MACTek Corporation que lê continuamente os valores do sensor de vazão e os disponibiliza via porta USB do computador.



Figura 14. Interface HART USB Viator.

Como este dispositivo, mostrado na Figura 14, utiliza o protocolo HART, foi então necessário criar um servidor HART para este fim. A partir daí, o cliente OPC desenvolvido lê o valor do sensor via o servidor HART criado e o escreve no servidor OPC do CLP. Com essa alteração, o tempo de amostragem foi reduzido em 10 vezes, de 15 s para 1.5 s, possibilitando resultados melhores no experimento de identificação da malha de vazão.

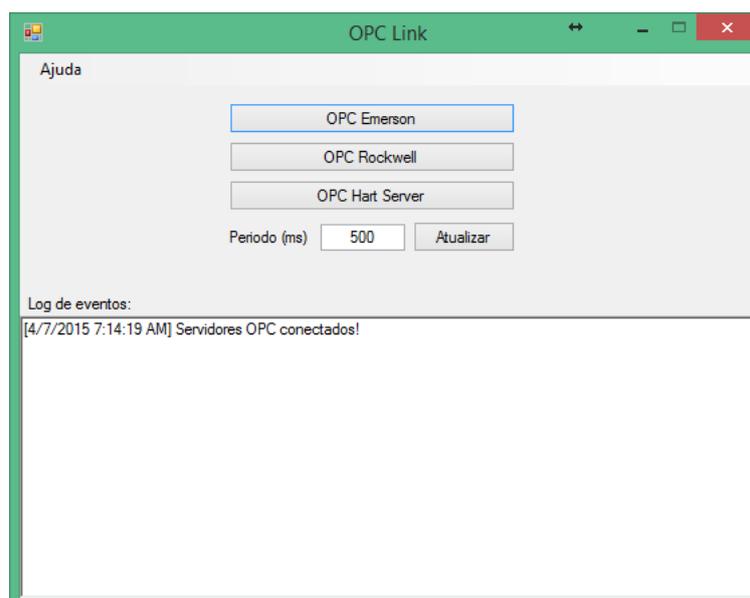


Figura 15. Cliente OPC em execução.

7 IDENTIFICAÇÃO DA MALHA DE VAZÃO

Obter informação sistemática a partir de dados experimentais é um aspecto chave de qualquer trabalho científico. A informação obtida leva a formulação de um modelo do sistema em consideração. O modelo é um tipo de padrão que representar e explica os dados experimentais, servindo também para realização de futuras previsões de respostas do sistema.

Das três malhas existentes, escolheu-se a malha de vazão para realização da identificação do modelo e o projeto de um controlador PID. Esta malha é representada pela ilustração da Figura 7.

A ferramenta utilizada para a identificação do modelo foi o System Identification Tools. Esta ferramenta faz parte do software MATLAB e pode ser vista na Figura 16. Os dados que foram importados pela ferramenta foram obtidos através de um experimento de resposta ao degrau em malha aberta para a malha de vazão, como será visto na próxima seção.

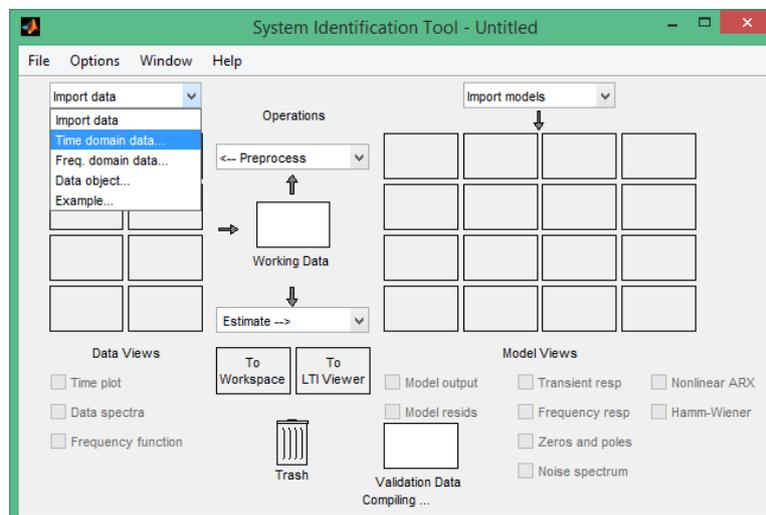


Figura 16. System Identification Tool.

