

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

**JACQUELINE PINHO PAIXÃO DE SOUZA**

**AMBIENTE DIDÁTICO PARA CONTROLE AVANÇADO DE  
PROCESSOS INDUSTRIAIS**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2016**

**JACQUELINE PINHO PAIXÃO DE SOUZA**

**AMBIENTE DIDÁTICO PARA CONTROLE AVANÇADO DE  
PROCESSOS INDUSTRIAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Neves Junior

**CURITIBA**

**2016**

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

P149a Paixão, Jacqueline Pinho  
2016 Ambiente didático para controle avançado de processos industriais /  
pediátrico usando aplicativo móvel / Jacqueline Pinho Paixão de Souza.--  
2016.  
180 f. : il. ; 30 cm.

Texto em português, com resumo em inglês

Disponível também via World Wide Web

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e  
Informática Industrial, Curitiba, 2016

Bibliografia: f. 119-131

1. Automação industrial – Estudo e ensino. 2. Processos de  
fabricação – Estudo e ensino. 3. Processos de fabricação – Testes. 4.  
Laboratórios – Projetos e construção. 5. MATLAB (Programa de  
computador). 6. Métodos de simulação. 7. Engenharia elétrica –  
Dissertações. I. Neves Junior, Flávio. II. Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

---

CDD: Ed. 22 – 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Dissertação Nº. \_\_\_\_\_

# **Ambiente Didático para controle Avançado de Processos Industriais.**

por

**Jacqueline Pinho Paixão de Souza**

**Orientador: Prof. Dr. Flávio Neves Junior (UTFPR)**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às **14h** do dia 27 de outubro de 2016. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

---

Prof. Dr. Flávio Neves Junior  
(Presidente – UTFPR)

Prof. Dr. Luiz Carlos Felizari  
(IFPR)

---

Prof. Dr. Guilherme Alceu Schneider  
(UTFPR)

Visto da coordenação:

---

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.  
(Coordenador do CPGEI)

Dedico esta Dissertação ao meu esposo, Gustavo, pelo incentivo, apoio, paciência e sabedoria de seus conselhos, e aos meus pais, Jaira e Israel, que sempre me proporcionaram, além de extenso amor e carinho, os conhecimentos de integridade para meu desenvolvimento como ser humano.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por ter me dado condições necessárias para a realização deste trabalho.

Agradeço ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP –, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – e do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT – PRH10-UTFPR.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Flávio Neves Junior, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória e à Profa. Dra. Lúcia Valéria Ramos de Arruda por suas contribuições.

Ao meu marido e pais, pois sem o apoio deles seria muito difícil vencer este desafio.

À UTFPR, em especial a toda equipe do CPGEI, professores, funcionários e alunos, por toda ajuda recebida.

“A mente que se abre a uma nova ideia,  
jamais voltará ao seu tamanho original”  
(Albert Einstein)

## RESUMO

SOUZA, Jacqueline Pinho Paixão de. **Ambiente Didático para Controle Avançado de Processos Industriais**. 2016. 180 f. Dissertação - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica e informática Industrial - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Cursos educacionais voltados para área de Automação Industrial e Controle de Processos geralmente abordam conteúdos teóricos sobre técnicas de modelagem e estratégias de controle, porém o mercado atual se encontra com deficiência de profissionais que saibam utilizar esses conceitos na prática. Com os avanços tecnológicos é possível reestruturar a metodologia de ensino desses cursos, implementando em sua grade curricular aulas práticas para complementar as aulas teóricas. As práticas pedagógicas têm por objetivo transformar o aluno receptor de informações em executor das atividades, as quais devem ser dinâmicas e simular situações reais, servindo de guia para ações a serem tomadas. Atualmente, são várias as ferramentas disponíveis que podem ser utilizadas na metodologia de ensino, servindo como facilitadoras da aprendizagem auxiliando os alunos nos testes e realizações práticas das teorias. Utilizando algumas dessas ferramentas, este trabalho tem como propósito a estruturação de um ambiente educacional integrado (laboratório), para realização de cursos e treinamentos com aulas práticas em automação e controle de processos.

**Palavras-chave:** Laboratório Didático. Foundation Fieldbus. Modbus. OPC.



## ABSTRACT

SOUZA, Jacqueline Pinho Paixão de. **Teaching Environment for Advanced Control of Industrial Processes**. 2016. 180 f. Dissertation - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e informática Industrial - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Educational courses in the field of Industrial Automation and Process Control generally approach theoretical content about modeling techniques and control strategies, but the current market needs in fact of professionals who know how to use these concepts in practice. With new technologies, it is possible to restructure the teaching methodology of these courses in their curriculum, by implementing practical classes to complement the lectures. Pedagogical practices aim to turn the student, receiver of information, into a performer of the activities, which should be dynamic and simulate real situations, serving as a guide for actions to be taken. Currently, there are several tools available that can be used in teaching methodology, serving as facilitators of learning, helping students in tests and in practical realization of the theories. Using some of these tools, this academic dissertation aims at organizing an educational environment (laboratory), for conducting courses and training with practical lessons in Automation and Process Control.

**Keywords:** Didactic Laboratory. Foundation Fieldbus. Modbus. OPC.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de Estrutura de um Laboratório Virtual .....	28
Figura 2 - Exemplo de Estrutura de um Laboratório Misto .....	29
Figura 3 - Integração de Tecnologias para Simulação de Processos Industriais .....	30
Figura 4 - Tipos de Blocos Lógicos .....	32
Figura 5 - Estrutura das Mensagens Protocolo Modbus .....	37
Figura 6 - Modelo de Mensagens Modbus .....	38
Figura 7 - RS232, RS485 e Modbus TCP como meio físico para protocolo Modbus	39
Figura 8 - Formato do telegrama (framing) usado no Modbus RTU.....	41
Figura 9 - Modelo OSI .....	44
Figura 10 - Escalonamento de acordo com a lista de transmissão .....	46
Figura 11 - Ilustração Microciclo com transmissões cíclicas e acíclicas .....	47
Figura 12 - Camada de Usuário .....	49
Figura 13 - Arquitetura Distribuída entre H1 e HSE .....	50
Figura 14 - Número máximo de repetidores em um segmento H1 .....	53
Figura 15 - Topologias Fieldbus .....	54
Figura 16 - Rede HSE/H1 .....	56
Figura 17 - Estrutura interna OPC.....	61
Figura 18 - Procedimento para leitura das variáveis do MATLAB via OPC.....	65
Figura 19 - MATLAB/Simulink .....	66
Figura 20 - System 800xA (SDCD fabricante ABB).....	68
Figura 21 - Arquitetura <i>Aspect Object</i> .....	69
Figura 22 - Estrutura do Laboratório LACOS .....	73
Figura 23 - Elementos básicos e relações do processo de modelagem e simulação	79
Figura 24 - Sistema de evaporação com 2 estágios .....	81
Figura 25 - Ambiente 1- Laboratório Virtual.....	91
Figura 26 - Ambiente 2.....	93
Figura 27 - Projeto criado no Control Builder .....	95
Figura 28 - SoftController .....	96
Figura 29 - OPC Server Configuration com IP do <i>hardware</i> simulado .....	96
Figura 30 - Receita.....	97
Figura 31 - Projeto Control Builder – modo <i>simulated</i> .....	99
Figura 32 - IHM do Processo de Evaporação- Sistema Supervisório da ABB.....	100
Figura 33 - Ambiente 3 - Laboratório Misto .....	101
Figura 34 - Projeto Control Builder- Utilizando CLP800M ABB .....	102
Figura 35 - OPC Server Configuration com IP do CLP 800M ABB .....	103
Figura 36 - Módulos de entradas e saídas analógicas –Advantech .....	105
Figura 37 – Sensores V1, V2, Tc, x1 e x2 - Ambiente 1.....	106
Figura 38 - Atuadores f0, f1, f2,fc e fs - Ambiente 1 .....	107

Figura 39 - Temperaturas T1, T2, Tc e Ts – Ambiente 1 .....	107
Figura 40 - Sensores V1, V2, Tc, x1 e x2 - Ambiente 2 .....	109
Figura 41 - Atuadores f0, f1, f2,fc e fs - Ambiente 2 .....	110
Figura 42 - Temperaturas T1, T2, Tc e Ts – Ambiente 2 .....	110
Figura 43 - Sensores V1, V2, Tc, x1 e x2 - Ambiente 3 .....	111
Figura 44 - Atuadores f0, f1, f2,fc e fs - Ambiente 3 .....	111
Figura 45 - Temperaturas T1, T2, Tc e Ts – Ambiente 3 .....	112
Figura 46 – Resultados das variáveis f0, f1, f2 e fc, Ambiente 2- supervisorío ABB .....	114
Figura 47 – Resultados das variáveis f0,f1,f2 e fc Ambiente 3- supervisorío ABB ..	114
Figura 48- OPCTool .....	152
Figura 49- Conexão de cliente OPC.....	152
Figura 50-Leitura das variáveis via OPCTool .....	153
Figura 51- Configuração da DCOM.....	153
Figura 52- Configuração do servidor – Fieldbus Builder .....	155
Figura 53-Expansão CI860 Foundation Fieldbus .....	156
Figura 54- <i>Link Device</i> LD800HSE ABB .....	156
Figura 55- Programação da rede Foundation Fieldbus .....	157
Figura 56-Lógica de Blocos.....	157
Figura 57- Transmissor TT302 .....	158
Figura 58-Transmissor LD302.....	158
Figura 59-Parametrização Transmissores .....	159
Figura 60-Configuração HSE .....	160
Figura 61- Leitura de dados do Transmissor LD302 .....	161
Figura 62- Leitura de dados do Transmissor TT302 .....	161
Figura 63- Criação do Projeto - Syscon .....	162
Figura 64- Configuração redes HSE e H1 .....	163
Figura 65- Parametrização dos Blocos de Recursos, Transdutores e Funções.....	163
Figura 66- Configurações do <i>Host</i> .....	164
Figura 67- Visão geral do projeto criado .....	164
Figura 68- Configuração módulo 4024 .....	167
Figura 69-Configuração módulo 4019.....	168
Figura 70-Configuração programação Modbus .....	169
Figura 71- Configuração <i>enable</i> e <i>req</i> .....	170
Figura 72-Programação Modbus.....	171
Figura 73-Programação Módulos de Entradas e Saída Analógicas- Modbus .....	172
Figura 74-Controle Concentração x2 .....	174
Figura 75-Controle de Volume Evaporador 1 através válvula f0 .....	175
Figura 76-Controle de Volume do Evaporador 1 através da válvula f1 .....	176
Figura 77-Controle de Volume do Evaporador 2.....	177
Figura 78-Controle de Temperatura do Condensador.....	178

Fotografia 1 - Planta Didática Laboratório de Instrumentação, UTFPR Cornélio Procópio .....	26
Fotografia 2 - Transmissor de pressão LD302 SMAR.....	32
Fotografia 3 - Pera utilizada em Aparelho Medidor de Pressão Esfigmomanômetro .....	36
Fotografia 4 - <i>Link Device</i> - LD800HSE (ABB) e DF63 (SMAR.....	55
Fotografia 5 - LACOS (Laboratório de Controle de Sistemas) .....	74
Fotografia 6 - <i>Kit</i> SMAR com transmissores LD302, TT302, FI302 e plataforma DFI302 .....	75
Fotografia 7 - LD800HSE e Fonte Pepperl+Fuchs .....	76
Fotografia 8 - Módulos de Entradas/Saídas Advantech .....	77
Fotografia 9 - CI853, CI860 e CLP AC800M (ABB).....	78
Quadro 1- Exemplos de Blocos de Função .....	33
Quadro 2 - Comprimento do barramento H1 .....	52
Quadro 3- Comprimento máximo para cada modelo de cabo .....	52
Quadro 4- Receita .....	89
Quadro 5 - Valores de parametrização dos PID.....	180

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS e ACRÔNIMOS

AI	<i>Analog Input</i>
ASCII	<i>American Code for Information Interchange</i>
CD	<i>Compel Data</i>
cff.	<i>Capabilities File Format</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
COM	<i>Component Object Model</i>
DCOM	<i>Distributed Component Object Model</i>
DD	<i>Device Description</i>
DDL	<i>Device Description Language</i>
DO	<i>Digital Output</i>
EDDL	<i>Electronic Device Description Language</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FAS	<i>Fieldbus Access Layer</i>
FCTP	<i>Foundation Certified Training Program</i>
FISCO	<i>Fieldbus Intrinsically Safe Concept</i>
FF	Foundation Fieldbus
FFB	Blocos de Funções Flexíveis
FMS	<i>Fieldbus Message Specification</i>
FNICO	<i>Fieldbus Nonincendive Concept</i>
H	Hexadecimal
HSE	<i>High Speed Ethernet</i>
ID	Identidade
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IHM	Interface Homem Máquina
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISA	<i>Instrumental Society of American</i>
ISO	<i>Organization for Standardization</i>
ISP	<i>Interoperable Systems Project</i>
LAS	<i>Link Active Schedule</i>
LACOS	Laboratório de Controle de Sistemas
LD	<i>Linking Device</i>
LRC	<i>Longitudinal Redundancy Check</i>
mA	miliampère
mV	milivolts
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MES	<i>Manufacturing Execution System</i>
OPC	<i>Object Linking and Embedding for Process Control</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>

PC	<i>Personal Computer</i>
PID	Proporcional, Integral, Derivativo
PN	<i>Probe Node</i>
PR	<i>Probe Response</i>
psi	<i>Pounds per Square Inch</i>
PT	<i>Pass Token</i>
PTB	<i>Physikalisch Technische Bundesanstalt</i>
PV	<i>Process Variable</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SED	Sistema de Evento Discreto
SFC	<i>State Flow Chart</i>
sp	<i>setpoint</i>
SP50	<i>Standard and Practice</i>
TB	<i>Transducer Block</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
VCR	<i>Virtual Communication Relationships</i>
VI	<i>Virtual Instrument</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>
WCF	<i>Windows Communication Foundation</i>
WEB	Rede mundial também conhecida como www <i>World Wide Web</i>

## SÍMBOLOS

I/O	entrada/ saída
°C	graus Celsius
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
kHz	quilohertz
db	decibéis
km	quilômetro
Vcc	tensão contínua
v	versão
V	tensão
Mbit	megabit
s	segundo
$\rho$	densidade
kg	quilograma
m <sup>3</sup>	metros cúbicos
V	volume
F	vazão
W	massa de vazão da saída
X	concentração
H	entalpia
Q	fluxo de energia
A	área de transferência de calor
m <sup>2</sup>	metro quadrado
k	coeficiente de transferência de calor
T	temperatura
C	condensador
$\Delta$	diferença
Cp	Calor específico
e	erro de controle
Kc	ganho do controlador
M	massa de vazão da água fria (kg/s)
P	pressão (kPa)
kPA	quiloPascal
u	sinal de controle

<i>LN</i>	média logarítmica da temperatura
<i>L</i>	liquido denominado licor negro;
<i>V</i>	vapor
<i>IN</i>	dentro
<i>OUT</i>	fora
<i>w</i>	água
<i>s</i>	licor
<i>hot</i>	quente
<i>cold</i>	frio
<i>M<sub>V</sub></i>	variável manipulada
<i>G</i>	Ganho proporcional do controlador
<i>β<sub>C</sub></i>	Fator de ponderação do set-point
<i>S<sub>P</sub></i>	<i>Setpoint</i>
<i>P<sub>V</sub></i>	Variável de processo
<i>T<sub>d</sub></i>	Tempo derivativo do controlador
<i>T<sub>i</sub></i>	Constante de tempo integral do controlador
<i>T<sub>fil</sub></i>	Tempo do filtro da parte derivativa do controlador
<i>FilterOf</i>	Expressão para um filtro passa baixa da parte derivativa do controlador
bps	<i>bits</i> por segundo



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	18
1.2 PROBLEMA .....	19
1.3 OBJETIVO .....	19
1.4 JUSTIFICATIVA .....	21
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
<b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>23</b>
2.1 AMBIENTE DIDÁTICO (LABORATÓRIO INSTITUCIONAL).....	23
2.1.1 Laboratórios Reais .....	25
2.1.2 Laboratórios Virtuais.....	27
2.1.3.Laboratórios Mistos .....	28
<b>3. TECNOLOGIAS</b> .....	<b>31</b>
3.1 TRANSMISSORES INTELIGENTES .....	31
3.2 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO MODBUS.....	36
3.2.1 Modo ASCII.....	39
3.2.2 Modo RTU.....	40
3.2.3 Framing de Mensagem.....	41
3.3 FOUNDATION FIELDBUS .....	41
3.3.1 Estrutura de uma Rede Foundation Fieldbus.....	43
3.3.2 Subredes H1 .....	50
3.3.4 Linguagem DDL .....	56
3.3.5 Sistemas SDCD e redes Foundation Fieldbus .....	57
3.3.6 Segurança Intrínseca .....	58
3.3.7 Foundation Fieldbus para Propósitos Educacionais.....	60
3.4 TECNOLOGIA OPC .....	60
3.5 MATLAB.....	63
3.6 SISTEMAS DE CONTROLE MODERNO.....	67
3.6.1 System 800xA (ABB).....	69
3.6.2 System 302 (SMAR).....	70
<b>4. AMBIENTE DIDÁTICO (LABORATÓRIO)</b> .....	<b>72</b>
4.1 LACOS - LABORATÓRIO DE CONTROLE DE SISTEMAS (AMBIENTE DIDÁTICO) .....	72
4.2 SIMULAÇÃO DO PROCESSO.....	78
4.3 EVAPORADOR.....	80
<b>5. AMBIENTE SIMULADO</b> .....	<b>87</b>
5.1 AMBIENTE 1- LABORATÓRIO VIRTUAL.....	91
5. 2 AMBIENTE 2 – LABORATÓRIO MISTO .....	93

5.3 AMBIENTE SIMULADO COM EQUIPAMENTOS INTEGRADOS – LABORATÓRIO MISTO .....	101
5.4 RESULTADOS .....	106
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	115
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>116</b>
6.1 TRABALHOS FUTUROS .....	117
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>132</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>151</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>154</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>165</b>
<b>APÊNDICE E .....</b>	<b>173</b>
<b>APÊNDICE F.....</b>	<b>179</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Na busca por uma construção de um conhecimento sólido e duradouro, o uso de ferramentas e metodologias que possibilitem ao aluno um aprendizado de forma eficiente é imprescindível para a adequação e o acompanhamento do desenvolvimento tecnológico atual. Dessa forma, a utilização de *softwares* educacionais, vem sendo empregados com êxito para ajudar alunos e professores na aquisição e consolidação de conhecimentos em diversas áreas. Estudos comprovam que com auxílio destas ferramentas educacionais é possível unir os conceitos teóricos com aplicações práticas. Através de tais ferramentas é possível formar profissionais com várias habilidades e competências.

O uso de laboratórios junto a esses *softwares* educacionais é um subsídio valioso para a formação de discentes. Os laboratórios são locais onde os alunos têm o primeiro contato com a parte prática da disciplina e podem aprofundar os conhecimentos teóricos através de experimentos que os auxiliam no melhor entendimento do funcionamento dos processos e equipamentos.

A utilização dos recursos tecnológicos visa facilitar o acesso a informações, auxiliando na maneira de educar. O presente trabalho se insere neste contexto, já que busca o desenvolvimento de um ambiente didático que possibilita a integração de diversas tecnologias da área de automação, permitindo a criação de uma plataforma didática para o ensino na área de engenharia de automação e controle.

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Com os avanços tecnológicos, são várias as ferramentas disponíveis que podem ser utilizadas na sala de aula, servindo como facilitadoras da aprendizagem e auxiliando os alunos nas aulas práticas, permitindo ao discente assimilar com mais facilidade os conhecimentos que serão importantes para sua formação acadêmica e profissional. Além disso, já foi comprovado que boas práticas de laboratório servem

para a integração e consolidação de conhecimentos adquiridos em várias disciplinas possibilitando ao estudante uma visão abrangente e sistêmica dos problemas de engenharia. Desta forma, a motivação para a realização deste trabalho foi disponibilizar aos alunos um ambiente didático para realização de práticas laboratoriais na área de automação e controle de processos, onde os discentes possam aprender a lidar com tecnologias utilizadas nas industriais, tornando-se profissionais mais bem preparados para atuação no mercado de trabalho.

## 1.2 PROBLEMA

Com o surgimento de novas tecnologias, fez-se necessário a criação de novos métodos de ensino para cursos voltados à área de automação industrial e controle de processos. A apresentação de conhecimentos teóricos já não estava mais sendo suficiente para capacitar o profissional a absorver toda tecnologia existente nas indústrias. O mercado atual em engenharia, especialmente a área de automação, busca por profissionais que possuam habilidades práticas para o exercício da profissão. Por esse motivo, o ensino de engenharia e áreas relacionadas, vem se reformulando para oferecer aos estudantes as ferramentas necessárias para uma formação adequada às exigências do mercado de trabalho, como por exemplo, a utilização de laboratórios didáticos e *softwares* educacionais.

## 1.3 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é estruturar um ambiente didático (laboratório), com várias tecnologias integradas, para a realização de aulas práticas na área de automação e controle de processos industriais.

Nesse ambiente serão integrados componentes de *hardwares* e *softwares* que permitirão emular um pequeno “chão de fábrica” em que várias configurações

de automação e processos industriais poderão ser estudadas e o discente poderá interagir com diversos dispositivos e aplicativos utilizados na indústria. Entre as tecnologias disponibilizadas têm-se:

1. *Software* MATLAB (*Matrix Laboratory*), versão 7.12.0.635 (R2011a);
2. Sistema System 800xA (fabricante ABB), versão 5.0;
3. Sistema System 302 (fabricante SMAR), versão 06.04.04.052;
4. Transmissores Foundation Fieldbus - FF (fabricante SMAR), com *firmwares* versão V\_347 para utilização com sistema do fabricante ABB e versão V\_347\_B para utilização com sistema do fabricante SMAR;
5. Módulos Modbus de Entradas/Saídas analógicas e digitais (fabricante Advantech);
6. Tecnologias Modbus, Foundation Fieldbus e *Object Linking and Embedding for Process Control* - OPC.
7. Computadores com sistema operacional windows XP versão 2002.