7.1.1 RESPOSTA AO DEGRAU DA MALHA DE VAZÃO

Para a realização deste experimento foi utilizado o *Simulink*, que é uma ferramenta que também é parte do *Matlab*. O modelo esquemático do arquivo utilizado pode ser visto na Figura 17. Este modelo lê 3 variáveis do servidor OPC da *Rockwell* (CLP), cujos nomes são:

- **FlowSP** representa o valor de referência para o fluxo e não foi utilizado neste experimento, apenas para o experimento em malha fechada com controlador.
- **FlowMV** representa o valor da tensão na bomba de imersão, sendo expresso em porcentagem.
- **FlowPV** é o valor lido da vazão na saída da malha, expresso em litros por hora.

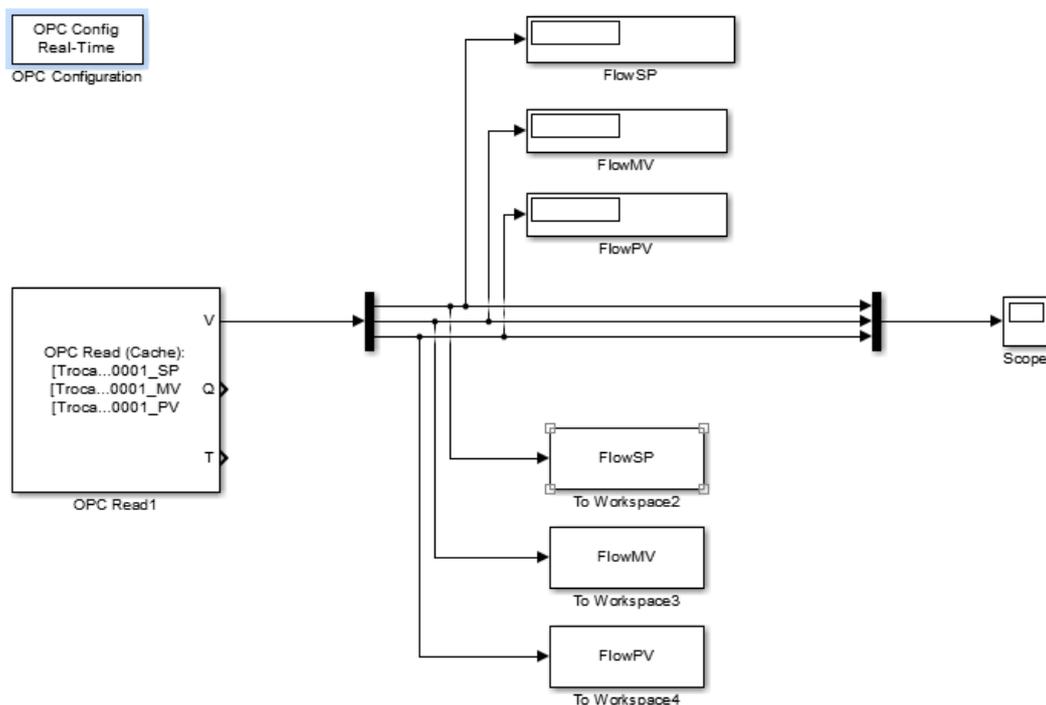


Figura 17. Esquemático do coletor de dados da malha de vazão desenvolvido no Simulink.

O experimento durou 4 minutos. Inicialmente a tensão na bomba de imersão era de 50 % e a vazão lida na saída da malha era de 19 L/h, em média. Durante esse tempo, foram dados dois degraus. Mais especificamente, aos 49.5 s o valor da tensão na bomba foi alterado de 50 % para 60 %. Como pode ser visto na Figura 18, a vazão subiu para um

valor em torno dos 22 L/h. Aos 135 s o valor da tensão na bomba foi alterado de volta para 50 %, enquanto que a vazão passou voltou para um valor em torno de 19 L/h. Por fim, aos 246 s, o experimento foi finalizado.