Nesse ambiente, o aluno poderá:

- Testar e simular diversos processos industriais;
- Testar técnicas de sintonia de Controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID);
- Observar o comportamento dinâmico dos processos;
- Coletar e utilizar dados para estimação de modelos;
- Criar e alterar estratégias de controle;
- Trabalhar com *software* supervisor e Interface Homem Máquina (IHM);
- Parametrizar e configurar *softwares* e equipamentos Foundation Fieldbus (FF);
- Interagir com tecnologia Modbus;
- Interagir com tecnologia OPC;
- Interagir com sistemas de controle moderno (ABB e SMAR).

## 1.4 JUSTIFICATIVA

Com o objetivo de melhorar a metodologia de ensino na engenharia utilizando as várias tecnologias atualmente disponíveis, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná busca aperfeiçoar seus cursos, fazendo com que o aluno tenha oportunidade de colocar em prática os conhecimentos teóricos adquiridos. O presente trabalho contribui para este esforço, e tem como proposta a estruturação de um ambiente didático (laboratório) para realização de cursos e treinamentos com aulas práticas em automação e controle de processos. O ambiente proposto deverá se diferenciar dos diversos laboratórios dedicados existentes na Universidade. A ideia é que seja um ambiente mais completo, que permita ao aluno uma visão geral de todo o processo industrial a ser estudado, desde a parte de instrumentação, parametrização e configuração, passando por estratégias de controle e programação até a supervisão de todo o sistema, tudo isso em um mesmo laboratório.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 6 capítulos:

O primeiro capítulo é a presente introdução que apresentou a motivação, problema, objetivo e justificativa da realização deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma breve revisão de literatura sobre laboratórios didáticos.

O capítulo 3 trata das tecnologias utilizadas para a estruturação do ambiente didático (laboratório), proposto neste trabalho.

O capítulo 4 demonstra a arquitetura do ambiente didático e o exemplo de um dos muitos processos industriais que podem ser simulados no ambiente.

O capítulo 5 mostra a implementação do exemplo de processo industrial no laboratório e os resultados obtidos com a utilização das simulações realizadas.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e sugere alguns itens que podem ser abordados em trabalhos futuros para melhor aproveitamento e evolução do ambiente didático.

## 2. ESTADO DA ARTE

Um dos grandes obstáculos enfrentados pelos alunos de graduação em engenharia e tecnologia é o elevado grau de abstração com o qual devem trabalhar. Alguns conceitos fundamentais para sua formação, somente podem ser visualizados através de aulas práticas em laboratórios (RAPANELLO, 2008).

Com auxílio de ferramentas didáticas multimídias, a aplicação dos conhecimentos nas aulas práticas se torna muito mais dinâmica, beneficiando as interações aluno-professor e aluno-aluno, de forma que o aluno não se comporte como um ser passivo, receptor das informações transmitidas pelo professor e passe a ser um ser ativo, onde o processo de ensino-aprendizagem faça sentido para ele o que se expressa na presença participativa e no trabalho em grupo. A utilização de material didático melhora o rendimento acadêmico despertando a atenção dos alunos (CAPRI; LUZ; NETO, 2012).

Para Junior e Rapkiewicz (2004), aulas de programação, algoritmos e estrutura de dados devem ser realizadas em laboratórios para que os alunos possam entender as abstrações apresentadas e questões desafios devem ser impostas aos discentes para que sejam acostumados a usar de agilidade e criatividade na solução de problemas.

Neste capítulo será realizada uma revisão teórica sobre laboratórios didáticos.

### 2.1 AMBIENTE DIDÁTICO (LABORATÓRIO INSTITUCIONAL)

As novas tecnologias de informação e comunicação estão transformando a relação existente entre o conhecimento e os processos de aprendizagem, exigindo mudança nos métodos de ensino e na organização e funcionamento interno das instituições educacionais. A utilização de recursos visuais, pesquisas individuais e em grupos, além de propostas de exercícios reflexivas e trabalhos práticos estão



entre atividades que devem figurar no projeto pedagógico de uma disciplina. A utilização de tecnologias, em especial do computador, exige dos docentes novas posturas frente ao processo de ensino aprendizagem (CATHOLICO, 2009).

Pensando nesse assunto, vários professores buscam formas didáticas para melhor representar esses conceitos abstratos (RAPANELLO, 2008). Outra preocupação refere-se à rapidez com que técnicas e tecnologias invadem um mercado cada vez mais globalizado, sendo que o profissional considerado mais eficaz é aquele que consegue desenvolver ou aprender mais rápido novos conhecimentos (BRONDINO; BRONDINO, 2012). Com essas evoluções, o professor além de utilizar métodos e técnicas apropriadas, deve se preocupar em despertar estratégias que façam com que os alunos aprendam a pensar e a fazer novas descobertas (TRIBESS; SOUZA; RODRIGUES, 2001). Segundo Soares et al.(2004), a apresentação de conceitos abstratos se torna mais viável e didático, melhorando a qualidade do material das aulas, quando é feito o uso de *softwares* que enfatizem a animação gráfica, servindo de facilitador no processo de aprendizagem. O uso de um laboratório estruturado combinado à utilização de *softwares* educacionais que permitem simulações que gerem resultados numéricos e representações gráficas, promovem o auxílio incontestemente à interpretação do processo a ser estudado (GERMANO et al., 2007). Neste novo cenário, o docente deverá assumir o papel de mediador do processo de interação tecnológica/aprendizagem e desafiar constantemente os seus alunos com experiências de aprendizagens significativas (SOARES, 2009).

O uso desses laboratórios está se tornando cada vez mais comum nos cursos de engenharia e tecnologia, ajudando no método de aprendizagem (MOSSIN et al., 2008) e também incentivando o uso de novas tecnologias (OLIVEIRA, J., et al., 2012). Do ponto de vista pedagógico, a utilização desses ambientes por alunos proporcionam um aprendizado ativo (WATSON, 1995), um aprendizado distribuído (AUER et al., 2003) e um aprendizado de grupo (FALTIN, 2002). Por aprendizado ativo entende-se o “aprender fazendo”, já no aprendizado distribuído tem-se uma separação de tarefas e responsabilidades entre os alunos, e no aprendizado de grupo, tem-se o trabalho em equipe e a comunicação entre os discentes para se chegar ao resultado esperado.

Em cursos voltados a área de automação industrial e controle de processos industriais, laboratórios são utilizados durante a graduação com o objetivo de desenvolver a capacidade do aluno de aplicar na prática os conhecimentos teóricos adquiridos, ampliando sua percepção da realidade e compreensão dos fenômenos físicos sobre os quais irá atuar ao longo de sua carreira profissional (SANTOS, 2012). Um laboratório de controle deve ser proposto com a intenção de reunir todos os conceitos introduzidos em um curso teórico ministrado previamente (BASILIO; MOREIRA, 2004).

Após uma breve revisão da literatura sobre laboratórios didáticos, foram coletadas informações sobre três tipos diferentes de ambientes institucionais utilizados pelas Universidades: os laboratórios reais, os laboratórios virtuais e os laboratórios mistos. Em qualquer um destes ambientes é possível utilizar conexões locais ou acesso remotos em seus sistemas (SCHAF, 2006).

### 2.1.1 Laboratórios Reais

Os laboratórios reais são muitas vezes considerados melhores educacionalmente, pois apresentam características muitas vezes desprezadas por simuladores virtuais, como por exemplo: ruídos (perturbações), limites de controle e efeitos não lineares, além de possuir uma dinâmica real do processo e possibilitar o uso de equipamentos empregados na indústria (SCHAF, 2006).

A estrutura básica desse tipo de laboratório, geralmente é formada por um conjunto de instrumentos interfaceados a um computador conectado à internet, esse computador tem como função o controle desses instrumentos e pode ser acessado remotamente a partir de outros computadores ligados a internet. O usuário pode acessar o computador e acionar equipamentos, fazer configurações de cargas, entre outras atividades necessárias a operação de sistemas (RAPANELLO, 2008).

Porém, apesar da experimentação remota disponibilizar os experimentos dos laboratórios reais a um número maior de alunos, o uso dos equipamentos do processo é restringido a um usuário por vez. É importante ressaltar que essa restrição se refere a escrita de dados (manipulação do experimento) e não a

visualização dos mesmos (leitura de dados). Do contrário, usuários diferentes interfeririam em seus experimentos, havendo uma competição entre os usuários (FERREIRA et al., 2002). Além de ser restrito a um usuário por vez, às vezes é preciso restringir também o acesso desse usuário em determinadas funções. No ambiente laboratorial é possível bloquear os comandos que não devem ser executados pelos alunos, evitando o risco de danificar instrumentos devido a ações indesejadas (RAPANELLO, 2008).

Algumas aplicações de laboratórios reais podem ser vistas em Thepmanee et al. (2011), onde é mostrada a infraestrutura de um laboratório utilizado para cursos da tecnologia Foundation Fieldbus, no Instituto de Tecnologia de Ladkrasang-Thailandia. O laboratório possui uma planta com instrumentos Foundation Fieldbus, onde os alunos podem executar as seguintes atividades: testar, configurar e comissionar equipamentos, configurações e visualização de IHM, entre vários outros testes. Em Marangé, Gellot e Riera (2007) um laboratório para um SED (Sistema de Eventos Discretos) é proposto em que se controla remotamente uma planta real composta de um sistema de empacotamento de comprimidos. Também em Silva et al., 2012, uma laboratório real composto por uma planta didática da SMAR (Fotografia 1) localizado no Laboratório de Instrumentação e Controle da UTFPR, Câmpus Cornélio Procópio, é utilizado para aulas práticas de controle de processos e identificação de sistemas.



**Fotografia 1 - Planta Didática Laboratório de Instrumentação, UTFPR Cornélio Procópio**  
Fonte: (SILVA et al, 2012)

O objetivo da planta didática é demonstrar didaticamente diversas malhas de controle utilizando *softwares* e equipamentos desenvolvidos para aplicações de controle industriais. A planta pode ser manipulada pelos alunos em sala de aula, permitindo a interação dos discentes com tecnologias atuais encontradas na indústria (SMAR, 2016).

### 2.1.2 Laboratórios Virtuais

Os laboratórios virtuais para estudo de automação e controle possuem uma concepção simples e podem ser facilmente utilizados pelos alunos como uma etapa intermediária entre a modelagem abstrata do sistema e sua implementação em laboratório real. Por exemplo, para a configuração de um sistema de controle em tempo real, uma “aula prática virtual” facilita a transição de um modelo do sistema a evento discreto para a implementação do código de controle no Controlador Lógico Programável (CLP), evitando que erros de programação ocasionem danos aos equipamentos reais (BOTELHO et al., 2008).

Esses laboratórios conseguem representar situações reais de experimentos e são mais econômicos por apresentarem menor custo com equipamentos. Neste tipo de laboratório os processos são simulados virtualmente e permitem que vários conteúdos sejam abordados utilizando a mesma ferramenta. Isto reduz o tempo de execução de experimentos quando for necessária a identificação de problemas ocasionados por equipamentos antigos ou danificados. Ainda, possibilitam também treinamentos e simulações na indústria para verificação do comportamento dos sistemas envolvidos em diversas situações que, se ocorressem em sistemas reais poderiam ocasionar prejuízos materiais e humanos. Por fim, nesses laboratórios, os ritmos de aprendizado e horários podem ser definidos pelo usuário (SCHAF, 2006).

Na Figura 1 é possível visualizar um modelo de laboratório virtual. As simulações nesse ambiente são realizadas através de um computador (PC1), que está embarcado com o *software* MATLAB e aborda um modelo matemático do processo industrial a ser estudado. O custo deste laboratório é considerado baixo em relação a um laboratório real.



**Figura 1 - Exemplo de Estrutura de um Laboratório Virtual**  
**Fonte: Autoria própria**

No entanto esse tipo de laboratório pode oferecer algumas desvantagens. Entre estas pode-se citar o empobrecimento da experiência prática, pois, neste caso, os alunos não têm contato com equipamentos físicos e situações que ocorrem em ambientes reais (SCHAF, 2006).

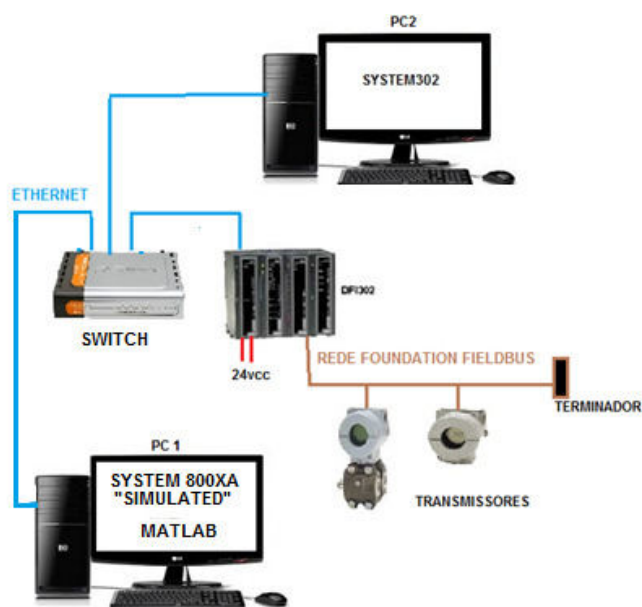
Aplicações de Laboratórios Virtuais é visto em Martin, Urquia e Dormido (2007), onde existe um laboratório virtual com finalidade de apoiar estudos de controle e automação para atuação em tempo real. Também em Barbosa, 2010, foi desenvolvido um ambiente de laboratório virtual com uma arquitetura baseada em serviços para permitir que alunos, pesquisadores e profissionais do meio industrial atuem remotamente em processos industriais, conectados a um servidor de tecnologia OPC ligado a um servidor *Windows Communication Foundation* - WCF para envio das informações em rede. O laboratório pode ser utilizado para treinamento e simulações dos comportamentos dos sistemas baseados em controladores do tipo PID.

### 2.1.3. Laboratórios Mistos

Uma solução que busca combinar as vantagens e minimizar as desvantagens dos laboratórios reais e virtuais, é combinar os laboratórios reais

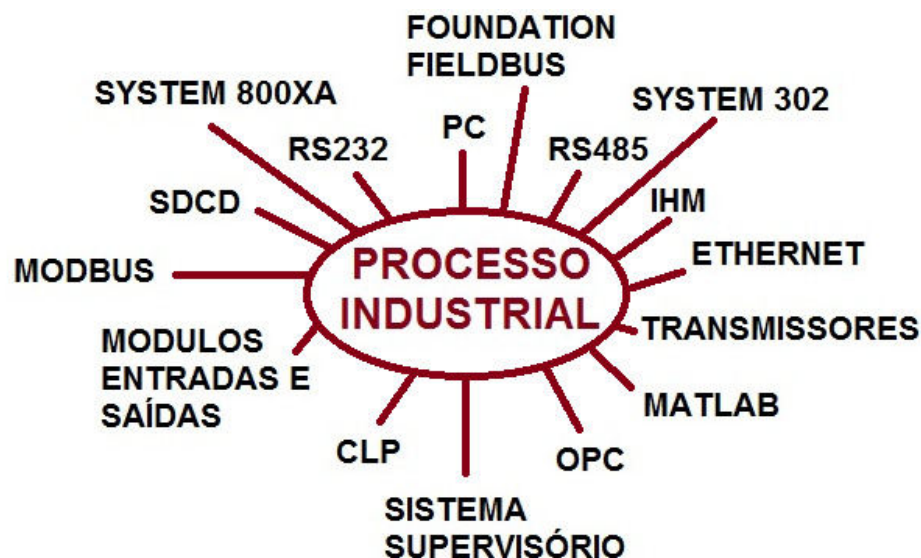
acessíveis remotamente com simulações virtuais, formando assim os chamados “laboratórios de experimentos de realidade mista” (MILGRAM, 1994). Esta solução apresenta-se como uma alternativa de grande interesse para ensino de controle e automação (SCHAF, 2006).

Um exemplo de laboratório misto é mostrado na Figura 2, onde parte da simulação do processo industrial a ser estudado é simulado por equipamentos industriais (onde bomba para, conforme fotografia 1, e termômetros são conectados em Transmissores inteligentes Foundation Fieldbus para simulação de variáveis de processos) e parte do processo é simulado virtualmente (MATLAB e *software* Control Builder- System 800xA- utilizando simulador de CLP).



**Figura 2 - Exemplo de Estrutura de um Laboratório Misto**  
Fonte: Autoria própria

Neste trabalho as simulações serão realizadas em um ambiente didático que pode ser utilizado como laboratório virtual, real ou misto. Este laboratório será composto pela integração das tecnologias mostradas na Figura 3.



**Figura 3 - Integração de Tecnologias para Simulação de Processos Industriais**  
Fonte: A autoria própria

Com a integração destas tecnologias (Figura 3) o aluno poderá simular e testar processos industriais utilizando: módulos de entradas e saídas analógicas e digitais, transmissores inteligentes, Sistemas Digitais de Controle Distribuído, IHM, sistema supervisório, rede de comunicação industrial Foundation Fieldbus, protocolo de comunicação Modbus e meio físico RS232 e RS485 e tecnologia OPC.

Essas tecnologias serão apresentadas no próximo capítulo.

### 3. TECNOLOGIAS

Neste capítulo será apresentada uma breve introdução das tecnologias utilizadas no ambiente didático proposto neste trabalho.

A seção 3.1 trata dos Transmissores Inteligentes, a seção 3.2 do Protocolo de comunicação Modbus; a seção 3.3 da rede de comunicação industrial Foundation Fieldbus, a seção 3.4 da tecnologia OPC; a seção 3.5 do software MATLAB e a seção 3.6 dos Sistemas de Controle Moderno.

#### 3.1 TRANSMISSORES INTELIGENTES

“Os transmissores são instrumentos que convertem um sinal de um transdutor ou sensor em um sinal padrão para ser enviado à distância”. Os transmissores inteligentes são instrumentos microprocessados que permitem comunicação bidirecional, apresentando facilidades como a identificação, configuração e calibração. Podem fazer várias medições simultâneas e computações matemáticas complexas destas medidas para compensar, linearizar e filtrar os resultados finais (BEGA et al., 2003).

Esses instrumentos podem ser configurados localmente usando uma chave magnética (Fotografia 2) ou por programas como: Syscon (SMAR, 2013b) e Fieldbus Builder (ABB).

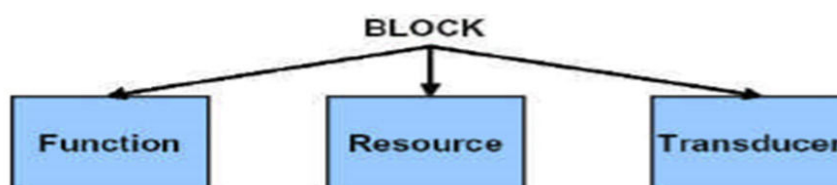




**Fotografia 2 - Transmissor de pressãoLD302 SMAR**  
Fonte: (SMAR,2013b)

Para transmissão digital dos sinais desses transmissores, são utilizados alguns padrões de protocolos, entre estes pode-se citar: HART, PROFIBUS, Foundation Fieldbus (BEGA et al., 2003), sendo este último o escolhido para ser utilizado neste trabalho.

Os transmissores Foundation Fieldbus são conectados na subrede H1, utilizando o modo de 31,25 kbit/s para modulação do sinal. Quando não há segurança intrínseca no sistema, podem ser conectados até 16 equipamentos Foundation Fieldbus no barramento. Por outro lado, em áreas perigosas, conecta-se no máximo 6 equipamentos por restrições de segurança (SMAR, 2012). Esses transmissores trabalham com lógica de blocos (Figura 4), definidos como:



**Figura 4 - Tipos de Blocos Lógicos**  
Fonte: (SEIXAS FILHO, 2003)

- **Bloco de Função (*Function Block*):** A especificação Foundation Fieldbus para processo de aplicação desses blocos é dividida em cinco volumes: FOUNDATION FIELDBUS-890 até FOUNDATION FIELDBUS-894 (BRANDÃO; PINOTTI JUNIOR, 2001). Os Blocos Funcionais (Quadro1) são definidos por suas entradas, saídas, parâmetros de controle e por algoritmos que operam com estes parâmetros e são identificados usando um nome (*Tag*) e um índice numérico.

Função Bloco	Símbolo
Entrada analógica	AI
Saída analógica	AO
Bias	B
Seletor de Controle	CS
Entrada discreta	DI
Saída discreta	FAZ
Carregador manual	ML
Proporcional derivativo	PD
Proporcional integrativo e derivativo	PID
Relação	RA

**Quadro 1 - Exemplos de Blocos de Função**  
 Fonte: (SMAR, 2013a)

Os *Tags* são nomes dados pelos usuários aos blocos funcionais dentro de uma aplicação para que seja possível identifica-los na rede (CONCER, 2005). Eles não podem ser ambíguos dentro de um sistema Fieldbus, já que correspondem a identificação do equipamento. Os índices numéricos são números designados para otimizar o acesso aos blocos funcionais. Tem significado somente dentro da aplicação que contém o bloco. Já os *Tags* dos blocos são identificadores globais. Os parâmetros dos blocos funcionais definem as entradas, saídas e os dados usados para controlar a operação desses blocos. Eles são visíveis e acessíveis na rede. As saídas de um bloco funcional podem ser ligadas às entradas de outros blocos funcionais. Cada ligação indica que um parâmetro de entrada de um bloco funcional obtém seu valor de um parâmetro específico de saída de outro. Enquanto blocos funcionais “puxam” seus valores de blocos anteriores, no qual o bloco controla o

“puxar”, há uma dependência das características das comunicações subjacentes. Dois blocos funcionais ligados juntos podem existir na mesma aplicação de blocos funcionais, ou em aplicações separadas, igualmente, no mesmo dispositivo ou em dispositivos diferentes (SMAR, 2013a).

- **Bloco de recurso (*Resource Block- RB*):** cada equipamento possui apenas um RB, o qual contém parâmetros sobre o equipamento, tais como: ID (Identidade) do fornecedor, número da revisão, memória utilizada e espaço livre, tempo computacional e estado do equipamento (*online, off-line, fault, condition, etc.*) (SCOTT; BUCHANAN, 2000);
- **Bloco Transdutor (*Transducer Block*):** O bloco transdutor isola os blocos de funções do transmissor do *hardware* do equipamento (sensores e atuadores). Esse bloco pode ser executado tantas vezes quanto necessárias para obtenção dos dados dos sensores e atuadores sem sobrecarregar os blocos de funções que utilizam estes dados. Os blocos transdutores podem trocar dados através de sua interface e normalmente executam funções simples como linearização, caracterização, compensação de temperatura e controle do circuito e da troca de dados com o *hardware* (SMAR, 2012). Além de cuidar de detalhes, como por exemplo: calibração e tipo do sensor, diagnóstico, faixa de operação, etc. (CONCER, 2005);

A quantidade de blocos disponíveis em cada equipamento é definida pelo fabricante (CONCER, 2005).

Em Brandão e Pinotti Junior (2001), é demonstrado como projetar e integrar blocos de função. Em Weiss (2004), alguns blocos funcionais foram utilizados para compensação de atraso de transmissão de dados em uma rede Foundation Fieldbus. No trabalho de Cagni et al. (2005), uma rede neural artificial é implementada utilizando blocos de funções para implementação de um algoritmo de auto-calibração, auto-compensação e auto-validação em sensores Foundation Fieldbus.

Além dos blocos citados anteriormente, existem também os blocos de Funções Flexíveis (FFB), definidos pela norma IEC 61131, que são criados pelo usuário do sistema para utilização em aplicações específicas (VICENT, 2001).

É possível encontrar no mercado diversos modelos e fabricantes de transmissores inteligentes. Neste trabalho será comentado apenas sobre os transmissores utilizados no ambiente didático proposto: TT302 e LD302, todos do fabricante SMAR.

O primeiro equipamento é o transmissor de temperatura Foundation Fieldbus TT302. Este instrumento aceita até dois sensores e pode operar em um dos seguintes modos:

- Um canal, com apenas uma medida feita por um sensor;
- Dois canais, com duas medidas independentes feitas por dois sensores;
- Um canal, com a diferença da medida de dois sensores;
- Um canal, com um sensor sendo o *backup* do outro.

Esse transmissor aceita sinais de mV, de termopares, de sensores resistivos ou termo resistências. Possui dois blocos transdutores de entrada, um bloco transdutor de recurso e outros blocos de funções (SMAR, 2012).

O segundo transmissor é o LD302, transmissor de pressão Foundation Fieldbus. Este instrumento faz a medição por célula capacitiva e tem uma flexibilidade e precisão asseguradas pela utilização de microprocessador no seu circuito eletrônico. Ele pode ser utilizado para medição de pressão diferencial, absoluta, manométrica, nível ou vazão. A tecnologia digital usada no LD302 permite a escolha de diversos tipos de funções de transferências, um fácil interfaceamento entre o campo e a sala de controle, maior precisão e estabilidade. Estes dispositivos podem ser implementados tanto em pequenos como em grandes sistemas e possuem características especiais que reduzem consideravelmente os custos com instalações, operações e manutenções (SMAR, 2013b).

Um exemplo de aplicação desses transmissores é encontrado em Geng e Yan (2007), onde esses instrumentos são utilizados no controle de algumas caldeiras, as quais ocupam papel importante nas indústrias de geração de energia. O artigo descreve a solução adotada pela empresa Beijing Tian Hong Bao Neng Thermal Ltda (serviço de fornecimento de calor em Pequim) para evitar o controle manual desses processos auxiliares, pois os operadores podem cometer erros. Assim, a empresa implantou um sistema de controle em suas caldeiras, utilizando a rede Foundation Fieldbus, supervisórios de controle e tecnologia OPC, melhorando o grau de automatização e eficiência da produção. Neste processo foi utilizado o

System 302 da SMAR conectado a instrumentos de campo inteligentes tais como: FI302 (Conversor de sinal Foundation Fieldbus para sinal mA); IF302 (Conversor de sinal mA para sinal Foundation Fieldbus); LD302 (transmissor de pressão), TT302 (transmissor de temperatura), DC302 (entrada e saída remota Foundation Fieldbus) e DFI302 (*gateway*).

Neste contexto, faz parte do escopo deste trabalho os seguintes equipamentos:

1. Dois transmissores de temperatura TT302, cada um conectado a um potenciômetro, cuja resistência é de 0-200 ohms. Será utilizado o método de um canal com um medida feita por um sensor em cada equipamento.
2. Dois transmissores de pressão LD302, cada um conectado a uma bomba manual do tipo pera (Fotografia 3), a mesma utilizada em aparelhos medidores de pressão do tipo Esfigmomanômetro. Os equipamentos Serão utilizados para medição de pressões absolutas.

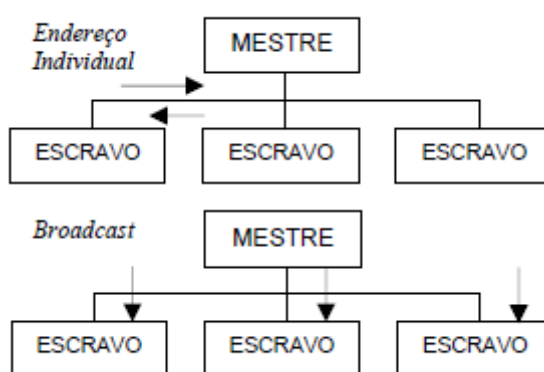


**Fotografia 3 - Pera utilizada em Aparelho Medidor de Pressão Esfigmomanométrico**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 3.2 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO MODBUS

O protocolo Modbus foi desenvolvido pela Modicon Industrial Automation Systems, hoje denominada de Schneider, com o objetivo de comunicar um dispositivo mestre com outros dispositivos escravos. No campo das redes industriais, este é talvez o protocolo de mais larga utilização, já que diversos controladores e ferramentas para desenvolvimento de sistemas supervisórios o utilizam. Isto se deve a sua grande simplicidade e facilidade de implementação (NASCIMENTO; LUCENA, 2003).

A estrutura desse protocolo (Figura 5) permite que somente um dispositivo (o mestre) possa iniciar as transações. Os outros dispositivos (escravos) respondem de acordo com o pedido do mestre, ou de acordo com a tarefa em questão (ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009). O Mestre também pode endereçar cada dispositivo escravo da rede individualmente ou acessar a todos da rede através de mensagens em *broadcast*.



**Figura 5 - Estrutura das Mensagens Protocolo Modbus**  
 Fonte: (NASCIMENTO; LUCENA, 2003)

Quando o mestre envia uma mensagem (*query*) endereçada a um escravo, apenas o dispositivo endereçado retorna uma resposta (*response*) a uma *query*, e nunca são gerados *responses* quando uma *query* for do tipo *broadcast*. O formato das mensagens (*query*) definidas pelo protocolo Modbus é estabelecido da seguinte forma:

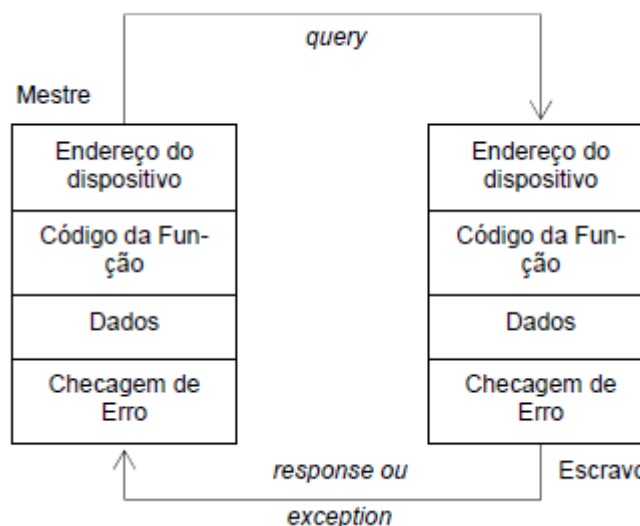
- Endereço do escravo ou endereço para *broadcast*;
- Código da função que indica qual ação deve ser realizada;
- Parâmetros necessários para as funções;
- Campo *Checksum* para verificar a integridade dos dados.

Já o formato das respostas (*response*) seguem o mesmo modelo de uma *query*, porém, são ajustadas obedecendo o formato da função requerida:

- Confirmação da função;
- Parâmetros pertinentes às funções;
- Campo *Checksum*.

Na existência de algum erro de comunicação, ou se o escravo não estiver apto para atender a função requisitada, o dispositivo escravo monta uma mensagem denominada *exception*, a qual justifica o não atendimento da função

(ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009). Uma representação do modelo de comunicação é mostrada na Figura 6.



**Figura 6 - Modelo de Mensagens Modbus**  
 Fonte: (NASCIMENTO; LUCENA, 2003)

O protocolo Modbus pode utilizar como meios físicos as interfaces RS232 e RS485 ou Modbus TCP (Figura 7) (FREITAS, 2014). A primeira permite a comunicação de dados entre dois dispositivos, a uma distância aproximada de 15 metros. Porém a distância efetiva está diretamente relacionada com a taxa de transmissão, o cabo utilizado e as condições de ruídos do ambiente. A segunda possibilita a troca de dados entre uma quantidade maior de dispositivos e a uma distância maior entre eles se comparada com o RS232. A quantidade de pontos conectados à rede, depende do comprimento e da taxa de transmissão da mesma, podendo chegar a 1200 metros (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009). O terceiro meio físico citado utiliza a tecnologia Ethernet TCP/IP. Porém a Ethernet no protocolo Modbus possui algumas variações, podendo chegar a uma velocidade de transmissão de dados de 100Mbps até 10 Gbps. A distância máxima utilizando este meio físico pode variar de 100m até aproximadamente 200m dependendo do cabo utilizado e das condições de instalação do mesmo (FREITAS, 2014).

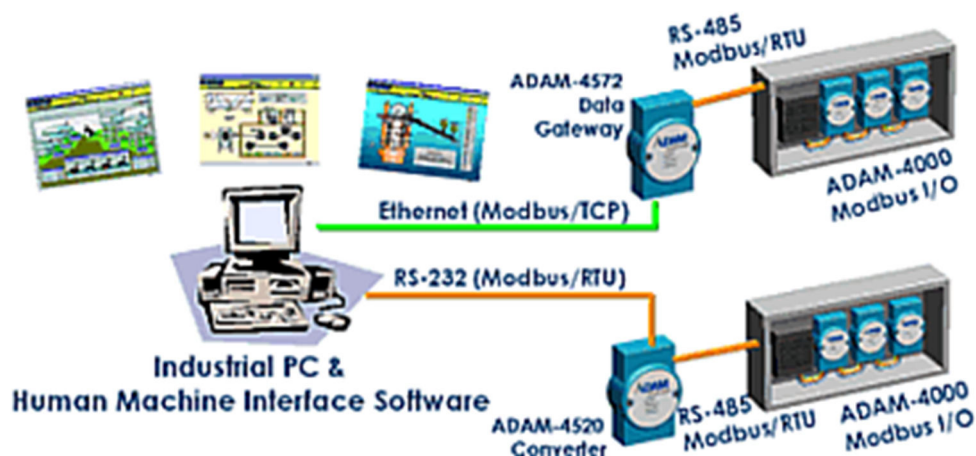


Figura 7 - RS232, RS485 e Modbus TCP como meio físico para protocolo Modbus  
 Fonte: (ADVANTECH, 2016)

O protocolo Modbus também pode ser configurado para trabalhar com um dos dois modos de transmissão disponíveis: *American Code for Information Interchange* - ASCII ou *Remote Terminal Unit*- RTU, os quais definem como os dados serão empacotados na mensagem. Os modos são escolhidos durante a configuração dos parâmetros de comunicação, tais como: *baud*, *rate*, *paridade*, *stop bits*. Em uma rede industrial utilizando o protocolo Modbus, todos os dispositivos da rede devem ser configurados com o mesmo modo de transmissão (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009). Em alguns casos essa configuração não é uma opção, pois existem equipamentos que possuem o modo de transmissão fixo, como por exemplo, os CLP's e inversores de frequência que utilizam o modo RTU como padrão (FREITAS, 2014).

### 3.2.1 Modo ASCII

Neste modo, para cada palavra de dado da mensagem são enviados dois caracteres no padrão ASCII. A principal vantagem deste modo de transmissão é a possibilidade de haver grandes intervalos entre o envio de dados de uma mesma mensagem. O *framing* de dados que é composto por várias palavras de dados apresentará somente valores de 30H à 39H e 41H à 46H, que correspondem



respectivamente aos números de 0 à 9 e A à F no padrão hexadecimal e 0 à 9 e 10 à 15 no padrão decimal (ALFA INSTRUMENTOS, 2000).

No modo ASCII a quantidade de *bits* por cada palavra de dados do *framing* sempre será igual a 10, independente da configuração escolhida. Estas são as possíveis configurações:

- 1 *Start bit*, 7 *data bits*, sem paridade e 2 *stop bits*;
- 1 *Start bit*, 7 *data bits*, paridade PAR e 1 *stop bits*;
- 1 *Start bit*, 7 *data bits*, paridade IMPAR e 1 *stop bits*.

No campo de *checksum* é utilizado o método *Longitudinal Redundancy Check* – LRC (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

### 3.2.2 Modo RTU

Em um dispositivo configurado para este modo, para cada palavra de dados da mensagem é enviado apenas um caractere no padrão Hexadecimal. A principal vantagem deste modo RTU em relação ao ASCII é a maior densidade de caracteres que é enviada numa mesma mensagem, aumentando o desempenho da comunicação. Neste modo de transmissão a palavra de dados sempre será igual a 11, independente da configuração dos parâmetros:

- 1 *Start bit*, 8 *data bits*, sem paridade e 2 *stop bits*;
- 1 *Start bit*, 8 *data bits*, paridade PAR e 1 *stop bits*;
- 1 *Start bit*, 8 *data bits*, paridade IMPAR e 1 *stop bits*;

O campo *checksum* do *framing* é gerado pelo método *Cyclical Redundancy Check*- CRC (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

### 3.2.3 Framing de Mensagem

Nos dois modos de transmissão do protocolo Modbus, existem caracteres de identificação de início e fim de *framing* específicos para cada modo. Com esta técnica é possível que os dispositivos escravos detectem o início de uma mensagem, identifiquem o endereço do escravo (qual escravo vai responder) ou uma mensagem *broadcast* (todos os escravos recebem, mas não respondem), e finalmente ler todo o conteúdo da mensagem até o seu final. A Figura 8 mostra o formato de um *framing* usado no Modbus RTU.

INÍCIO	ENDEREÇO	FUNÇÃO	DADOS	CRC	FIM
T1-T2-T3-T4	8 BITS	8 BITS	8 BITS	16 BITS	T1-T2-T3-T4

**Figura 8 - Formato do telegrama (framing) usado no Modbus RTU**  
 Fonte: (ALBURQUEQUE e ALEXANDRIA, 2009)

As mensagens podem ser lidas parcialmente se ocorrer algum erro, ou existir um período maior que o *time-out* entre o envio de uma palavra de dados e outra. Estes eventos geram as *exceptions* (ALFA INSTRUMENTOS, 2000).

A implementação do protocolo Modbus é consideravelmente confiável e principalmente fácil (NASCIMENTO; LUCENA, 2003), por isso, é possível encontrar aplicações para utilização desta tecnologia em diversas áreas, tais como: automação residencial, automação de navios (FREITAS, 2014); controle de motores, inversores inteligentes e controle de poços de petróleo (NASCIMENTO; LUCENA, 2003).

## 3.3 FOUNDATION FIELDBUS

A busca constante por melhorias em sistemas de controle de processos industriais, na maioria das vezes, gera uma demanda de integração de vários

equipamentos produzidos por diferentes fabricantes. Cada fabricante tende a fabricar produtos com sua arquitetura própria, gerando problemas de compatibilidade entre equipamentos e *softwares* de outros fabricantes. Com isso, buscou-se o desenvolvimento de sistemas de arquitetura aberta, composta por tecnologias com padrões de interface de comunicação de domínio público ou amplo e, que permite a utilização de diversos equipamentos em um mesmo sistema, independentemente de seus fabricantes (FERNANDES JUNIOR, 2009).

Em 1994, por razões técnicas, econômicas e políticas, a ISP e a WorldFIP se juntaram para formar a Fieldbus Foundation, uma organização sem fins lucrativos (SAMSON, 2005). Essa união criou um padrão internacional podendo ser utilizado em indústrias de automação e controle de processos, atendendo aplicações em áreas perigosas. O resultado obtido com essa padronização foi a definição de dois protocolos: Foundation Fieldbus (FF), que passou a ser utilizado nos Estados Unidos e Ásia, e o Profibus, utilizado na Europa. (REHG et al., 1999).

Ao contrário de outras tecnologias, a Foundation Fieldbus possibilita a transmissão de diversos sinais por apenas um canal de comunicação, reduzindo custos com fiação, instalação e engenharia (SCOTT; BUCHANAN, 2000). Para Thomesse (1998), Samson (2005) e Kafoori; Motamedi e Ziaei (2009), a Foundation Fieldbus é uma rede de comunicação em tempo real bi-direcional digital, dividida em duas subredes: H1 (velocidade baixa) e *High Speed Ethernet*- HSE (velocidade alta). Segundo Henrique (2005), a transmissão digital minimiza distorções e possíveis variações indesejáveis do sinal. Além disso, engloba outras tecnologias que trazem vantagens ao usuário, tais como:

- Interoperabilidade, ou seja, é possível a integração de equipamentos que não sejam do mesmo fabricante em um mesmo sistema;
- Utilização em áreas perigosas;
- Seus equipamentos de campo possuem blocos de funções, permitindo a distribuição de controle do sistema (MORIOKA, 2002). Portanto, não necessita de um computador central ou processador digital para controlar o processo (REHG et al., 1999);
- Fornece informações sobre dados de processos, diagnósticos avançados e informações operacionais, (SCOTT; BUCHANAN, 2000). Segundo Verhappen (2000), como essa tecnologia fornece vários diagnósticos, é possível reduzir o

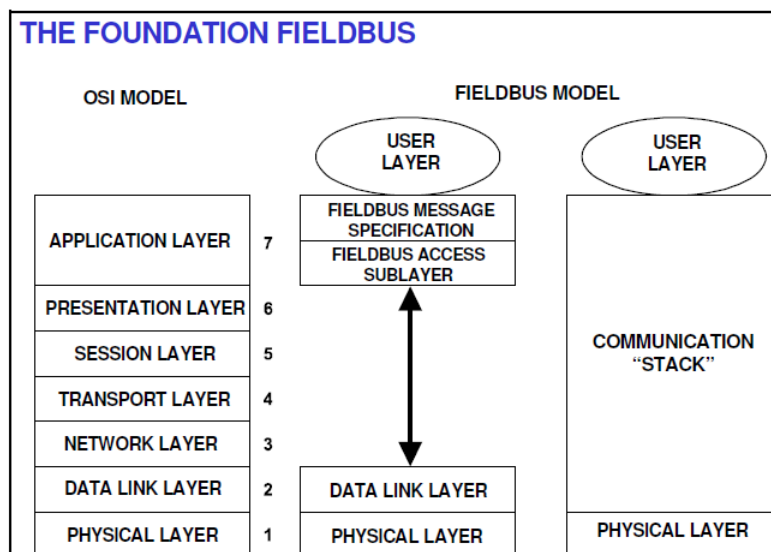
número de manutenções desnecessárias que contribuem com 80% dos 18% de custos das instalações relacionadas a manutenções;

- O processo não precisa ser interrompido quando algum equipamento necessita ser conectado ou desconectado do sistema (CASSIOLATO, 2011) e em casos de *update* de *software*, os equipamentos não precisaram ser realocados (FIELDDBUS FOUNDATION, 2011);
- Proporciona maior facilidade na parametrização e configuração de dados através de *softwares* ou ajustes locais (SATO, 2009);
- Pode ser integrados a IHM's (Interface Homem Máquina), *softwares* supervisórios (SCADA- *Supervisory Control and Data Acquisition*) e SDCD's (Sistemas Digitais de Controle Distribuído) (CASSIOLATO, 2011).
- Permite a utilização de esquemas de redundâncias para maior confiabilidade do sistema (FIELDDBUS FOUNDATION, 2011). Como na Foudation Fieldbus todos os equipamentos recebem alimentação e os sinais de comunicação através de um único barramento, se ocorrer algum problema com o barramento principal, todos os equipamentos serão prejudicados. Apesar da norma não comentar o assunto, é possível utilizar cabos e equipamentos redundantes para evitar que o sistema fique inoperável (CASSIOLATO, 2011).

Em Dias (2015) é possível ver a aplicação da tecnologia de redes Foundation Fieldbus para automação de um laboratório experimental utilizado para estudos e pesquisas na área de escoamentos multifásicos aplicados à indústria do petróleo.

### 3.3.1 Estrutura de uma Rede Foundation Fieldbus

A rede Foundation Fieldbus possui uma estrutura baseada no modelo *Organization for Standardization/ Open System Interconnection- ISO/OSI* (THOMESSE, 1998), ISO 7498 composto por sete camadas (CONCER, 2005), conforme Figura 9.



**Figura 9 - Modelo OSI**  
**Fonte: (WEISS, 2004)**

São 3 as camadas consideradas pela Foundation Fieldbus, vistas no lado direito da Figura 9:

1. A primeira camada é a *Physical Layer* (**camada de meio físico**);
2. A segunda camada é a *Communication Stack* (**camada de comunicação**) que é dividida em dois níveis:
  - **Nível 1:** *Data Link Layer* (camada de enlace de dados);
  - **Nível 2:** *Application Layer* (camada de aplicação) que é subdividido em 2 subníveis:
    - *Fieldbus Access Sublayer* - FAS (Acesso a subcamada *Fieldbus*) e,
    - *Fieldbus Message Specification* – FMS (Especificação de Mensagem *Fieldbus*).
3. E a terceira camada é a *User Layer* (**camada do usuário**) que foi adicionada à estrutura Foundation Fieldbus, não fazendo parte do modelo OSI (CASSIOLATO, 2011).