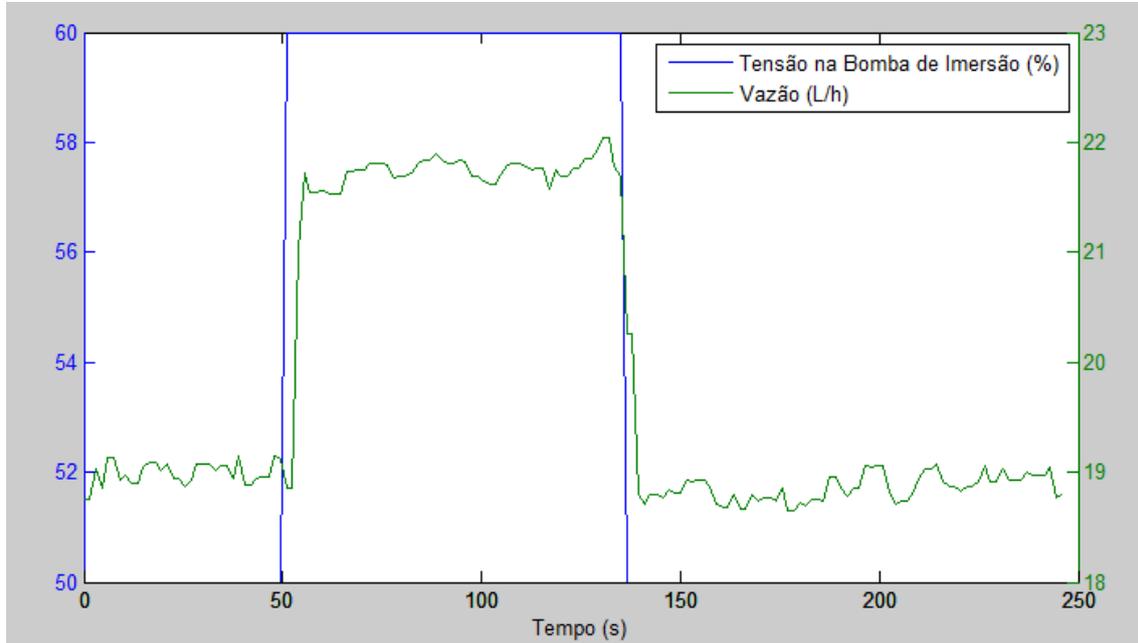


Figura 18. Experimento de resposta ao degrau da malha de vazão.

7.1.2 IDENTIFICANDO A MALHA DE VAZÃO

Com os dados obtidos no experimento de resposta ao degrau para a malha de vazão, foi utilizado a ferramenta *System Identification Tool* para realização da identificação do modelo da malha. Antes de aplicar o algoritmo de identificação, foi removido os valores iniciais tanto da entrada quanto da saída. O modelo escolhido foi um de primeira ordem com atraso, dado pela Equação (1).

$$G(s) = \frac{K_p}{1+T_p s} e^{-T_d s}, \quad (1)$$

Em que K_p é o ganho, sendo adimensional; T_p é a constante de tempo do sistema [s] e T_d é o atraso [s]. A validação foi feita em comparação com um modelo da mesma forma, mas sem atraso. O resultado, como pode ser visto na Figura 19, foi que o modelo

com atraso se ajustou melhor aos dados experimentais, com um ajuste percentual de 84.23 % em comparação a 82.4 % do modelo sem atraso.

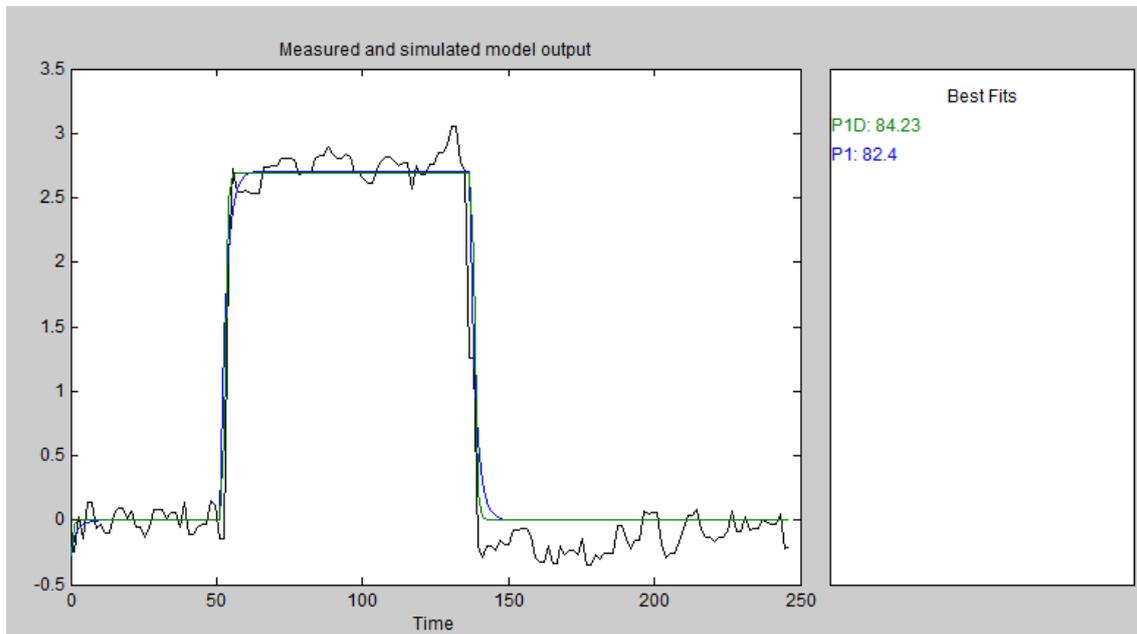


Figura 19. Validação dos resultados dos modelos identificados. O modelo com atraso está representado pela cor verde, já o sem atraso pela cor azul.

Os valores dos parâmetros do modelo que mais se ajustou aos dados experimentais, o modelo com atraso, foram: $K_p = 0.27$, $T_p = 0.65 \text{ s}$ e $T_d = 1.32 \text{ s}$.

8 PROJETO DO CONTROLADOR DA MALHA DE VAZÃO

Com os parâmetros do modelo de primeira ordem com atraso obtidos, foi realizado o projeto de um controlador PID utilizando a ferramenta *PID Tuner* do Matlab. As especificações do controlador foram que o sistema deveria ter um tempo de acomodação menor que 10 s e um sobressinal não maior que 10 %, visto que a malha de vazão é considerada rápida. A Figura 20 ilustra a resposta ao degrau, plotada pelo *PID Tuner*, do modelo encontrado no experimento de identificação, para um controlador sintonizado de acordo com as especificações dadas.



Figura 20. Simulação da resposta ao degrau em malha fechada feita no *PID Tuner*.

O controlador PID obtido é dado na forma paralela, representado por:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (2)$$

Em que K_p é o ganho proporcional, K_i é o ganho integral e K_d o ganho derivativo. Os valores dos parâmetros sintonizados para o controlador são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros do controlador da malha de vazão.

Parâmetros de Controle	
K_p	0.97517
K_i	1.6096
K_d	0.1477
Performance e Robustez	
Tempo de subida	2.3 segundos
Tempo de acomodação	8.35 segundos
Sobressinal	9.45 %
Estabilidade em malha fechada	Estável

A validação do controlador projetado para a malha de vazão foi feita fechando a malha e realizando experimentos, alterando o valor de referência. Para isso, foi inserido o bloco PID no programa ladder do controlador lógico programável da planta referente a malha de vazão. Os parâmetros deste bloco foram configurados conforme os valores da Tabela 3, como pode ser visualizado na Figura 21.