**A camada de meio físico** recebe mensagens da camada de comunicação e as converte em sinais físicos no meio de transmissão fieldbus e vice-versa, incluindo e removendo preâmbulos, delimitadores de começo e fim de mensagens (SAMSON, 2005).

**Na Camada de comunicação, nível 1 -camada de enlace**, é garantido a integridade da mensagem e feito o controle de acesso ao meio de transmissão, determinando quando se pode receber a mensagem, garantindo que os dados

cheguam ao equipamento certo. O nível de enlace fornece um mecanismo de prioridades para determinar se a mensagem que recebeu solicitação de ser enviada é urgente, normal ou tempo disponível, autorizando a liberação da mensagem que possuir maior prioridade (LEE; HONG, 2010).

Este nível considera dois tipos de equipamentos fieldbus: *Link Master* (Mestre de enlace) e *Basic Device* (equipamento básico). O primeiro possui capacidade de ser o *Link Active Schedule- LAS* (Programação Ativa de Enlace) e o segundo não possui essa capacidade. Em uma rede pode haver apenas um LAS e vários *Link Master*, o ideal é no mínimo dois para haver redundância no sistema. Caso ocorra alguma falha com o LAS, o *Link Master* redundante passa a assumir o seu papel (SAMSON, 2005).

O LAS é quem controla e planeja a comunicação do barramento, além de identificar quais equipamentos estão conectados na rede. Para isso é criada uma lista (*Live List*) onde estão listados todos os dispositivos presentes na rede Foundation Fieldbus (CONCER, 2005). O LAS envia uma mensagem *Probe Node* (PN) aos endereços que não estão na lista esperando a confirmação de algum equipamento que tenha sido conectado recentemente. Caso essa hipótese seja verdadeira, o equipamento retorna a mensagem *Probe Response* (PR) para o LAS, que o incluirá na Lista e enviará uma mensagem *broadcast* para todos os outros equipamentos do barramento, informando as alterações de dispositivos na rede (CASSIOLATO, 2011).

A transmissão de mensagens na rede Foundation Fieldbus é dada por três maneiras:

1. **Resposta imediata**, onde o LAS dá uma oportunidade para que um equipamento de campo responda com uma mensagem, utilizada em programação *scheduled*.
2. **Requisição de *Pass Token* (PT)**, onde um equipamento requisita o *Pass Token* usando uma de suas mensagens codificadas para esta requisição. O LAS ao recebê-la envia o *Pass Token* ao equipamento quando houver tempo disponível nas fases acíclicas do escalonamento (SAMSON, 2005).
3. **Modelo *Publisher/ Subscriber* (produto/consumidor)**, onde um equipamento pode produzir ou consumir variáveis que são transmitidas na rede utilizando o estilo de resposta imediata. Com uma única transição o

produtor pode enviar suas informações a todos os equipamentos da rede que as necessitem (SAMSON, 2005).

A transmissão de mensagens também pode ser organizada de duas formas:

1. **Transmissão Programada (*Scheduled*)**: os dados que necessitam de comunicação cíclica são transmitidos através desta programação, como por exemplo, as informações das variáveis pertencentes aos laços de controle dos sistemas que necessitam de comunicação constante e, processos periódicos que se reiniciam em tempos predeterminados (MOSSIN; PANTONI; BRANDÃO, 2009). Neste caso, o LAS possui uma espécie de agenda onde especifica quando os dados de todos os dispositivos devem ser transmitidos. Para isso o LAS transmite uma mensagem *Compel Data* (CD) ao dispositivo responsável pelos dados, para que o mesmo publique-os na rede (CONCER, 2005). Um esquema desta comunicação é mostrado na Figura 10.

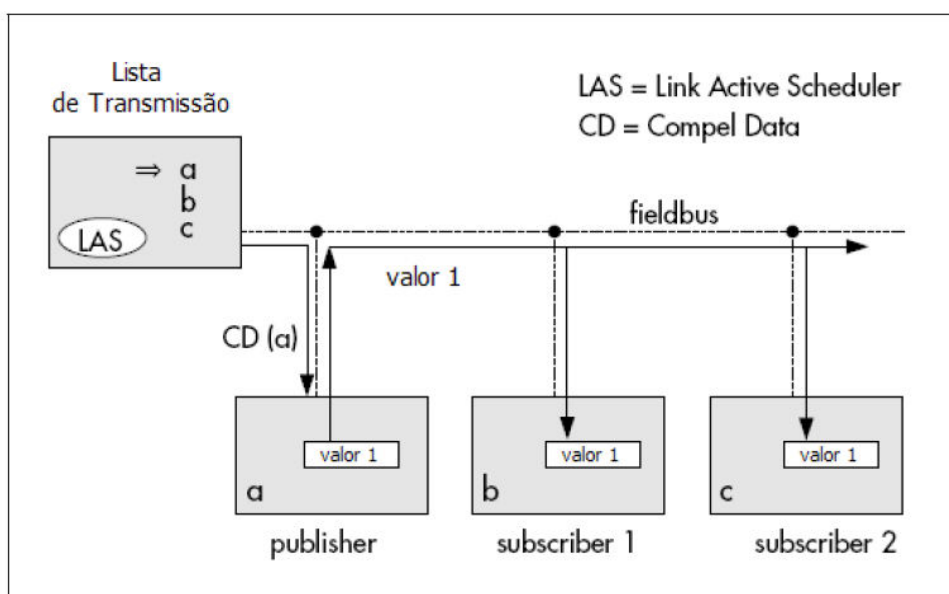


Figura 10 - Escalonamento de acordo com a lista de transmissão  
Fonte: (RAMALHO, 2009)

A comunicação *Scheduled* é criada pelo operador do sistema durante a configuração do mesmo ou, automaticamente pelas ferramentas de configuração conforme estratégia de controle (CASSIOLATO, 2011);

2. **Transmissão Não-Programada (*Unscheduled*)**: utilizada para tarefas acíclicas, ou seja, quando os dados são transmitidos com pouca frequência.





ocasionar congestionamento na transmissão das informações causando atrasos na comunicação (BRANDÃO, 2005).

Em Lee e Hong (2010); Li et al. (2009); Hong e Jang (2001); Zerbetto Neto (2007) e Cicillini (2007) são apresentados estudos sobre os atrasos de comunicação ocorrendo em redes Foundation Fieldbus. Como solução, os autores sugerem o desenvolvimento de algoritmos de escalonamento para minimização dos atrasos. Técnicas de escalonamento atuam na rede criando um agendamento das mensagens e tarefas a serem enviadas de maneira a melhorar a transmissão e minimizar o congestionamento, não deixando de respeitar as prioridades de envio das mensagens (BRANDÃO, 2005).

Outro **nível** localizado dentro da **Camada de Comunicação** é a **Camada de Aplicação** que é responsável por fornecer uma interface para o *software* aplicativo do equipamento e define a maneira de se ler, escrever ou disparar uma tarefa em uma estação remota. Também é responsável pelo modo que a mensagem deve ser transmitida (CASSIOLATO, 2011). Esse nível é subdividido em:

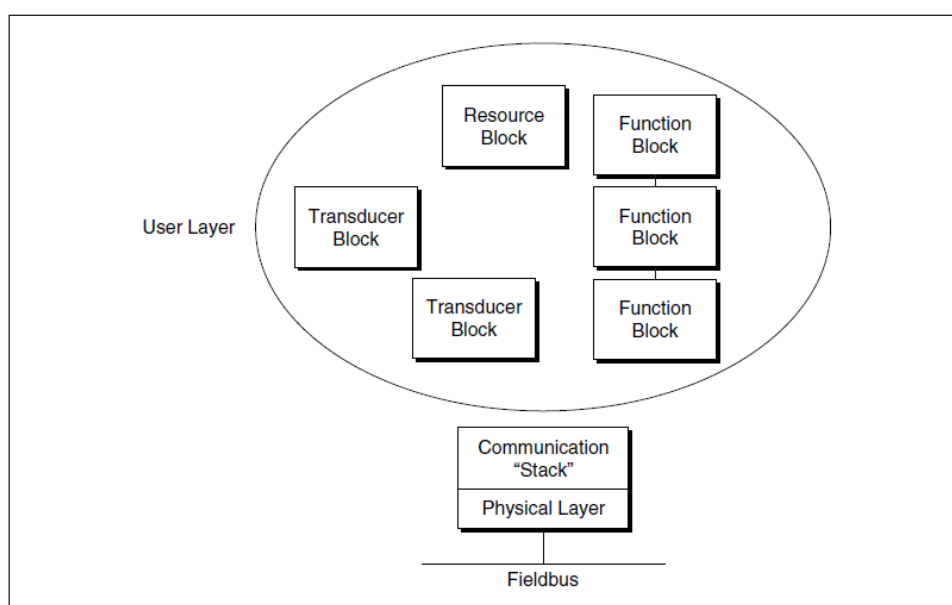
1. **Fieldbus Access Layer (FAS)**: utiliza características da camada de Enlace para fornecer serviços ao FMS (*Fieldbus Message Specification*) na forma de VCR's (*Virtual Communication Relationships*) (CONCER, 2005). Há três tipos diferentes de VCR's:
  - *Publisher/Subscriber*: Transmite dados de entradas e saídas dos blocos funcionais;
  - *Client/Server*: utilizada em comunicação *unscheduled*;
  - *Report Distribution Communication*: Controla a operação da rede com levantamento de detecção de falhas e adição e remoção de equipamentos.
2. **O Fieldbus Message Specification (FMS)**: nessa camada, os parâmetros dos blocos funcionais, para configuração dos dispositivos e construção de estratégia, são representados por objetos e listados em um dicionário. Cada objeto é identificado por um índice, ou seja, todos os blocos funcionais e seus parâmetros possuem um índice. Alguns parâmetros são subdivididos em elementos para armazenar mais informações, e cada um desses elementos possuem um sub-índice (CONCER, 2005).

O dicionário de objetos mapeia os dados reais contidos na memória de cada equipamento Fieldbus e os tipos de dados dos parâmetros dentro dos blocos de

funções. Os usuários não têm acesso direto aos VFD's (*Virtual Field Device*) nem aos Índices, podendo interagir apenas com os *Tags* e nomes dos parâmetros dos blocos. Os VFD's são uma subdivisão lógica da informação contida nos dispositivos Foundation Fieldbus. Cada equipamento é constituído de pelo menos dois VFD's. O primeiro contém o gerenciamento do sistema e da rede, e o segundo, é utilizado para acesso aos blocos funcionais da aplicação (NATIONAL INSTRUMENTS, 2003).

No último nível está a **Camada de Usuário**, interface entre o usuário e o sistema. Ela utiliza a descrição do equipamento (*DD- Device Description*) para dizer ao sistema *Host* as capacidades do equipamento. Também define os blocos e objetos que representam funções e dados disponíveis dos dispositivos. Ao invés de fazer a interface com os dispositivos através de um grupo de comandos, como a maioria dos protocolos, o Foundation Fieldbus permite que a interação seja feita através de um conjunto de blocos e objetos.

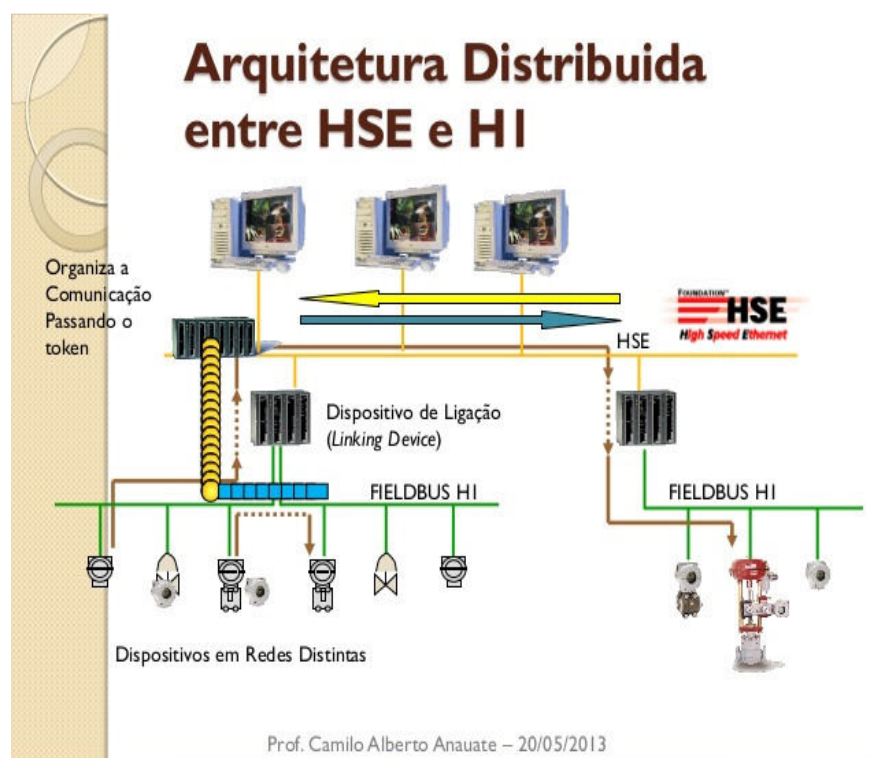
A camada de usuário para um dispositivo é constituída por um bloco de recurso, um ou mais blocos transdutores e de função (Figura 12) (NATIONAL INSTRUMENTS, 2003).



**Figura 12 - Camada de Usuário**  
**Fonte: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2003)**

### 3.3.2 Subredes H1

As redes industriais geralmente são padronizadas com dois tipos de subredes: alta velocidade e baixa velocidade. No caso da rede Foundation Fieldbus a alta velocidade é conhecida como HSE e a baixa velocidade é a H1 (KAFOORI; MOTAMEDI; ZIAEI, 2009), Figura 13.



**Figura 13 - Arquitetura Distribuída entre H1 e HSE**  
**Fonte: (ANAUATE, 2013)**

A H1 pertence à camada de meio físico e é utilizada para comunicação entre equipamentos de campo (MOSSIN; PANTONI; BRANDÃO, 2009), sua especificação é baseada na norma IEC 61158-2 e possui as seguintes características:

- Os equipamentos pertencentes ao segmento H1 podem ser alimentados e se comunicarem através de um mesmo cabo de alimentação;
- O barramento possui uma taxa de transferência de dados de 31,25 Kbit/s, e trabalha com codificação *Manchester* (codificação bifásica com transições de nível em todos os bits) (SAMSON, 2005);

- O segmento H1 é constituído por um barramento principal chamado Tronco (*Trunk*) e por derivações conhecidas como *Spur*;

Para utilização desse barramento é importante que algumas recomendações sejam respeitadas:

- O consumo de corrente pelos equipamentos dos segmentos H1 deve ser menor que a corrente fornecida pela fonte de alimentação;
- Devem ser utilizados terminadores em ambas as extremidades do barramento principal e a cada *spur*, se não houver a quantidade correta de terminadores podem ocorrer erros de comunicação gerados por reflexão de sinais (SHOSHANI et al., 2010);
- A alimentação do barramento deve ser feita através de uma fonte de alimentação, com tensão de saída 9-32 Vcc, mais condicionador de potência para prevenir sinais de frequência alta e com reguladores de tensão. O condicionador deve ser instalado separado da interface H1, podendo estar junto à fonte ou separado, e colocado em redundância para melhor confiabilidade (MOORE, 2007);
- Os equipamentos de campo, que fazem parte da subrede H1, devem ser alimentados com no mínimo 9 V, para que uma comunicação seja garantida (CASSIOLATO, 2011);
- Deve ser instalado um limitador de corrente para proteção contra curto circuito (MOORE, 2007);
- O cabo mais recomendado para sistemas Foundation Fieldbus é do tipo A, par trançado com malha, com máxima resistência de 23,5 Ohms, 20°C, 18 AWG no mínimo, impedância 100 Ohm +- 20 Ohm, 31,25kHz, atenuação do sinal menor de 3dB/Km (FULTON, 2008);
- Existem algumas restrições com o tamanho do comprimento do cabo tronco e os *spurs* em relação ao número de equipamentos em um segmento H1, e o tipo do cabo a ser utilizado, como demonstrado nos Quadros 2 e 3;

No. of devices	1 device per spur	2 devices per spur	3 devices per spur	4 devices per spur
25-32	1 m	1 m	1 m	1 m
19-24	30 m	1 m	1 m	1 m
15-18	60 m	30 m	1 m	1 m
13-14	90 m	60 m	30 m	1 m
1-12	120 m	90 m	60 m	30 m

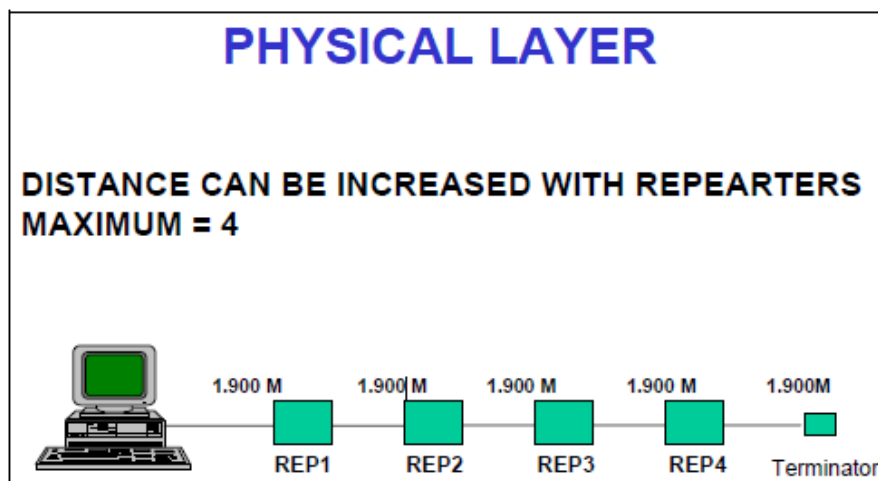
**Quadro 2 - Comprimento do barramento H1**  
**Fonte: (SAMSON, 2005)**

	Type A	Type B	Type C	Type D
Cable description	shielded twisted pair	single or multi-twisted pair with an overall shield	multi-twisted pair without shield	multi-core, without twisted pairs, without shield
Size	0.8 mm <sup>2</sup> (AWG 18)	0.32 mm <sup>2</sup> (AWG 22)	0.13 mm <sup>2</sup> (AWG 26)	1.25 mm <sup>2</sup> (AWG 16)
Max. length incl. spurs	1900 m	1200 m	400 m	200 m

**Quadro 3 - Comprimento máximo para cada modelo de cabo**  
**Fonte: (SAMSON, 2005)**

- Para cabos que possuem *shield* (malha), o *shield* não deve ser utilizado como condutores de energia (SMAR, 1998);
- O comprimento total do cabeamento é a somatória do tamanho do cabo *trunk* e todos os *spurs* (VERHAPPEN, 2006);
- Em partes da rede onde características de impedância do cabo não são preservadas, ou seja, não existe um comprimento contínuo de um meio condutor especificado, como por exemplo: troca de diâmetro do fio, ou troca do tipo de cabo a ser utilizado, conexões em terminais, são considerados *splices*;
- Para redes com comprimento total de cabo maior que 400 metros, a soma de todos *splices* não deve ultrapassar 2,0% do comprimento total do cabo. Para comprimentos iguais ou menores que 400 metros, a soma de todos *splices* não deve exceder a 8 metros (SMAR, 1998);

- É possível aumentar o número máximo do cabeamento total utilizando repetidores. Os repetidores são dispositivos que amplificam os sinais para que eles possam ser transmitidos entre nós afastados (SMAR, 1998). É possível conectar até 4 repetidores em um segmento H1 (Figura 14).



**Figura 14 - Número máximo de repetidores em um segmento H1**  
Fonte: (SMAR, 1998)

O número de equipamentos deve ser alterado caso seja utilizado um único cabo para comunicação e alimentação e também, se o sistema é instalado em uma área de risco. Para isso são considerados:

- Comunicação de 2 até 32 equipamentos sem segurança intrínseca e alimentação separada da comunicação;
- Comunicação de 2 a 4 equipamentos em aplicação com segurança intrínseca e sem alimentação junto com a comunicação;
- Comunicação de 1 a 16 equipamentos sem alimentação intrínseca e alimentação junto da comunicação (CASSIOLATO, 2011);

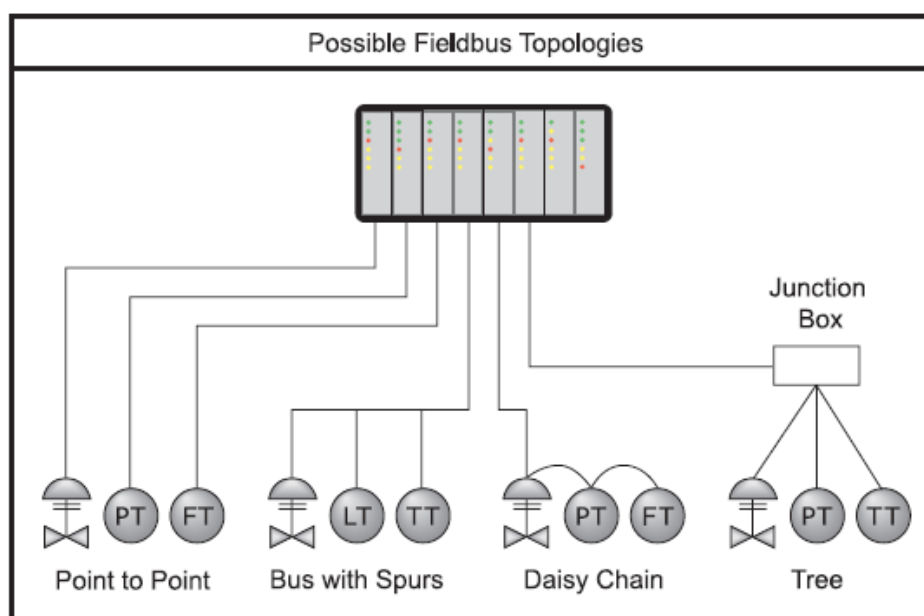
Apesar das recomendações acima, podem se ligar mais equipamentos do que especificado. Isso dependerá do consumo dos equipamentos, fonte de alimentação e características das barreiras de segurança intrínseca, quando utilizadas (CASSIOLATO, 2011).