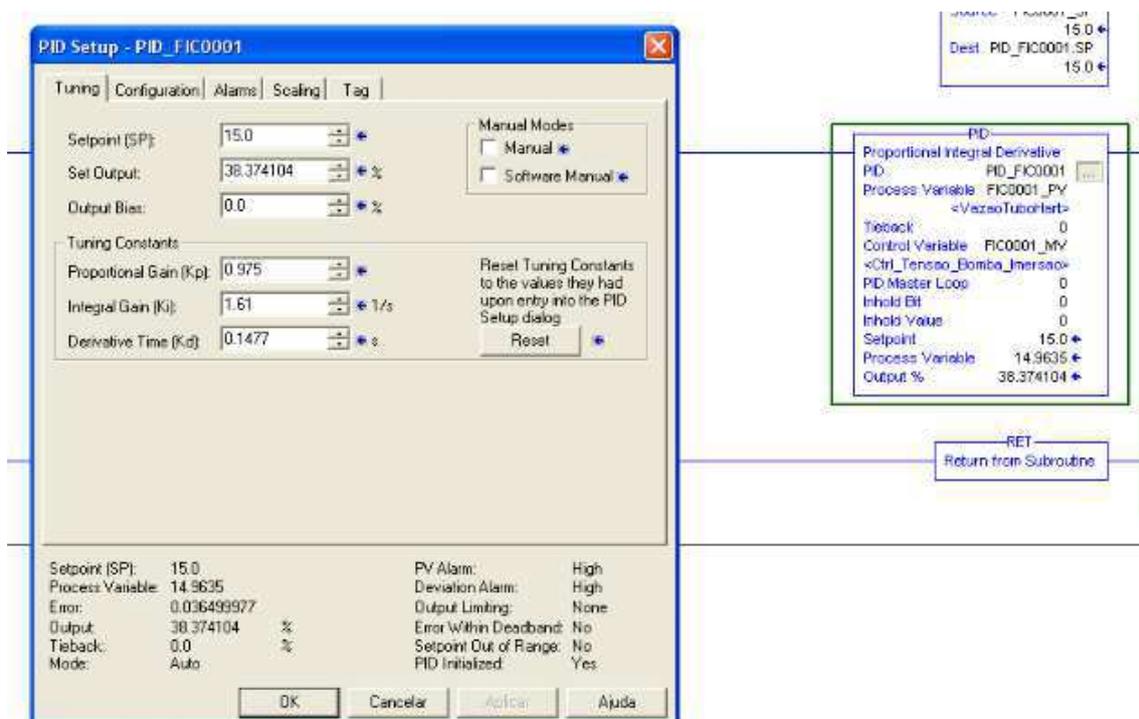


Figura 21. Configuração dos parâmetros do bloco PID no CLP da Rockwell.

Para este experimento de validação do controlador, as condições iniciais era que o valor de referência estava em 15 L/h e a variável de processo estava oscilando em torno de 2 % desse valor, como pode ser visto na Figura 22.

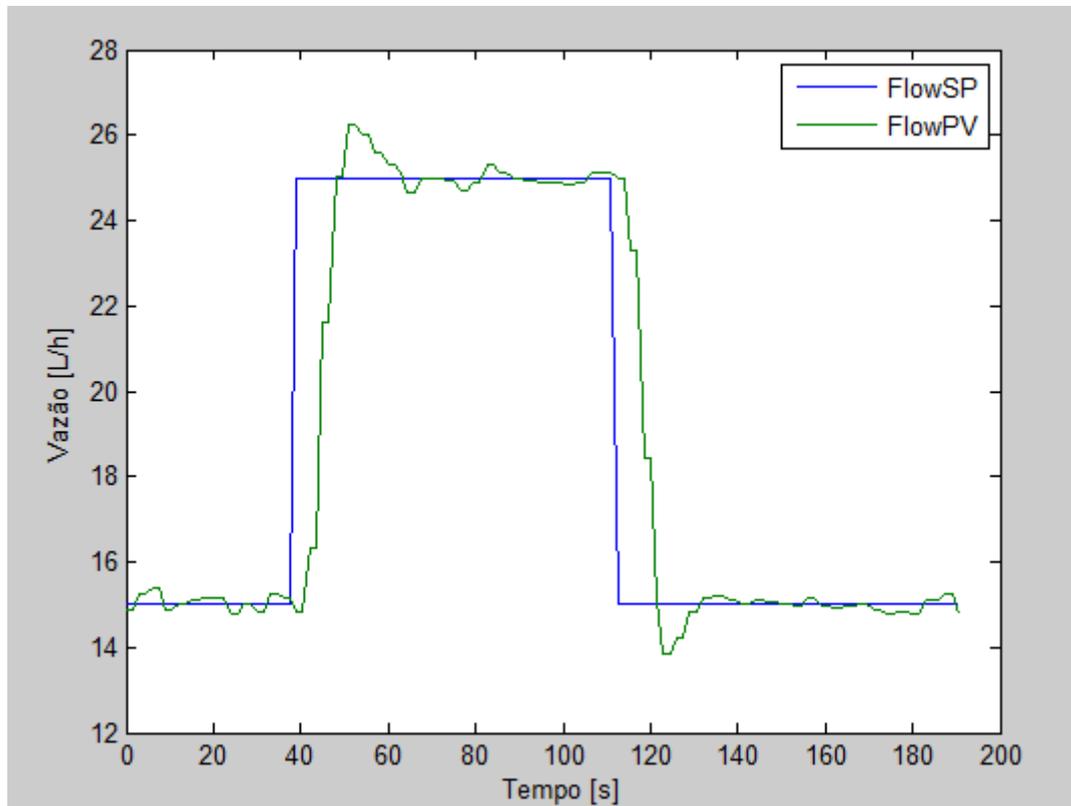


Figura 22. Gráfico do experimento em malha fechada da vazão.

Após aproximadamente 37 s o valor de referência foi aumentado 10 unidades, atingindo 25 L/h. Com esse degrau, foi possível fazer a validação do controlador projetado, pois, pelo gráfico, conclui-se que o tempo de subida foi de aproximadamente 5 s, o tempo de acomodação ficou em torno dos 15 s e o sobressinal foi de 6 %.

9 IDENTIFICAÇÃO DA MALHA DE NÍVEL

Utilizando a mesma sistemática para identificação da malha de fluxo, foi identificado um modelo de primeira ordem com atraso para a malha de nível, usando as mesmas ferramentas e o experimento de um degrau.

9.1.1 RESPOSTA AO DEGRAU DA MALHA DE NÍVEL

O modelo esquemático do arquivo do *Simulink*, utilizado para coletar os dados do experimento de resposta ao degrau, pode ser visto na Figura 23. Este modelo lê 2 variáveis, uma do servidor HART e outra do servidor OPC da *Rockwell* (CLP), cujos nomes são:

- **Flow** representa a o fluxo em L/h. É a entrada da malha de nível.
- **Level** representa o nível de água, em mmH_2O , no tanque de nível

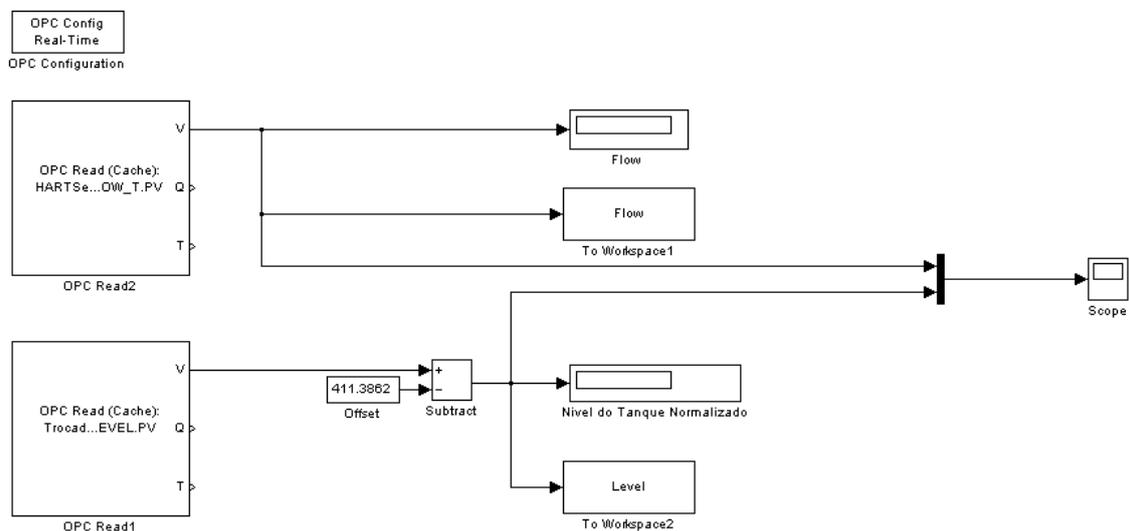


Figura 23. Esquemático do coletor de dados da malha de nível desenvolvido no Simulink.

O experimento durou 30 minutos no total. Inicialmente o fluxo estava a 20 L/h e o nível em 300 mmH₂O. Aos 3 minutos de experimento foi dado um degrau de duas unidades no fluxo, passando de 20 para 22 L/h. Os dados foram coletados e armazenados

na área de trabalho do Matlab para realização da identificação. É importante notar que o nível absoluto é inferior ao que é realmente visualizado, pois o sensor mede um diferencial de pressão. Portanto, foi necessário fazer uma subtração para normalizar o nível.