Os fabricantes de produtos Foundation Fieldbus estão em busca de melhorias para esse sistema. A Yokogawa diminuiu o consumo de corrente dos equipamentos e tornou mais rápida a execução dos blocos de função dos equipamentos. Isso permitiu o incremento de mais equipamentos em um único

segmento, exceto se uma segurança intrínseca for requisitada a limitar o número de equipamentos (SAITO et al., 2004).

As topologias possíveis para o segmento H1 são demonstradas na Figura 15. Em especial, na topologia Barramento com derivações (*Bus with Spurs*) existe um barramento único onde equipamentos ou barramentos secundários são conectados e pode haver vários equipamentos em cada derivação. As configurações possíveis são:

- Cadeia (*Daisy Chain*) Os equipamentos são ligados em paralelo;
- Árvore (*Tree*): vários equipamentos são ligados em acopladores ou caixas (MOORE, 2007);
- Ponto a Ponto (*Point to Point*): utilizada quando da conexão de dois equipamentos (MOORE, 2007).
- Mista: quando o sistema é composto por mais de uma topologia citada acima (MOORE, 2007).



**Figura 15 - Topologias Fieldbus**

Fonte: (MOORE, 2007)

Para conectar o H1 ao nível HSE, usa-se uma *bridge* (equipamento LD na Figura 15), que além de ter capacidade de ser um *Link Master*, conecta segmentos *Fieldbus* que operam em diferentes velocidades (VERHAPPEN, 2006). No

*Foundation Fieldbus* um dispositivo que faz a função de *Bridge* é o *Link Device* (LD) (CONCER, 2005). A Fotografia 4 apresenta o exemplo de dois *Link Device*: o LD800HSE da ABB e DF63 da SMAR.



Fotografia 4 - *Link Device*- LD800HSE (ABB) e DF63 (SMAR)  
Fonte: Autoria própria

### 3.3.3 Subrede HSE (*High Speed Ethernet*)

O HSE é um protocolo de ethernet rápida com velocidade 100Mbit/s. É utilizado para transferir dados entre equipamentos de campos e outros *hardwares* com velocidades e protocolos diferentes (MOSSIN; PANTONI; BRANDÃO, 2009).

Em Hoon et al. (2002) é possível ver a conexão de um sistema *Host* operando em um segmento HSE através de um *switch* que interliga dois LD's diferentes onde estão conectados os segmentos H1, e um *gateway* que interliga equipamentos de diferentes protocolos, tais como: Profibus e DeviceNet (equipamento GD na Figura 16).



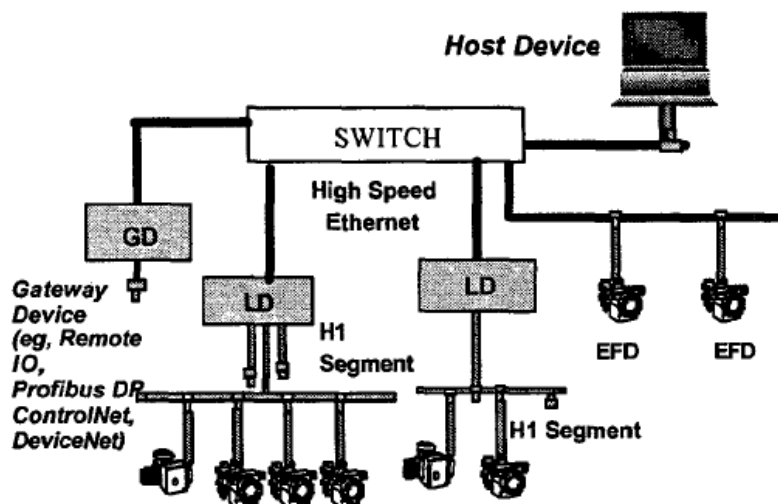


Figura 16 - Rede HSE/H1  
Fonte: (HOON et al., 2002)

O *gateway* é um tradutor de protocolo. Com ele é possível utilizar segmentos de redes com outros padrões como, por exemplo, TCP/IP, RS232, Ethernet, Modbus (VERHAPPEN, 2006), Profibus, DeviceNet (HOON et al., 2002).

Em Resende (2006), o *gateway* é utilizado para interligar a rede *wireless*, uma tecnologia sem fio que utiliza sinais de rádio como meio de transmissão, a uma rede Foundation Fieldbus.

O *Host* é o equipamento responsável por monitorar e interagir com dispositivos instalados no campo (SAMSON, 2005).

### 3.3.4 Linguagem DDL

Para parametrização dos equipamentos Foundation Fieldbus são utilizados *softwares* configuradores e outros aplicativos. Para facilitar a integração entres eles, foi desenvolvida a linguagem DDL (*Device Description Language*) normalizada pela IEC 61804 parte 1, utilizada para descrição dos equipamentos em forma de objeto. A linguagem é responsável pela criação da DD (*Device Description*). Com o avanço da DDL surgiu a EDDL (*Electronic DDL*), tornando a apresentação da escrita mais atraente e compatível com padrões da Web (SEIXAS FILHO, 2003).

A DD informa ao *software* características estruturais e funcionais dos equipamentos. Com a evolução da tecnologia e do aumento de complexidade dos equipamentos, a DD deixou de ser suficiente para conter as informações necessárias, para manter a compatibilidade DDL, foi criado um novo arquivo chamado de *capabilities file format* no formato de cff. Este arquivo contém informações adicionais utilizadas pelo *Host* e configurador. Assim para que um *software* suporte um novo equipamento, basta instalar a DD (arquivo com extensão ffo.), responsável por descrever todos os dados do equipamento, e o arquivo cff. que contém as informações a respeito da comunicação do mesmo (CONCER, 2005).

Em Mossin, Pantoni e Brandão (2009), é proposta uma tecnologia para descrição dos equipamentos (DD) chamada *Open-EDD*, baseada na tecnologia XML (*Extensible Markup Language*) a qual é conhecida por integrar aplicações da Internet.

### 3.3.5 Sistemas SDCD e redes Foundation Fieldbus

É possível encontrar instalações Foundation Fieldbus em vários ramos industriais, tais como: petroquímicas, químicas, óleo e gás, metais e mineração, água, papel utilidades, alimentos e bebidas (FIELDBUS FOUNDATION, 2011).

Em Manguinho (2008), foi proposto um sistema de monitoração de sensores inteligentes em rede Foundation Fieldbus para melhoria do processo de medição e controle na indústria do petróleo. Ramalho (2009) sugeriu uma reconfiguração dinâmica de estratégias distribuídas em dispositivos Foundation Fieldbus para otimização de processos na indústria de petróleo.

Quando a Foundation Fieldbus foi criada, a maioria das industriais petroquímicas e químicas já possuíam os tradicionais SDCD (Sistema digital de controle distribuído) (SCOTT; BUCHANAN, 2000), em inglês *Distributed Control Digital Systems*. Esses sistemas podem ser representados por uma sala central, para gerenciamento, controle e supervisão global das plantas. O sistema é microprocessado em rede com vários outros controladores de responsabilidade local, são caracterizados pela transformação de processos automatizados em

verdadeiros sistemas de automação supervisionados com a capacidade de rastreamento de todas as etapas do processo produtivo.

Em casos onde já existe o sistema SDCD implementado na indústria e surge à necessidade da integração de uma rede Foundation Fieldbus, é possível integrar a Foundation Fieldbus sem realocar o SDCD. Em muitos casos os SDCD são utilizados para controle de variáveis simples. Com a utilização de um Foundation Fieldbus. Os equipamentos de campo podem controlar essas variáveis, deixando os controles mais complexos para o SDCD, fazendo com que seu tempo de carregamento diminua. Para transferir o controle mais simples para os equipamentos de campo, é preciso alterar a funcionalidade dos SDCD's de baixo-nível/alto-nível para alto-nível (SCOTT; BUCHANAN, 2000). Os equipamentos de campo Foundation Fieldbus disponíveis no mercado são: sensores de temperatura, sensores de pressão, sensores de fluxo e conversores 4-20 mA (REHG et al., 1999).

### 3.3.6 Segurança Intrínseca

Várias técnicas de engenharia e métodos de instalação podem ser implementados para reduzir o risco de uma explosão em áreas perigosas. Alguns desses métodos são: à prova de explosão (*explosion proof*); purga (*purging*), imersão de óleo (*oil immersion*), encapsulamento (*encapsulation*); segurança intrínseca (*intrinsically safe-IS*) e não inflamável (*nonincendive*). Qualquer um desses métodos tem como objetivo eliminar no mínimo uma das partes que gera a combustão, ou seja, combustível, oxigênio e aquecimento. Para sistemas Foundation Fieldbus, os métodos utilizados são: segurança intrínseca e não inflamável. Esses métodos reduzem o risco de ignição limitando a quantidade de energia liberada ou presente no ambiente, mas cada método possui uma forma diferente para realizar essa limitação (MOORE, 2007).

A segurança intrínseca é uma excelente técnica para proteger equipamentos eletrônicos em áreas perigosas, fornecendo uma alta proteção contra explosões.

A ideia de uma segurança intrínseca é fazer o uso de barreiras de segurança para limitar a quantidade de energia disponível em plantas que se localizam em

áreas de perigo. A quantidade de energia disponível deve ser insuficiente para gerar arcos, faíscas e fogo, ou outras condições em que gases e pós inflamáveis possam causar danos. Esse método de segurança é utilizado em ambientes onde a presença de gases e pós explosivos são normais. Como a barreira limita a quantidade de energia, o número de equipamentos permitidos em um segmento H1 acaba diminuindo. A barreira de segurança deve ser colocada entre o barramento H1 e a bridge, e não pode ser instalada a mais que 100 metros do terminador (SAMSON, 2005).

Ao contrário da IS, o método *nonincendive* é utilizado restritamente em área onde a presença de gases e pós explosivos é uma exceção (VERHAPPEN, 2006).

Com a demanda por uma quantidade maior de equipamentos em barramento Foundation Fieldbus com segurança intrínseca, o Instituto alemão de ciência e tecnologia (PTB- *Physikalisch Technische Bundesanstalt*) testou o modelo FISCO (*Fieldbus Intrinsically Safe Concept*) e verificou que o mesmo atenderia às altas demandas de consumo. Este conceito está de acordo com padrões internacionais de segurança intrínseca, onde deve existir apenas uma fonte de alimentação ativa por sistema e todos os nós devem ser passivos com indutância e capacitância internas desprezíveis. Além disso, vários tipos de cabos são permitidos. Dependendo do tipo, o comprimento máximo vai até 1000 metros, e suas duas extremidades devem possuir terminadores (SMAR, 2008).

O conceito FISCO foi otimizado para permitir um número maior de equipamentos de campo, atendendo categorias e grupos de gases com uma simples avaliação da instalação envolvendo segurança intrínseca. Com isto aumentou-se a capacidade de corrente por segmento, e estendeu-se o número de equipamentos por barreira (SMAR, 2008).

A solução FISCO permite que se tenha 10 a 12 equipamentos por segmento Fieldbus. Sem esse conceito o máximo permitido era de 4 ou 5. Outro conceito que também surgiu foi o FNICO (*Fieldbus Nonincendive Concept*), similar ao FISCO, mas limitado para o uso em áreas classificadas que aceitam segurança *noncendive*. Ambos os conceitos, FISCO e FNICO, estão tornando mais atrativo o uso de Fieldbus em áreas perigosas (SMAR, 2008).

### 3.3.7 Foundation Fieldbus para Propósitos Educacionais

Devido aos benefícios apresentados pela Foundation Fieldbus, é importante a inclusão de treinamentos e cursos sobre essa tecnologia nos ambientes educacionais (REHG et al, 1999) e industriais. A Fieldbus Foundation já formou vários treinadores certificados pelo programa FCTP (*Foundation Certified Training Program*). Esse programa estabelece normas para conteúdo do currículo educacional Fieldbus e treina instrutores ao redor do mundo definindo níveis aceitável de aprendizado da tecnologia pelos alunos (FIELDBUS FOUNDATION, 2011).

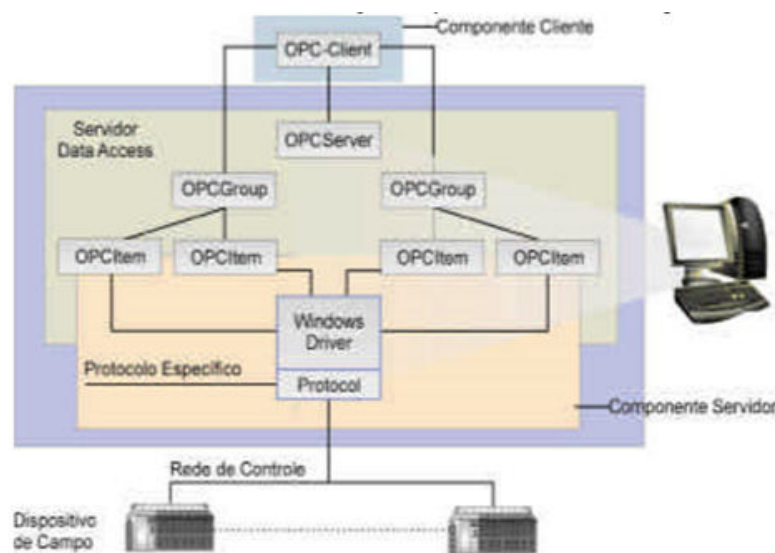
Alguns exemplos de programas utilizados no ambiente educacional para simulação e entendimento da rede Foundation Fieldbus são: FBSIMU uma arquitetura utilizada para mapear blocos de funções, assim como a planta, em uma aplicação independente do LabVIEW, também chamada de *Virtual Instrument (VI)*. A configuração de todo o sistema é centralizado no FBSIMU.CONF (MOSSINI; PANTONI; BRANDÃO, 2009). O *software* Syscon, desenvolvido pela empresa SMAR, também é utilizado para monitoramento, programa e configuração para sistema Foundation Fieldbus, com capacidade de detectar, identificar e atribuir endereços para equipamentos conectados na rede. Também possui funções para calibração do equipamento, diagnósticos e *setup* (SMAR, 2003). Outro exemplo de programa com as mesmas funções do FBSIMU e Syscon, é Fieldbus Builder da ABB.

## 3.4 TECNOLOGIA OPC

O padrão OPC (OLE (*Object Linking and Embedding*) for Process Control) é um padrão de comunicação entre dispositivos, baseado nas tecnologias Microsoft OLE COM (*Component Object Model*) e DCOM (*Distributed Component Object*

*Model*) com especificação aberta ao público. Seu objeto é uma infra-estrutura única, na qual a informação é universalmente compartilhada, facilitando a integração de diversos sistemas (PUDA, 2009).

O funcionamento do OPC é baseado na tradicional arquitetura cliente/servidor (Figura 17). Um ou mais servidores fornecem dados para um ou mais clientes, e o cliente pode solicitar dados a um ou mais servidores, e vice-versa (PUDA, 2009). O servidor OPC pode estar no mesmo computador ou em rede com o cliente. O cliente OPC é qualquer programa que precisa se conectar ao *hardware* utilizando o servidor OPC para obter dados ou enviar comandos a ele. (OPC FOUNDATION, 2012).



**Figura 17 - Estrutura interna OPC**  
**Fonte: (FONSECA, 2002)**

O OPC não elimina o protocolo proprietário do CLP ou equipamento de campo. De fato, ocorre que o servidor OPC “traduz” este protocolo proprietário para o padrão OPC, sendo necessário o desenvolvimento de um servidor OPC específico para cada protocolo de comunicação existente (PUDA, 2009).

Antes de o OPC ser desenvolvido, vários *softwares* industriais acessavam equipamentos de controle utilizando *drivers* específicos, ocasionando os seguintes problemas:

- Cada *software* precisava de um *driver* para cada tipo de *hardware*;

- Conflito entre *drivers* de diversos fabricantes eram causados pelo fato de algumas características de *hardware* não serem suportadas por todos os *drivers* desenvolvidos;
- Conflito no acesso ao *hardware* do equipamento, já que dois *softwares* diferentes não podem usar o mesmo equipamento ao mesmo tempo, a não ser que cada um possua um *driver* independente.

Com o OPC, o número de *driver* por *hardware* de cada fabricante passou para um. Da mesma forma, apenas um *driver* se tornou necessário para o fabricante de *software* (ZHENG; NAKAGAWA, 2002). Cada fabricante de *hardware* necessita prover um único servidor OPC para que seus dispositivos se comuniquem com qualquer cliente OPC. Assim, os *softwares* podem ser escolhidos baseando-se unicamente em seus recursos eliminando a preocupação com o tradicional problema “Será que existe um *driver* compatível para o meu dispositivo?”. Pois neste caso, não há a necessidade de criar interfaces e *drivers* customizados (OPC FOUNDATION, 2012).

Segundo FONSECA (2002), a publicação das especificações para o padrão OPC possibilitou o desenvolvimento de diversos produtos para automação industrial, os quais se beneficiam das vantagens proporcionadas pelo padrão:

- Padronização das interfaces de comunicação entre os servidores e clientes de dados de tempo real, facilitando a integração e manutenção dos sistemas;
- Eliminação da necessidade de *drivers* de comunicação específicos (proprietários);
- Melhoria do desempenho e otimização da comunicação entre dispositivos de automação;
- Interoperabilidade entre sistemas de diversos fabricantes;
- Integração com sistemas MES (*Manufacturing Execution System*), ERP (*Enterprise Resource Planning*) e aplicações Windows (Excel, etc.);
- Redução dos custos e tempo para desenvolvimento de interfaces e *drivers* de comunicação, com conseqüente redução do custo de integração de sistemas;
- Facilidade de treinamento.

Atualmente existem as seguintes especificações sobre OPC publicadas ou em processo de aprovação, sempre atualizadas pelo OPC Foundation (2012):

- *OPC Overview* (Versão 1.00): Descrição geral dos campos de aplicação das especificações OPC;
- *OPC Common Definition and Interfaces* (Versão 1.00): Definição das funcionalidades básicas para demais especificações;
- *OPC Data Access Specification* (V 2.05): Definição da interface para leitura e escrita de dados de tempo real;
- *OPC Alarms and Events Specification* (V 1.02): Definição da interface para monitoramento de eventos;
- *OPC Historical Data Access Specification* (V 1.01): Definição da interface para acesso a dados históricos;
- *OPC Batch Specification* (V 2.00): Definição da interface para acesso aos dados de processo por batelada (*batch*);
- *OPC Security Specification* (V 1.00): Definição da interface para utilização de políticas de segurança;
- OPC e XML (Versão candidata 1.05): Integração entre OPC e XML para aplicações via Internet (*Web*) (MANGUINHO, 2008).

Em Carvalho, Silva e Nascimento (2008), o protocolo OPC é utilizado para interligar o programa MATLAB (utilizado para visualização das variáveis do sistema) e a rede Foundation Fieldbus de uma coluna de destilação piloto. Na rede Foundation Fieldbus o OPC é utilizado para fazer a comunicação entre os instrumentos de campo e o programa supervisor (MANGUINHO, 2008).

Quando se trabalha com tecnologia OPC, pode-se fazer uso de algumas ferramentas de simulação, entre elas cita-se como exemplo os *softwares* Matrikon e MATLAB, sendo este último o utilizado nesse trabalho.

### 3.5 MATLAB

O MATLAB (*Matrix Laboratory*) é um *software* de ótimo desempenho voltado para cálculos numéricos, tendo por finalidade realização de cálculos de matrizes, integração de análises numéricas, processamento de sinais e construção de gráficos de fácil visualização, onde soluções e problemas são descritos matematicamente.

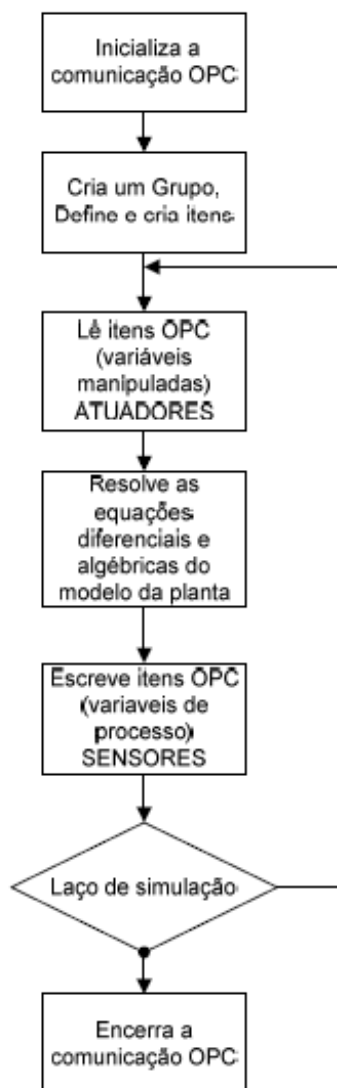


Esse *software* também é utilizado para projeto e simulação de sistemas de controle, nele podem ser modelados os sistemas dinâmicos inerentes à aplicação do simulador em desenvolvimento (GLÓRIA et al., 2011).