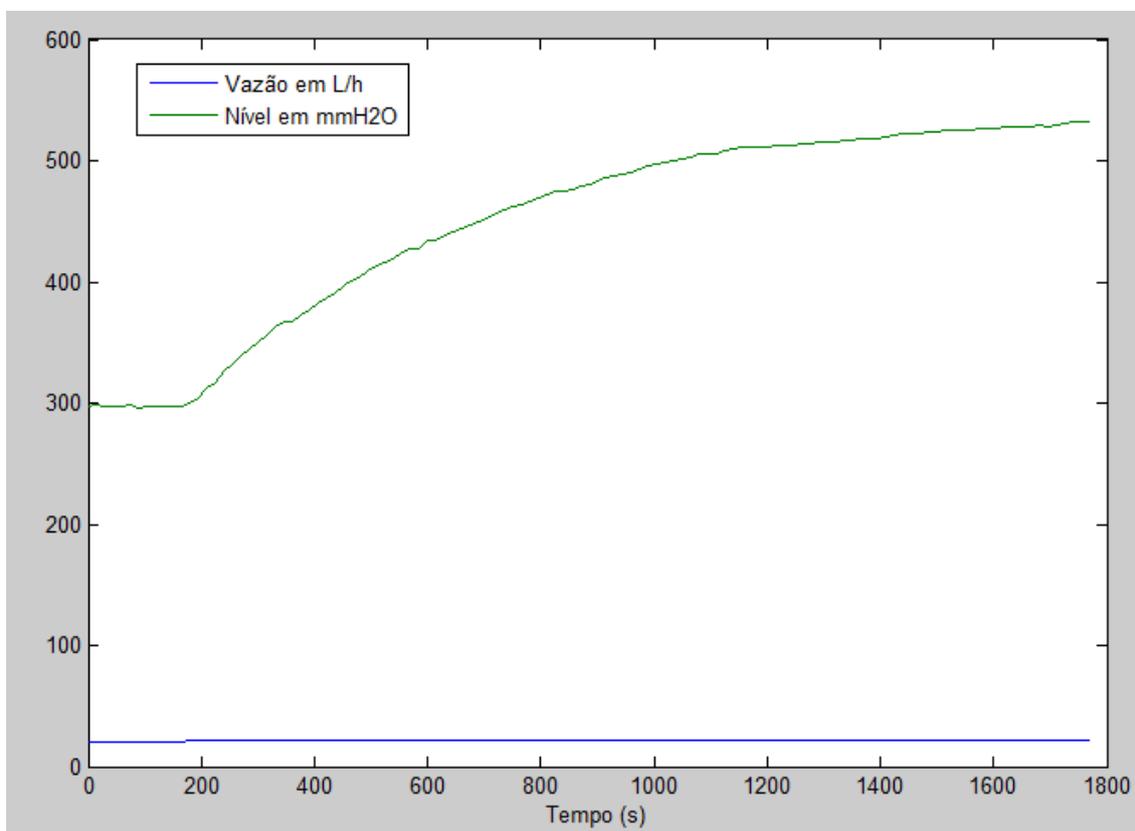


Figura 24. Experimento de resposta ao degrau da malha de nível.

9.1.2 IDENTIFICANDO A MALHA DE NÍVEL

O modelo escolhido para a malha foi o de primeira ordem com atraso, o mesmo utilizado para a malha de vazão e que é representado pela equação (1). Antes de utilizar o *System Identification Tool*, os valores iniciais foram removidos.

O resultado foi um modelo ajustado em 97.51 % em relação aos dados experimentais. Pela Figura 25 é possível verificar o quanto o modelo identificado, representado pela linha azul, representa os dados reais, representados pela linha preta.