O MATLAB possui uma interface gráfica denominada OPCTool, responsável por abrir uma sessão de conexão via OPC quando detecta algum servidor OPC instalado e executado no computador onde o MATLAB está instalado. Esta ferramenta pode ser utilizada para testes de OPCs e trabalha com conceitos como:

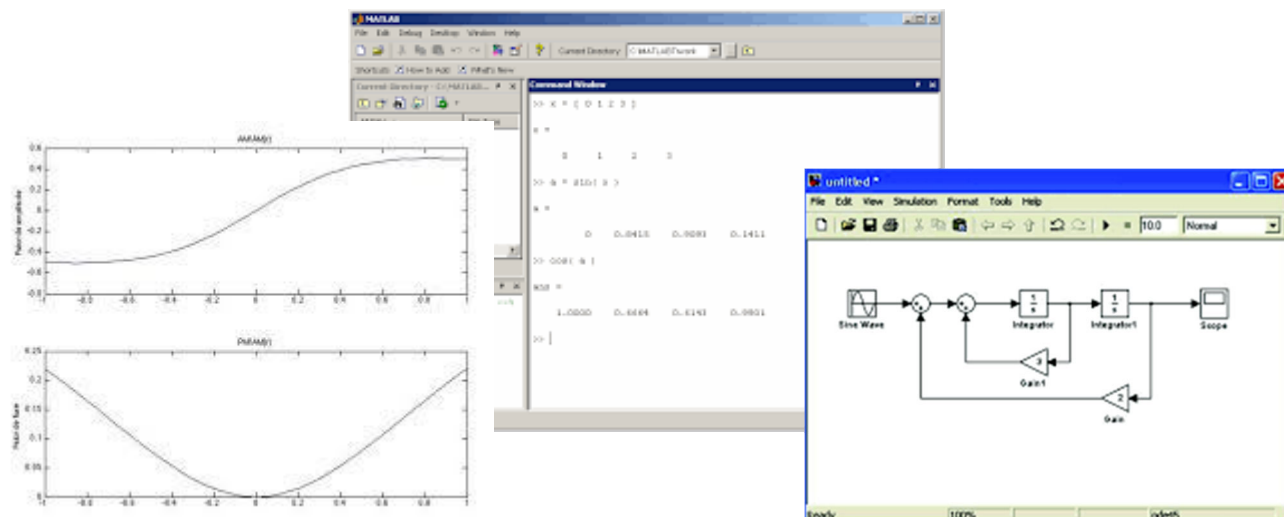
- *Hosts* – Computadores com servidores OPC instalados;
- *OPC servers* – Servidores de comunicação via protocolo OPC, utilizado em equipamentos industriais;
- *MATLAB OPC Clients* – Agentes clientes OPC que disponibilizarão os dados no ambiente do MATLAB;
- *Group* – Conjunto de itens OPC;
- *Item* – Variável ou parâmetro que será lido ou escrito pelo MATLAB (CARVALHO; SILVA; NASCIMENTO, 2008).

Como exemplo, o fluxograma mostrado na Figura 18, descreve o procedimento para a troca de informações do MATLAB via OPC (SOUZA et al., 2012).



**Figura 18 - Procedimento para leitura das variáveis do MATLAB via OPC**  
Fonte: (SOUZA et al., 2012)

O *software* MATLAB, Figura 19, possui a ferramenta Simulink.



**Figura 19 - MATLAB/Simulink**  
**Fonte: Autoria Própria**

O Simulink possui uma interface de diagrama de blocos, utilizado como ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas cujo comportamento é dinâmico. Esta interface é bastante utilizada em processamento de sinais e teoria de controle para projeto e simulação (GLÓRIA et al., 2011). Possui diversas *toolboxes*, as utilizadas neste trabalho serão as *toolboxes* OPCs que permitem conexão a Servidores OPCs que possuem as seguintes funcionalidades (OLIVEIRA, L., et al., 2012):

- *OPC Configuration*: Configura o servidor OPC que será utilizado. Podem ser configurados mais de um servidor;
- *OPC Read*: Utilizado para realizar a leitura de variáveis analógicas e digitais.
- *OPC Write*: Utilizado para realizar a escrita de variáveis analógicas e digitais;

O MATLAB é uma das ferramentas mais utilizadas para simulação de processos industriais. Permite a simulação por meio de modelos matemáticos, possibilitando a implementação de técnicas de controle para processos definidos pelo usuário por meio de código específico, podendo ser utilizada para estudos locais e remotos (BARBOSA, 2010). A motivação do uso da ferramenta MATLAB é possibilitar ao aluno de engenharia de controle e automação a operação de uma planta industrial cujas funções são fundamentais na indústria moderna. Desta forma obtém-se uma maior familiarização com o processo e a realização do controle,

abstendo-se do conhecimento de todos seus detalhes, necessitando apenas de conhecimentos em MATLAB (BARBOSA, 2010).

Carvalho, Silva e Nascimento (2008) descrevem a utilização do MATLAB em um projeto de simulação de sistemas de controle, atuando como controlador real de processos ligados a uma planta qualquer, seja esta em escala laboratorial ou industrial. Em seu artigo os autores mostram a integração de uma coluna de destilação ao MATLAB via OPC, apresentando uma boa alternativa para controle de processos industriais mediado por computador.

O uso do MATLAB facilita a criação de sistemas de controle complexos através de uma interface mais amigável por parte dos engenheiros de controle. A versatilidade do MATLAB permite o uso de conceitos conhecidos em disciplinas teóricas da formação do engenheiro. Entre conceitos encontram-se em disciplinas clássicas como controle clássico e controle avançado baseados em diagramas de blocos e fluxo de sinal (CARVALHO, SILVA e NASCIMENTO, 2008).

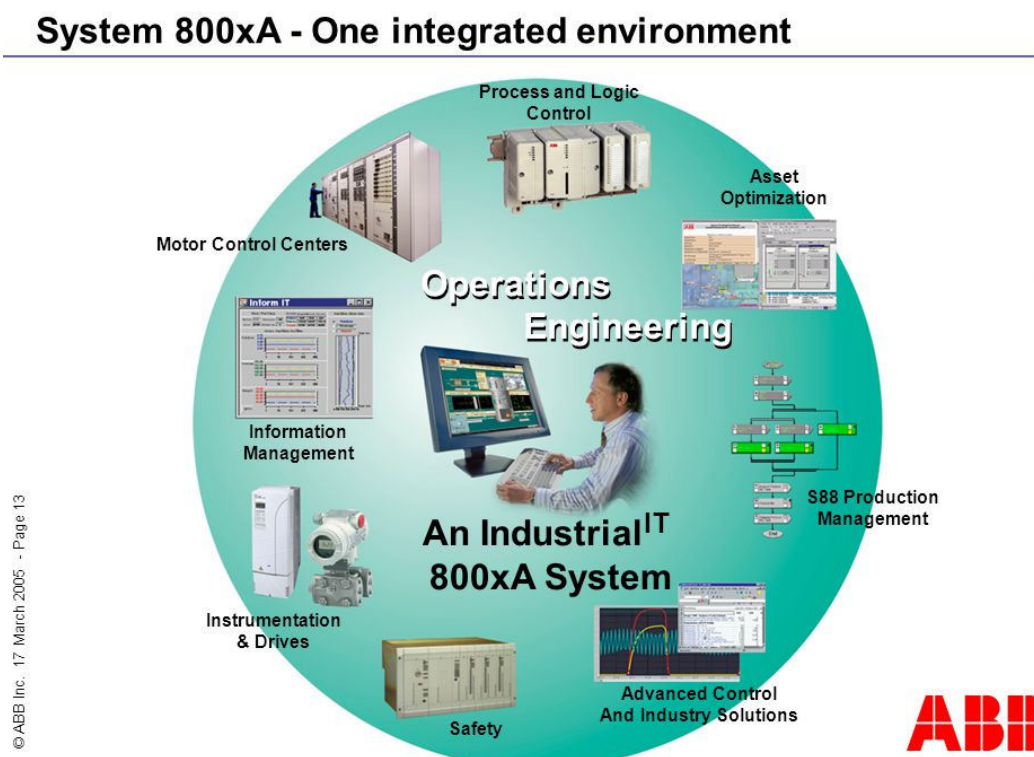
### 3.6 SISTEMAS DE CONTROLE MODERNO

Com o avanço tecnológico da eletrônica microprocessada fornecendo sistemas programáveis, transformações significativas no custo e qualidade dos equipamentos destinados ao controle industrial foram obtidas. Entre algumas arquiteturas de sistemas digitais aplicadas na aquisição e monitoração de variáveis analógicas e digitais, assim como na supervisão e controle de processos industriais, tem-se o Sistema Digital de Controle Distribuído, SDCD ou *Distributed Control Digital System*. O SDCD é um elemento da área de Automação Industrial que tem como função o controle de processos de forma a permitir uma otimização da produtividade industrial, estruturada na diminuição de custo de produção, viabilizando melhoria na qualidade de produtos, precisão das operações e garantia de segurança operacional (GUTIERREZ, 2008).

Segundo Bega et al (2003), o SDCD foi originado na década de 1970 para automatizar plantas em indústrias de processo em batelada ou contínuo. Foi desenvolvido na forma de um pacote (*hardware + software + rede de comunicação*)

com recursos adaptados às peculiaridades de cada um dos segmentos da indústria. É composto basicamente por um conjunto integrado de dispositivos que se completam no cumprimento das suas diversas funções.

Em uma arquitetura SDCD, encontram-se as redes distribuídas e configuradas de acordo com seus níveis funcionais, como por exemplo, o SDCD da ABB, System 800xA (Figura 20).



**Figura 20 - System 800xA (SDCD fabricante ABB)**  
**Fonte: (ABB, 2013)**

O primeiro e mais alto nível é o de administração. Este é responsável pela integração dos níveis mais baixos, e até de várias fábricas. Nessas redes as estações de trabalho fazem a ponte entre o processo produtivo e a administração, que inclui a supervisão de vendas, o controle de estoques, o nível de campo, que são sub-redes que integram pequenas automações, modernos instrumentos digitais de campo como: controladores PID, CLP, multiplexadores, etc. E por fim, o nível de entradas/saídas, configuradas na própria planta. Neste nível, são integrados atuadores, elementos sensores, transmissores, entre outros dispositivos, responsáveis por interfacear o processo de produção (BEGA et al, 2003).

Existem no mercado diversos fabricantes de SDCD, entre eles a ABB (System 800xA), a SMAR (System 302), Yokogawa (CENTUM CS300), a Emerson (Delta V), Infi90 (Bailey), entre outros, sendo os dois primeiros sistemas (ABB e SMAR) utilizados neste trabalho.

### 3.6.1 System 800xA (ABB)

O Sistema de Automação 800xA amplia o alcance dos sistemas tradicionais de automação além do controle de processo. Sua arquitetura introduz uma definição de objeto válida para todo o sistema, baseada em *Aspect Object* (Figura 21) que permite navegação centrada da informação, onde é possível acessar instantaneamente toda a informação sem que seja necessário saber como e por qual aplicativo a informação é manipulada.

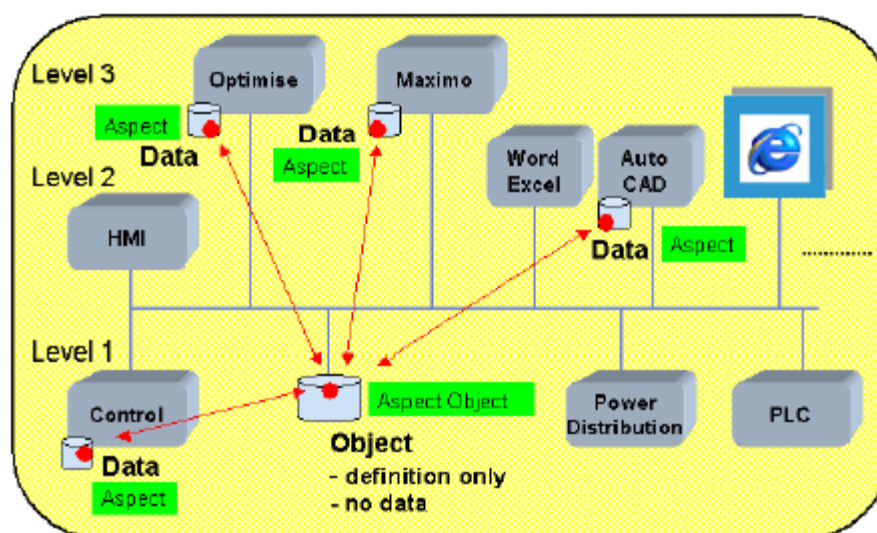


Figura 21 - Arquitetura *Aspect Object*  
Fonte: (ABB, 2013)

O *Aspect Object* (Aspecto do Objeto) podem ser objetos de processos químicos, como válvula, ou mais complexos, como um reator. Outros exemplos são: produtos, materiais, procedimentos *batch* e ordens de produção.

Cada um desses objetos podem ser descritos de muitas perspectivas diferentes. Cada perspectiva define um pedaço de informação e um conjunto de

funções para criar, acessar e manipular essa informação, chamado de Aspecto do Objeto.

É preciso estar apto a implementar esses aspectos usando muitos aplicativos diferentes. Exemplos de aplicativos são: Graphics Builder e AUTO CAD. Esses aplicativos são chamados de *Aspect System*.

A funcionalidade básica do Sistema 800xA é acompanhada de *Aspect Systems* que oferecem funcionalidade comum, como *layout*, manipulação de telas, engenharia e funções de gerenciamento de informações do *Aspect Object* (ABB, 2013).

Esse sistema integra diversos aplicativos, os utilizados neste trabalho serão:

- Control Builder: Programa utilizado para configuração do CLP ACM800, expansões (CI860, CI853), aplicações de segurança e controle. Este programa permite a criação de projetos com a implementação de bibliotecas, aplicações, receitas e definição de tarefas a serem realizadas.
- Process Graphic *Editor*: Ferramenta para criar IHM.
- Fieldbus builder: Utilizado para configuração da rede Foundation Fieldbus e parametrização dos blocos funcionais dos transmissores inteligentes (ABB, 2013).

Um exemplo de aplicação do System 800xA pode ser visto em Favaro (2012), onde o sistema é utilizado para implementação de malhas regulatórias e acionamento dos equipamentos, utilizados para modelagem dos sistemas.

### 3.6.2 System 302 (SMAR)

Assim como o System 800xA da ABB, o System 302 da SMAR engloba soluções para arquitetura SDCD. É um sistema de automação de controle distribuído, que tem como característica marcante a integração com sistemas de informação avançados, como MES (*Manufacturing Execution System*) e ERP (*Enterprise Resource Planning*) que permitem a conexão entre diferentes fontes de dados comerciais, suprimentos e produção. As informações são disponibilizadas em rede de forma versátil e segura com suporte para dispositivos *wireless* ou pela internet (SMAR, 2008).

O System 302 é composto pelos seguintes aplicativos:

- Syscon – ferramenta desenvolvida para configurar dispositivos e redes Foundation Fieldbus;
- LogicView é a ferramenta de *software* usada para configurar o Co-processador Lógico DF65. A configuração é feita em lógica Ladder IEC-1131-3EE, de fácil aprendizagem e utilização.
- FCView é a ferramenta que possibilita monitorar e atuar nos principais blocos funcionais, gerenciar processos, gerar relatórios, tudo feito de forma a garantir a inviolabilidade do sistema.
- OLE Server para Windows é a porção servidor do *software* que realiza a conexão entre o lado cliente do *software* e o cartão PCI e/ou a DFI conectada ao computador local. O acesso ao OLE Server pode ser feito localmente (conexão local - *server* instalado na mesma estação do cliente OLE) ou através de uma rede (conexão remota - *server* instalado em outra estação).
- *Device Support* é um pacote que contém os arquivos DD (*Device Description*) e cf. (*capability file*). Esse conjunto de arquivos apresenta informações sobre os equipamentos SMAR e de terceiros que asseguram a interoperabilidade entre os dispositivos de diferentes fabricantes;
- FBView é uma ferramenta de *software* usada para visualizar as mensagens que trafegam no barramento Foundation Fieldbus. Permite capturar, analisar e decodificar as mensagens através de uma interface também conectada ao barramento;
- FBTools é o *software* utilitário para executar o procedimento de *download* de *Firmwares* em qualquer equipamento Fieldbus (SMAR, 2008).

Os programas utilizados neste trabalho são o Syscon, FBtools e OLE Server: O Syscon foi utilizado para configuração dos transmissores SMAR conectados a *bridge* – DFI302 da SMAR; o FBTools foi utilizado para atualização de todos os *firmwares homologas abb* dos transmissores Foundation Fieldbus, e o OLE Server para comunicação via OPC com as outras tecnologias integradas no ambiente.

No próximo capítulo será demonstrado como o ambiente didático proposto neste trabalho foi estruturado.



## 4. AMBIENTE DIDÁTICO (LABORATÓRIO)

Os cursos de engenharia da UTFPR abordam uma gama de conceitos sobre tecnologias, cujas teorias se encontram espalhadas em várias disciplinas. Por exemplo, no curso de Engenharia Eletrônica, as ementas de disciplinas do núcleo de automação referem-se a aulas sobre sensores, atuadores, controle contínuo e discreto, controle supervisão, comunicação de dados, redes industriais, entre outras. A instituição possui vários laboratórios dedicados, porém o estudante não adquire uma visão geral da integração de várias tecnologias e não participa de projetos que sejam integradores permitindo a consolidação de todos os conhecimentos. Com o ambiente didático (denominado Laboratório LACOS), proposto neste trabalho, é possível integrar informações de várias disciplinas em um mesmo local, facilitando ao aluno a utilização de todos esses conceitos em forma de um sistema único.

A seção 4.1 deste capítulo apresenta a estrutura do ambiente didático proposto neste trabalho, a seção 4.2 trata da simulação do processo a ser simulado e a seção 4.3 apresenta o processo de evaporação utilizado na simulação.

### 4.1 LACOS - LABORATÓRIO DE CONTROLE DE SISTEMAS (AMBIENTE DIDÁTICO)

Conforme proposta deste trabalho, o laboratório LACOS (Laboratório de Controle de Sistemas) foi estruturado com a intenção de que os estudantes tenham contato com tecnologias presentes nas industriais, e consigam assimilar na prática, os conhecimentos teóricos estudados. A estrutura do laboratório possibilita a realização de práticas laboratoriais de processos industriais e interação com diversas tecnologias, tais como redes industriais, transmissores inteligentes e SDCD's. Nesse ambiente, malhas de controle e comportamento do sistema podem ser testados e estudados. O aluno terá a oportunidade de trabalhar com diversos equipamentos e *softwares*, utilizados no meio industrial, integrados em um mesmo sistema. A Figura 22 demonstra a estrutura do ambiente.

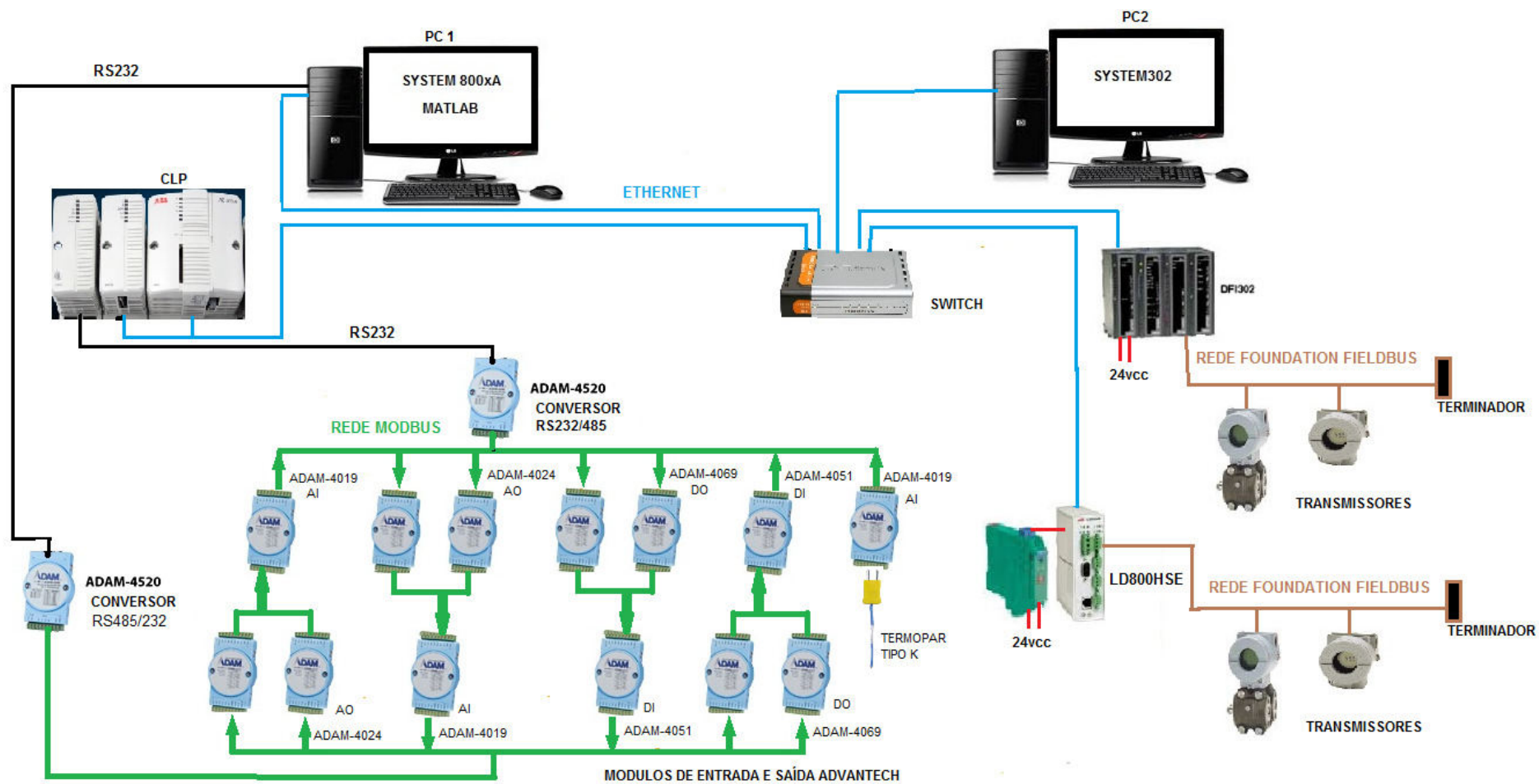


Figura 22 - Estrutura do Laboratório LACOS  
Fonte: Autoria própria

Neste Laboratório didático (Fotografia 5) é possível que outras tecnologias, não utilizadas neste trabalho, sejam facilmente implementadas. Dessa forma, o ambiente pode ser expandido com novos instrumentos e também atualizado, conforme avanços tecnológicos, de maneira simples e prática.



Fotografia 5 - LACOS (Laboratório de Controle de Sistemas)  
Fonte: Autoria própria

Neste ambiente é possível realizar diversos experimentos, como por exemplo:

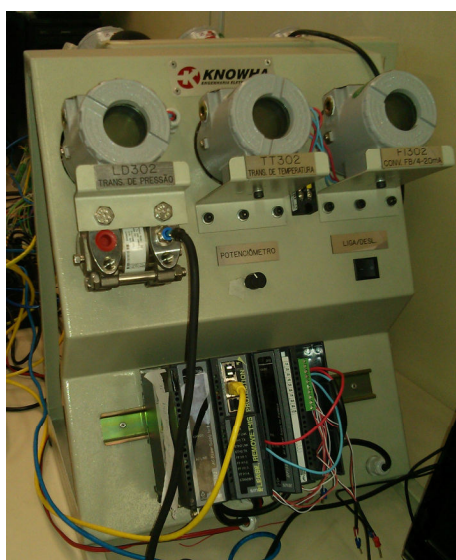
- Simulação de processos industriais por meio de modelos matemáticos;
- Estratégias de controle;
- Testes com variáveis de processos e distúrbios;
- Observar o comportamento dinâmico dos processos;
- Trabalhar com *software* supervisor e Interface Homem Máquina (IHM);
- Interagir com várias tecnologias: OPC, SDCD, CLP, Foundation Fieldbus e Modbus, RS232 e RS485;

O ambiente é composto por dois computadores interligados em rede com outros dispositivos. No entanto, outras máquinas podem ser facilmente integradas ao processo dependendo da complexidade do ambiente industrial que se deseja emular.

Em um dos computadores (PC1), Figura 21, encontram-se instalados o System 800xA e o *software* MATLAB, ferramenta já conhecida dos estudantes que a utilizam para soluções de problemas em diversas disciplinas tais quais sinais e sistemas, controle, comunicações, processamento de sinais e imagens, entre outras. No outro computador (PC2) encontra-se instalado o System 302. Os dois sistemas (SMAR e ABB) se comunicam utilizando a tecnologia OPC. Para isso, a DCOM dos dois computadores foram configurados conforme *site* da MATRIKON OPC, 2015.

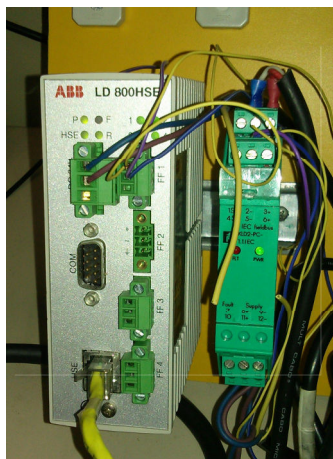
Existem dois *Kits* com transmissores Foundation Fieldbus SMAR, ambos possuem os seguintes transmissores: LD302 (transmissor de pressão), TT302 (transmissor de temperatura) e FI302 (conversor sinal fieldbus para 4-20mA):

- Um Kit está conectado à rede H1 da plataforma DFI302 (*bridge*) SMAR (Fotografia 6);



**Fotografia 6 - Kit SMAR com transmissores LD302, TT302, FI302 e plataforma DFI302**  
Fonte: Autoria própria

- O outro *kit* está conectado à rede H1 da *bridge* LD800HSE da ABB (Fotografia 7), alimentado por uma fonte Pepperl+Fuchs.



**Fotografia 7 - LD800HSE e Fonte Pepperl+Fuchs**  
**Fonte: Autoria Própria**

Para que os transmissores (fabricante SMAR) do *kit 2* pudessem se comunicar com o sistema de outro fabricante, a SMAR disponibilizou para a UTFPR os *firmwares* homologados para utilização com o sistema ABB. dessa forma foi possível atualizar os equipamentos (através do *software* FBTools) e utilizá-los com o System 800xA.

Os módulos da Advantech (Fotografia 8) estão interligados via RS485 e se comunicam com a CI853, Interface RS232 do CLP (Fotografia 8), e com o computador (PC1) através de um conversor digital RS232/485 (ADAM 4520) também da Advantech.



**Fotografia 8 - Módulos de Entradas/Saídas Advantech**  
**Fonte: Autoria Própria**

Todos os módulos da Advantech (entradas e saídas) foram configurados para trabalhar com o modo de transmissão RUT. Este procedimento foi necessário, pois o CLP já possui essa opção fixada em sua configuração, sendo que a única maneira de todos os equipamentos de um mesmo sistema se comunicarem é possuindo a mesma configuração em relação ao modo de transmissão utilizado.

Mais Informações sobre os módulos Modbus são apresentadas no APÊNDICE D.



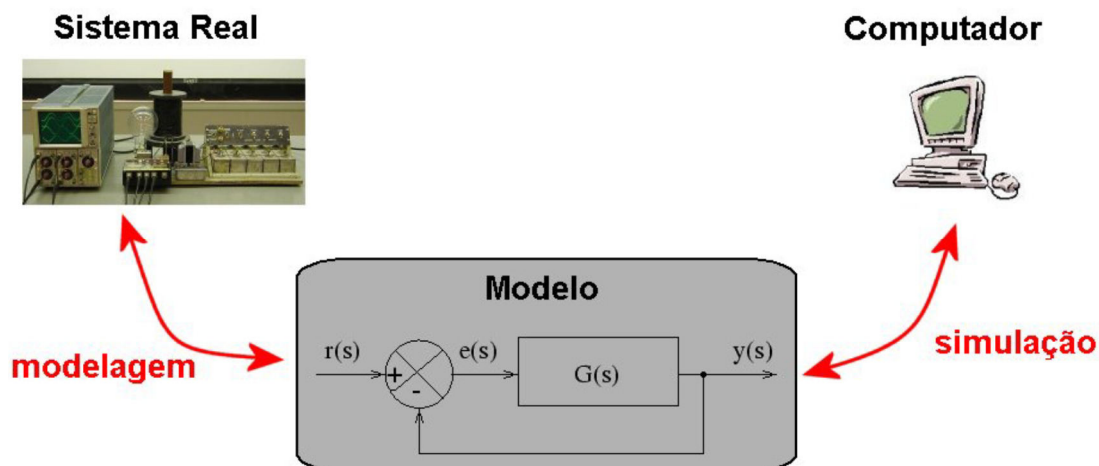


**Fotografia 9 - CI853, CI860 e CLP AC800M (ABB)**  
**Fonte: Autoria própria**

No *switch* estão conectados os dois computadores, as *bridges* LD800HSE e DFI302 (Módulo constituído por fonte de alimentação e *Link Device* da SMAR), a expansão CI80 e o CLP (Fotografia 9). Todos os equipamentos estão com seus IPs configurados para trabalharem em uma mesma rede.

## 4.2 SIMULAÇÃO DO PROCESSO

Para realizar simulações de processos industriais é preciso construir um modelo matemático computacional que corresponda à situação real que se deseja simular (Figura 23).



**Figura 23 - Elementos básicos e relações do processo de modelagem e simulação**  
 Fonte: (SCHAF, 2006)

“Os modelos matemáticos são representações simplificadas da realidade que preservam para determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada” (GOLDBARG e LUNA, 2005). Na indústria, processos modelados matematicamente são utilizados para diminuir custos com quantidade de protótipos a serem construídos. Na área educacional, são alternativas econômicas em razão dos altos custos de equipamentos reais (SCHAF, 2006).

A utilização de *softwares* de simulação no ensino de Engenharia é indispensável. Devido ao grande número de estudantes de engenharia nas Universidades e a falta de estrutura, é praticamente impossível oferecer acessibilidade a um laboratório real para todos os alunos (SOUZA et al., 2012).

O laboratório LACOS permite que vários processos industriais possam ser simulados. Para testes deste ambiente, optou-se por utilizar um processo de evaporação de dois estágios. O motivo da escolha foi devido ao o processo de evaporação apresentar características próximas da prática operacional, tais como apresentar forte interação entre as variáveis (sistema multivariável) e sofrer várias perturbações (SOUZA et al., 2012).



### 4.3 EVAPORADOR

A evaporação é um processo que consiste em concentrar uma solução pela ebulição do solvente (FOUST et al., 1982). Trata-se de uma operação unitária com um intenso gasto de energia (BHARGAVA et al., 2008). Por este motivo a associação de evaporadores se faz necessária para obter um processo com maior eficiência (KAYA; SARAC, 2004). Em qualquer operação evaporativa, o custo principal do processo é o do vapor da água consumido, tornando os métodos de redução de consumo de vapor muito interessantes. Com a associação de evaporadores (evaporação múltiplo estágios), o vapor gerado de um evaporador é utilizado como fluido de aquecimento de um segundo evaporador gerando uma economia de energia (ANDERSON; BERNDTHSSON, 1999).

De acordo com Philipp e D'Almeida (1988), a alimentação em uma planta de evaporação múltiplo efeitos, ou seja, diversos estágios, pode ser realizada de três formas principais, tais como:

- **Alimentação direta:** quando a alimentação é feita no estágio (mais quente) e percorre os estágios no mesmo sentido do fluxo de vapor. É utilizada quando a temperatura de alimentação é alta.
- **Alimentação inversa:** quando a alimentação é feita no último estágio (mais frio) e percorre os estágios no sentido inverso ao fluxo de vapor. É utilizada quando a temperatura de alimentação é baixa.
- **Alimentação mista:** quando a alimentação é feita em um estágio intermediário, que possui uma temperatura próxima à temperatura da alimentação. É comum o uso de pré-aquecedores entre os estágios.

Na Figura 24 tem-se o exemplo de um processo de evaporação de dois estágios do tipo alimentação direta. Foi utilizado um estágio de evaporação intermediário para aumentar a produtividade do processo. Esse evaporador é do tipo *internal forced recycle*.

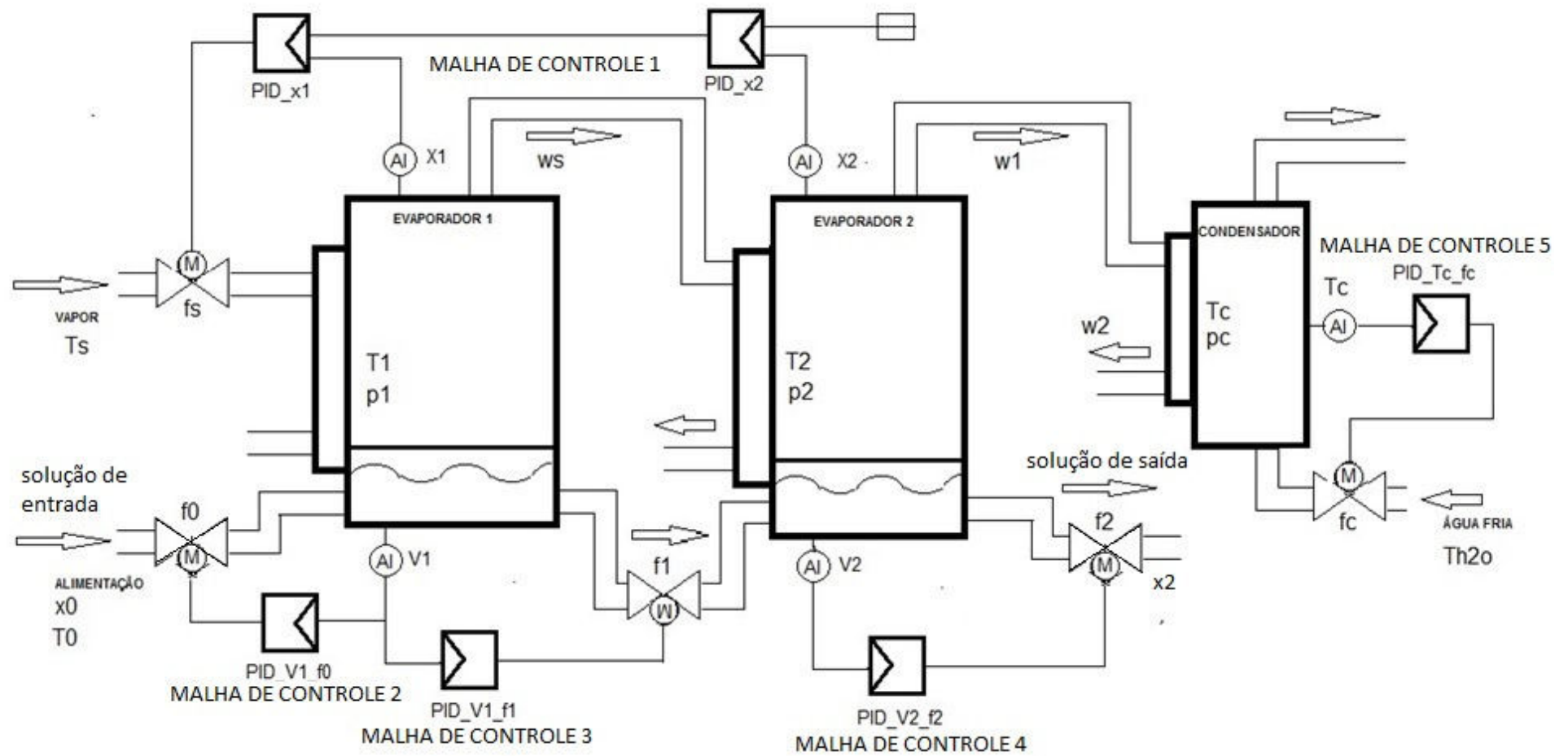


Figura 24 - Sistema de evaporação com 2 estágios  
 Fonte: Autoria própria

Neste processo, com a entrada de uma alimentação, busca-se produzir uma solução mais concentrada. A alimentação aqui, trata-se de uma solução ( licor negro e água) com concentração  $x_0$  de 20%, temperatura  $T_0$  de  $90^\circ\text{C}$  e vazão  $f_0$ , cujo valor inicial é de  $0,11\text{ m}^3/\text{s}$ , que alimenta o evaporador 1.

A evaporação é realizada dentro do evaporador 1, que funciona como um trocador de calor, aquecendo a solução até a ebulição, passando em seguida para um segundo evaporador que repete o mesmo processo.

O evaporador 1 possui temperatura  $T_1$ , pressão  $p_1$ , fluxo de energia ( $q_1$ ), volume  $V_1$  de aproximadamente  $5\text{ m}^3$ , com área de transferência de calor de  $2900\text{ m}^2$  e coeficiente de transferência de calor de  $4\text{ kW}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ . É aquecido com vapor através da válvula ( $f_s$ ), a uma temperatura saturada do vapor ( $T_s$ ) de  $90^\circ\text{C}$ . A saída de vapor do evaporador 1 é responsável pelo aquecimento do evaporador 2 através de  $w_s$ . Dentro desse primeiro evaporador, a solução passa a ter concentração  $x_1$ , e é liberada para o evaporador 2 através da válvula de saída ( $f_1$ ).

O evaporador 2 recebe aquecimento do evaporador 1 ( $w_s$ ), possui temperatura  $T_2$ , pressão  $p_2$ , fluxo de energia ( $q_2$ ), volume  $V_2$  aproximado de  $5\text{ m}^3$ , com área de transferência de calor de  $3000\text{ m}^2$  e coeficiente de calor de  $4\text{ kW}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ . Dentro do segundo evaporador, com valor inicial de vazão da válvula de saída ( $f_2$ ) de  $0,057\text{ m}^3/\text{s}$ , a concentração passa a ser  $x_2$ .

Após aquecimento dos dois evaporadores, o vapor de saída do evaporador 2 ( $w_1$ ) é transferido para um Condensador que possui temperatura  $T_c$ , fluxo de energia ( $q_c$ ), área de transferência de calor igual a  $3000\text{ m}^2$  e coeficiente de transferência de calor igual a  $5\text{ kW}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ . A temperatura de água fria ( $Th_{2o}$ ) na entrada do condensador é de aproximadamente  $20^\circ\text{C}$ . A entrada dessa água é controlada pela válvula de entrada do Condensador ( $f_c$ ).

Este processo possui quatro perturbações:  $x_0$ ,  $T_0$ ,  $T_s$  e  $Th_{2o}$ . Para simulação destas variáveis foram utilizadas as leituras dos sinais de saída dos transmissores inteligentes SMAR. A concentração da alimentação de entrada  $x_0$  e temperatura da alimentação de entrada  $T_0$  são simuladas pelos sinais de saída dos transmissores TT302 e LD302 do *kit* 1 com transmissores conectados à *bridge* da ABB. A temperatura de vapor  $T_s$  e temperatura da água fria  $Th_{2o}$  são simuladas pelos sinais de saída dos transmissores TT302 e LD302 do *kit* 2 com transmissores conectados à *bridge* da SMAR. Os transmissores TT302 estão conectados a

potenciômetros, o usuário do sistema pode alterar o valor de resistência do potenciômetro, a medição desta resistência é enviada ao transmissor que a converterá em sinal de porcentagem ( $x_0$ ) e graus Celsius ( $T_s$ ). O mesmo ocorre com os transmissores de pressão LD302, porém neste caso, os transmissores estão conectados a peras (Fotografia 3) utilizadas em aparelho medidor de pressão esfigmomanométrico, o usuário do sistema pode alterar o valor de medida pressionando a bomba (pera), essa medição é enviada para o transmissor de pressão que a converterá em graus Celsius ( $T_o$  e  $T_{h20}$ ).

As equações (1) a (14) representam o modelo matemático do processo industrial descrito acima. O modelo foi baseado no trabalho de GRÄNFORS e NILSSON (1999). Com a utilização do *software* MATLAB, o modelo deste sistema será simulado no Laboratório LACOS. A implementação deste modelo está disponível no Apêndice A.

Equação (1): Volume total

$$\frac{d(pV)}{dt} = p_{IN}F_{IN} - p_{OUT}F_{OUT} - W \quad (1)$$

Equação (2): Volume do solvente (água)

$$\frac{d(X_w pV)}{dt} = X_{w,IN}p_{IN}F_{IN} - X_{w,OUT}p_{OUT}F_{OUT} - W \quad (2)$$

Equação (3): Volume de licor negro

$$\frac{d(X_s pV)}{dt} = X_{s,IN}p_{IN}F_{IN} - X_{s,OUT}p_{OUT}F_{OUT} \quad (3)$$

Equação (4): Entalpia

$$\frac{d(pVH)}{dt} = p_{IN}F_{IN} H_{IN} + Q - p_{OUT}F_{OUT} H_{OUT} - WH_{OUT}^V \quad (4)$$

Equação (5): Equivalente à equação (2)

$$\frac{d(X_w pV)}{dt} = X_w \frac{d(pV)}{dt} + pV \frac{d(X_w)}{dt} \quad (5)$$

Equação (6): Implementação das equações (1) e (2) na equação (5)

$$\frac{d(X_w)}{dt} = \frac{1}{pV} [p_{IN} F_{IN} (X_{w,IN} - X_{w,OUT}) - W(1 - X_{w,OUT})] \quad (6)$$

Equação (7): Equivalente à equação (3)

$$\frac{d(X_s pV)}{dt} = X_s \frac{d(pV)}{dt} + pV \frac{d(X_s)}{dt} \quad (7)$$

Equação (8): Implementação das equações (1) e (3) na equação (7)

$$\frac{d(X_s)}{dt} = \frac{(p_{IN} F_{IN})}{pV(X_{s,IN} - X_{s,OUT})} \quad (8)$$

Equação (9): Equivalente à equação (4)

$$\frac{d(pVH)}{dt} = H \frac{d(pV)}{dt} + pV \frac{d(H)}{dt} \quad (9)$$

Equação (10): Implementação das equações (1) e (4) na equação (9)

$$\frac{d(H)}{dt} = \frac{1}{pV} [p_{IN} F_{IN} (H_{IN} - H_{OUT}) - W(H_{OUT}^V - H_{OUT}) + Q] \quad (10)$$

Equações (11) a (14): Fluxo de energia

$$Q = kA(T_{hot} - T_{cold}) \quad (11)$$

$$Q_c = W\Delta H_{steam} \quad (12)$$

$$Q_c = k_c A_c (T - T_{c.OUT}) \quad (13)$$

$$Q_c = p_c C_{pc} (T_{c.IN} - T_{c.OUT}) \quad (15)$$

Além das equações de (1) a (14), algumas rotinas, localizadas no APÊNDICE A, também foram consideradas, para simulação do processo:

- $dnslblq(T,X)$ : Densidade como uma função de temperatura e concentração do licor negro;
- $entlblq(T,X)$ : Entalpia como uma função de temperatura e concentração do licor negro;
- $tlblq(X,H)$ : Temperatura como uma função de concentração e entalpia do licor negro;
- $eqpblq(T,X)$ : Equilíbrio da pressão como uma função de temperatura e concentração do licor negro;
- $eqth2o(P)$ : Equilíbrio de temperatura como uma função de pressão;
- $eqph2o(T)$ : Equilíbrio da pressão como uma função de temperatura;
- $epvh2o(P,T)$ : Entalpia do vapor puro como uma função de pressão e temperatura;
- $eplh2o(P,T)$ : Entalpia do líquido puro como uma função de pressão e temperatura.