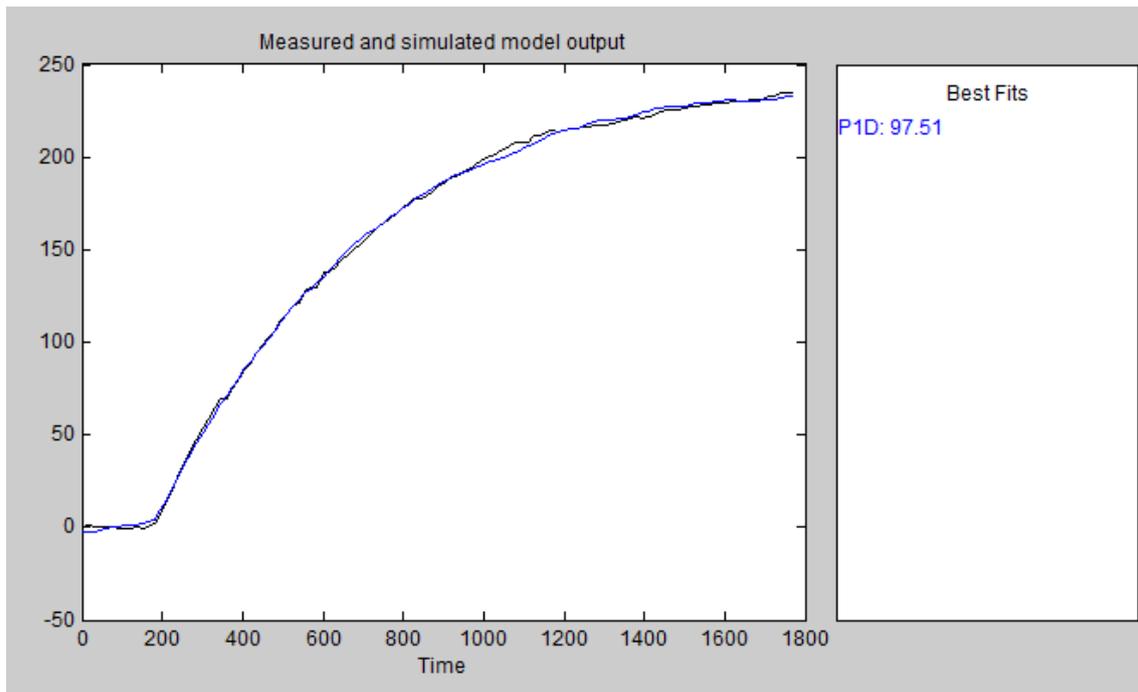


Figura 25. Validação dos resultados do modelos identificado para a malha de Nível.

Os valores dos parâmetros do modelo identificado foram: $K_p = 111$, $T_p = 536$ s e $T_d = 2.05$ s.

10 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi explicado o funcionamento de um trocador de calor do tipo casco-tubos, mostrando suas características físicas e funcionais.

No que diz respeito ao sensoriamento dos variáveis de processo da planta, foi utilizado o protocolo WirelessHART, sendo possível verificar a eficácia da comunicação, que não apresentou falhas durante todos os experimentos realizados. Um ponto a se considerar é o tempo de inicialização da rede e dos sensores, que leva cerca de 5 a 10 minutos.

Com o intuito de aplicar na prática a teoria de controle, foi realizado a identificação da malha de nível e a identificação e controle da malha de vazão da planta. Utilizando ferramentas computacionais, obteve-se um modelo com ajuste de 84.23 %, à partir dos dados experimentais, para a malha de vazão. Ainda para a malha de vazão, um controlador PID na forma paralela foi projetado e sintonizado com base no modelo identificado. Os parâmetros obtidos foram inseridos no bloco PID do CLP e foi realizado um experimento de validação. Através da Figura 22, os valores de tempo de subida, tempo de acomodação e o sobressinal foram encontrados. Comparando-os com os valores calculados na seção 8, verificou-se que há pequenas discrepâncias, que podem ser explicadas pelo fato de que o modelo identificado é aproximado e apresenta um erro de ajuste na curva. Também, um fator importante e que afeta diretamente uma boa identificação é a taxa de amostragem. Os sensores WirelessHART utilizados tem um tempo de amostragem mínimo de 15 s, o que não é viável para malhas em que há alterações rápidas como a malha de vazão. Para resolver esse problema, foi utilizado uma interface USB HART, que diminuiu o tempo de amostragem em 10 vezes. Tendo em vista os fatores limitantes mencionados, os resultados obtidos podem ser considerados satisfatórios.

Como proposta de trabalhos futuros, é possível considerar a possibilidade de criar uma malha de controle em cascata para controlar o nível do tanque de nível à partir do controle da vazão, já que a malha de vazão já está sendo controlada e a malha de nível já foi identificada.

BIBLIOGRAFIA

[1] DELATORE, Fabio. **Controle multivariável em redes de trocadores de calor com bypasses**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-13072011-145446/>>. Acesso em: 08 Out 2014.

[2] Padhee, Subhransu; Bhushan, Yuvraj; Singh, Yaduvir; **Internal Model Based PID Control of Shell and Tube**. 2011. Thapar University, Patiala, Punjab, India.

[3] **Compact Logix User Manual**, Disponível em:
<<http://ab.rockwellautomation.com/programmable-controllers/compactlogix>> Acesso em: 20 Dez 2014

[4] **WirelessHART Protocol**. Disponível em:
<<http://www.hartcomm.org/>> Acesso em: 20 Dez 2014.

[5] **About OPC - What is OPC?** Disponível em:
<http://www.opcfoundation.org/Default.aspx/01_about/01_what_is_opc?MID=AboutOPC>. Acesso em: 22 Dez 2014.

[6] **System Identification Toolbox Documentation**. Disponível em:
<<http://www.mathworks.com/help/ident/index.html>>. Acesso em: 5 Fev 2015.