Onde:

$\rho$ : densidade (kg/m<sup>3</sup>);

$V$ : volume (m<sup>3</sup>);

$F$ : vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s);

$W$ : massa de vazão da saída do evaporador 2 (kg/s)

$X$ : concentração (kgH<sub>2</sub>O/kg);

*H*: entalpia (kJ/kg);

*Q*:fluxo de energia (kJ/s);

*A* área de transferência de calor (m<sup>2</sup>);

*k*: coeficiente de transferência de calor (kJ/m<sup>2</sup> °C);

*T*: temperatura (°C);

*c*: condensador;

$\Delta$ : diferença;

*C<sub>p</sub>*: é Calor específico (kJ/kg °C);

*e*: erro de controle;

*K<sub>c</sub>*: ganho do controlador;

*m*: massa de vazão da água fria (kg/s);

*P*: pressão (kPa);

*u*: é o sinal de controle (m<sup>3</sup>/s);

*LN*: média logarítmica da temperatura;

*L*: liquido denominado licor negro;

*V*: vapor;

*IN* dentro;

*OUT* fora;

*w* água;

*s* licor

*hot* quente

*cold* frio

Com a utilização deste modelo matemático, no próximo capítulo serão apresentadas as simulações realizadas para testes do ambiente didático LACOS.

## 5. AMBIENTE SIMULADO

Essa seção tem por finalidade adaptar as equações apresentadas na seção 4.3, de forma a possibilitar a simulação do sistema do evaporador de dois estágios no ambiente didático proposto neste trabalho. Como o processo de evaporação é de difícil controle, foi necessário realizar o desacoplamento das malhas de controle, e também implementar estratégias de controle (APÊNDICE E).

- 1ª malha de controle (PID\_x1 e PID\_x2): Variável de Processo x1, variável manipulada fs, *setpoint* set\_x1. Essa estratégia visa controlar a abertura da válvula de vapor (fs) para manter o valor de concentração no evaporador 2 (x2). A saída do PID\_x2 interfere no *setpoint* do PID\_x1;
- 2ª malha de controle (PID\_V1\_f0): Variável de processo V1, variável manipulada f0, *setpoint* set\_V1. Essa estratégia visa controlar a abertura da válvula f0, para manter o volume do evaporador 1 (V1);
- 3ª malha de controle (PID\_V1\_f1): Variável de processo V1, variável manipulada f1, *setpoint* set\_V1. Essa estratégia visa controlar a abertura da válvula f1, para manter o volume do evaporador 1 (V1)
- 4ª malha de controle (PID\_V2\_f2): Variável de processo V2, variável manipulada f2, *setpoint* set\_V2. Essa estratégia visa controlar a abertura da válvula f2, para manter o volume do evaporador 2 (V2)
- 5ª malha de controle (PID\_Tc\_fc): Variável de processo Tc, variável manipulada fc, *setpoint* set\_Tc. Essa estratégia visa controlar a abertura da válvula fc, para manter a temperatura do condensador Tc.

Na primeira estratégia foi utilizado um controle cascata, onde a saída do PID\_x2 atua no *setpoint* de outro controlador, nesse caso PID\_x1. Nas outras estratégias utilizou-se controle tipo *Feedback* (CAMPOS e TEIXEIRA, 2006).

Os valores utilizados nos parâmetros dos controladores PID são apresentados no APÊNDICE F. Neste trabalho não foi realizada a sintonia dos controladores PID (sugestão para trabalhos futuros). Os valores utilizados para as simulações foram coletados através de testes práticos.



Para simulação do comportamento dinâmico do processo de evaporação, foi criado um procedimento de teste (receita), representado no Quadro 4.

<b>ETAPA</b>	<b>TEMPO DE SIMULAÇÃO (s)</b>	<b>SETPOINTS E VARIÁVEIS</b>	<b>PID</b>
INICIAL	0	set_V1 = 5; set_V2 = 5; set_Tc = 52; set_x2 = 0,4; Ts= 90°C.	PID_x1 e PID_x2= modo automático; PID_V1_f0= modo automático; PID_V1_f1= modo automático; PID_V2_f2= modo automático; PID_Tc_fc= modo automático.
1	250	set_V1 = 5; set_V2 = 5; set_Tc = 50; set_x2 = 0,34; Ts=90°C.	PID_x1 e PID_x2= modo automático; PID_V1_f0= modo automático; PID_V1_f1= modo automático; PID_V2_f2= modo automático; PID_Tc_fc= modo automático.
2	500	set_V1 = 5; set_V2 = 5; set_Tc = 50; set_x2 = 0,43; Ts=90°C.	PID_x1 e PID_x2= modo automático; PID_V1_f0= modo automático; PID_V1_f1= modo automático; PID_V2_f2= modo automático; PID_Tc_fc= modo automático.
3	750	set_V1 = 5; set_V2 = 5; set_Tc = 45; set_x2 = 0,4; Ts= 90°C.	PID_x1 e PID_x2= modo automático; PID_V1_f0= modo automático; PID_V1_f1= modo automático; PID_V2_f2= modo automático; PID_Tc_fc= modo automático.
4	1000	set_V1 = 5; set_V2 = 5; set_Tc = 45; set_x2 = 0,4; Ts= 90°C; f0= 0,09 (Abertura da válvula f0 com valor fixo)	PID_x1 e PID_x2= modo automático; PID_V1_f0= modo manual; PID_V1_f1= modo automático; PID_V2_f2= modo automático; PID_Tc_fc= modo automático.
5	1250	set_V1 = 5; set_V2 = 5; set_Tc = 45; set_x2 = 0,4; Ts= 90°C; f0=Abertura da válvula f0 volta a ser controlada pelo PID_V1_f0	PID_x1 e PID_x2= modo automático; PID_V1_f0= modo automático; PID_V1_f1= modo automático; PID_V2_f2= modo automático; PID_Tc_fc= modo automático.
6	1500	set_V1 = 5; set_V2 = 5; set_Tc = 45; set_x2 = 0,4; Ts= 90°C; f2=0,03 (Abertura da válvula f2 com valor fixo)	PID_x1 e PID_x2= modo automático; PID_V1_f0= modo automático; PID_V1_f1= modo automático; PID_V2_f2= modo manual; PID_Tc_fc= modo automático.
7	1750	set_V1 = 5; set_V2 = 5; set_Tc = 45; set_x2 = 0,4; Ts= 90°C; f2=Abertura da válvula f2 volta a ser controlada pelo PID_V2_f2	PID_x1 e PID_x2= modo automático; PID_V1_f0= modo automático; PID_V1_f1= modo automático; PID_V2_f2= modo automático; PID_Tc_fc= modo automático.

8	2000	set_V1 = 5; set_V2 = 5; set_Tc = 45; set_x2 = 0,4; Ts = 80 <sup>o</sup>	PID_x1 e PID_x2= modo automático; PID_V1_f0= modo automático; PID_V1_f1= modo automático; PID_V2_f2= modo automático; PID_Tc_fc= modo automático.
9	2250 Tempo final da etapa= 2500	set_V1 = 5; set_V2 = 5; set_Tc = 45; set_x2 = 0,4; Ts= 90 <sup>o</sup> C	PID_x1 e PID_x2= modo automático; PID_V1_f0= modo automático; PID_V1_f1= modo automático; PID_V2_f2= modo automático; PID_Tc_fc= modo automático.

**Quadro 4 - Receita**

Fonte: Autoria própria

Nesta receita as estratégias de controle são testadas através da alteração de *setpoint* das malhas de controle, manipulação de variáveis e variação de valores das perturbações dos processos. O objetivo é que, mesmo com todas essas alterações no sistema, o processo consiga atingir o valor desejado na concentração de saída (x2).

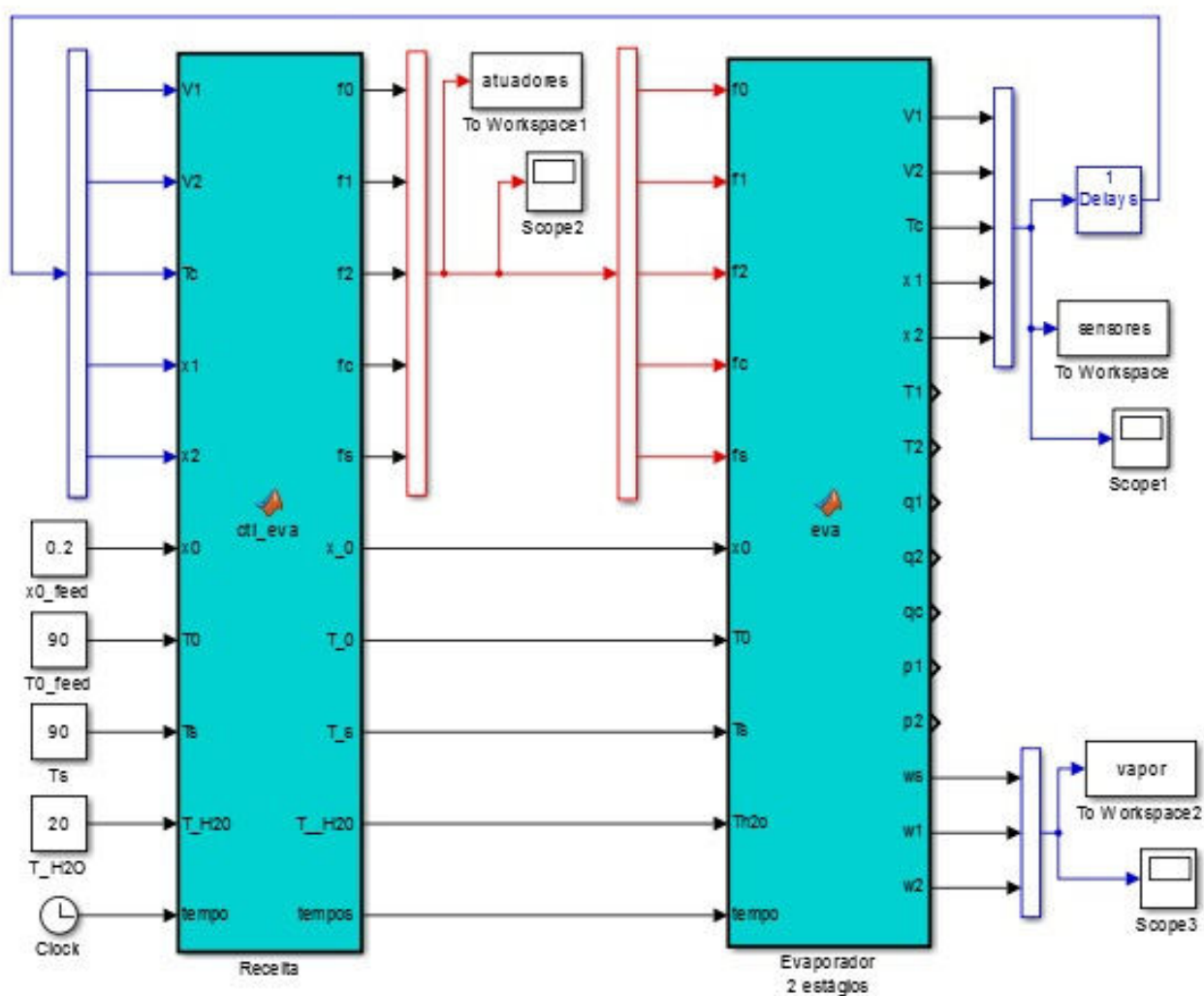
O procedimento, apresentado no Quadro 4, foi simulado no LACOS de três formas diferentes, considerando para cada uma destas, um ambiente próprio:

- **Ambiente 1:** Nesse ambiente o laboratório é totalmente virtual. O *software* MATLAB simula o processo, variáveis, receita e as estratégias de controle.
- **Ambiente 2:** No segundo o ambiente o MATLAB simula o processo industrial, porém a receita, as estratégias de controle, aplicações e algumas variáveis são simuladas através do Control Builder (ABB). Para isto, deve-se fazer o *download* do arquivo do projeto (criado no Control Builder) para o CLP da ABB. Como esse ambiente não considera a existência de um CLP físico, será utilizado o SoftController, programa utilizado para simulação do *hardware*. Aqui as variáveis Ts e Th2o serão simuladas pelos transmissores Foundation Fieldbus, LD302 e TT302, do *kit* 1. A leitura dos dados da rede Foundation Fieldbus é realizada através do OPC.
- **Ambiente 3:** No terceiro ambiente, o processo continua sendo simulado pelo MATLAB, porém a estratégia de controle, receita, aplicações e algumas variáveis fazem parte do projeto criado no Control Builder. Através deste *software* será possível fazer o *download* do projeto para o CLP ABB interligado às expansões RS232 (CI853) e Foundation Fieldbus (CI860). Esse ambiente é composto por equipamentos físicos (CLP, módulos de

entradas e saídas Modbus e transmissores Foundation Fieldbus), podendo ser comparado a um laboratório misto.

## 5.1 AMBIENTE 1- LABORATÓRIO VIRTUAL

No primeiro ambiente (Figura 25), o processo de evaporação é simulado virtualmente no MATLAB. Não existe nenhum equipamento físico integrado ao sistema e a receita e os controles PID's encontram-se no bloco "ctl\_eva", enquanto o modelo matemático do processo encontra-se no bloco "eva" do Simulink. Para o controle dos PID's foi utilizando a função pid\_alg (APÊNDICE A).



**Figura 25 - Ambiente 1- Laboratório Virtual**  
**Fonte: Autoria própria**

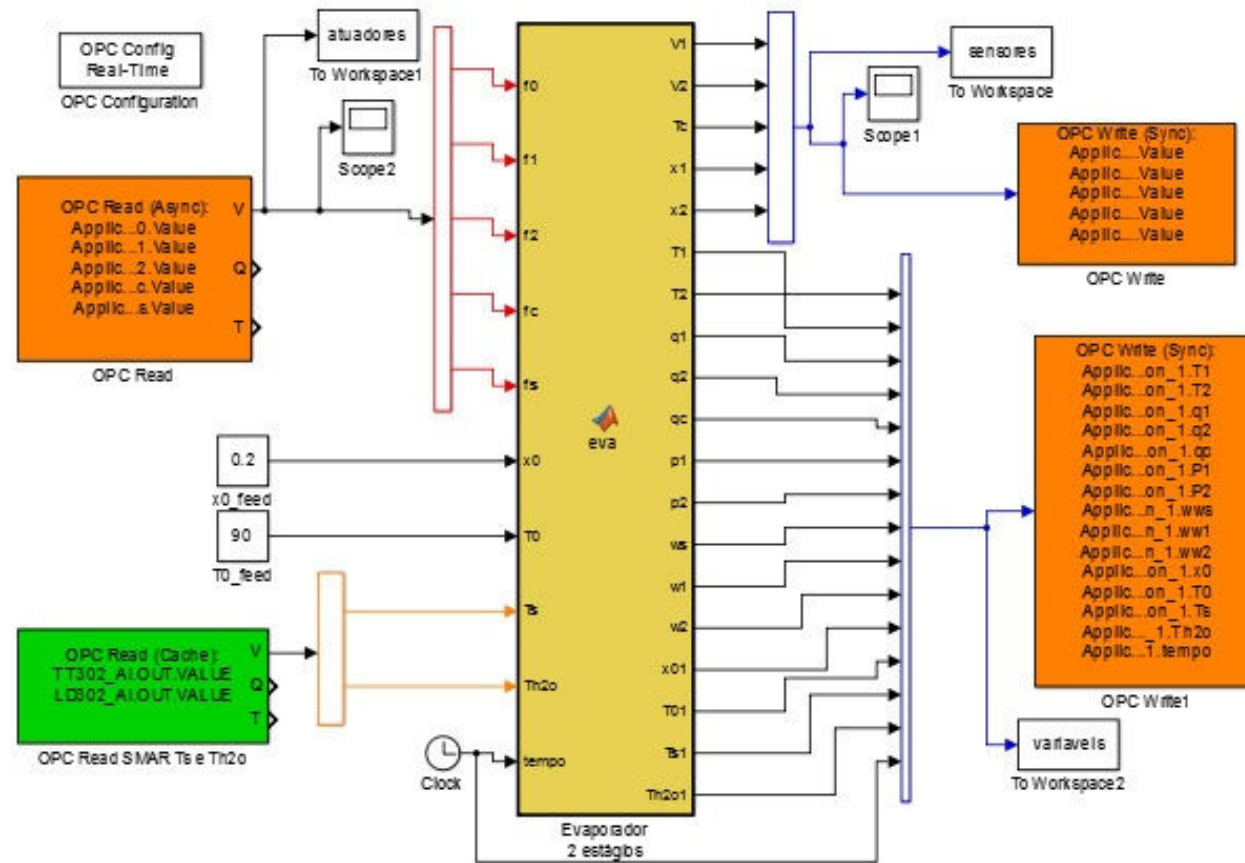
Este ambiente não depende de um alto investimento para sua estruturação. Como se trata de um laboratório virtual, não é necessária a aquisição de equipamentos caros, mas apenas de um computador com o *software* MATLAB e do modelo matemático do processo industrial a ser estudado. Para tanto Além disso, vários usuários podem fazer simulações ao mesmo tempo, para isso, basta que cada aluno possua um PC com o programa utilizado para as simulações.

O modelo matemático assim como a receita e as funções utilizadas por este ambiente podem ser visualizados no APÊNDICE A.

Os resultados obtidos com essa simulação podem ser vistos na seção 5.4 – RESULTADOS.

## 5. 2 AMBIENTE 2 – LABORATÓRIO MISTO

O segundo ambiente trata-se de um ambiente misto (Figura 26).

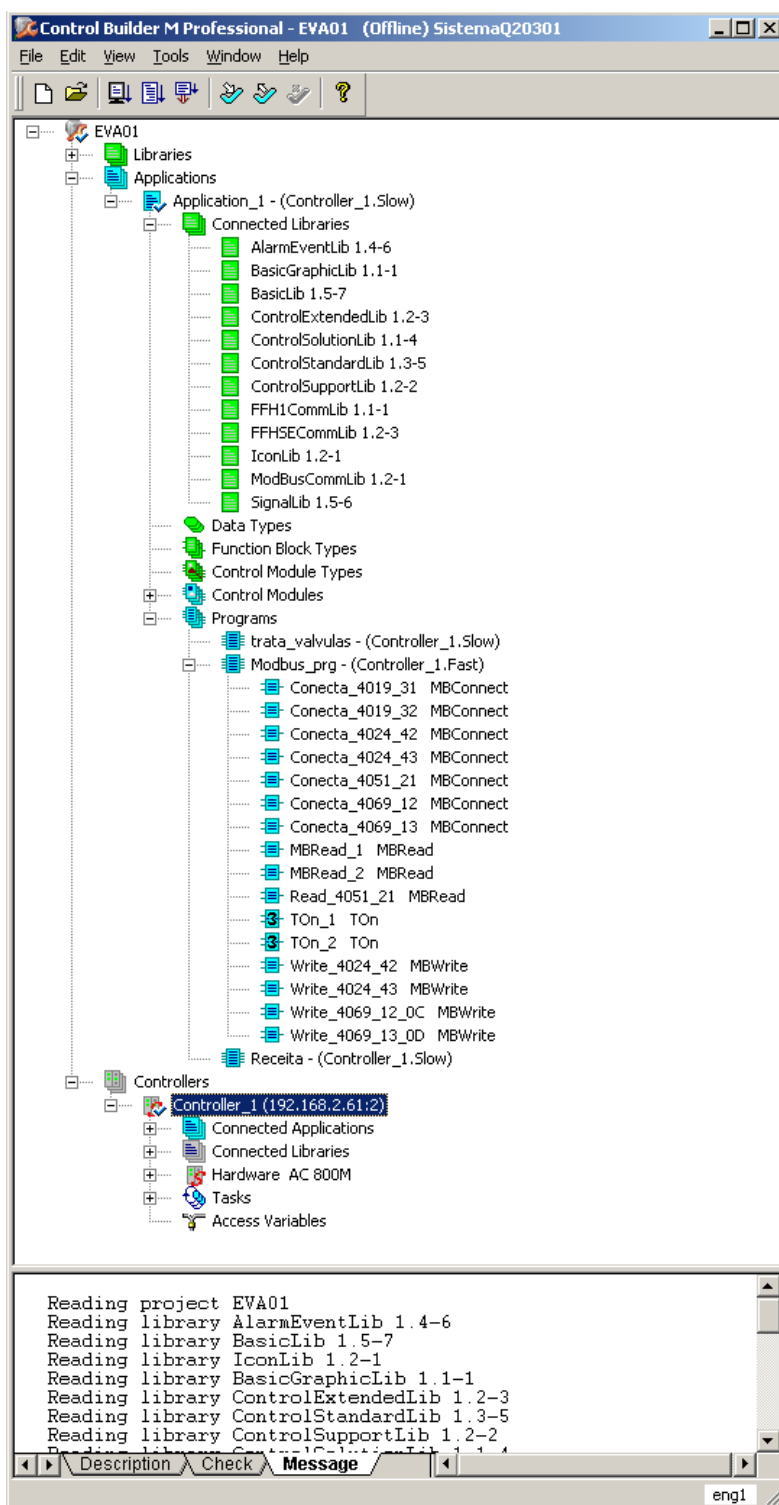


**Figura 26 - Ambiente 2**  
**Fonte: Autoria própria**

Apesar de quase todo o processo estar sendo simulado virtualmente, alguns equipamentos físicos da rede Foundation Fieldbus estão se comunicando com o sistema através da tecnologia OPC. Nesse ambiente a receita e a estratégia de controle deixam de ser programadas no MATLAB e passam a ser feitas no Control Builder. A programação é feita em SFC (*State Flow Chart*).

Nesse ambiente operam simultaneamente as seguintes aplicações: o *software* MATLAB, operando como cliente e o *software* Syscon funcionando como servidor. O programa Syscon foi utilizado para parametrizar e configurar os transmissores Foundation Filedbus da SMAR, *kit* 1 (APÊNDICE C), responsáveis por simular as perturbações Ts e Th2o. Neste *kit*, o transmissor LD302 simula o valor da temperatura da água fria do condensador (Th2o), enquanto o TT302 simula os valores da temperatura do vapor (Ts). Utilizando o *toolboxe* OPC SMAR (*toolboxe* verde da Figura 26), com endereço do servidor OPC Smar.hseoleserver.0, o MATLAB recebe os dados emitidos pelos transmissores.

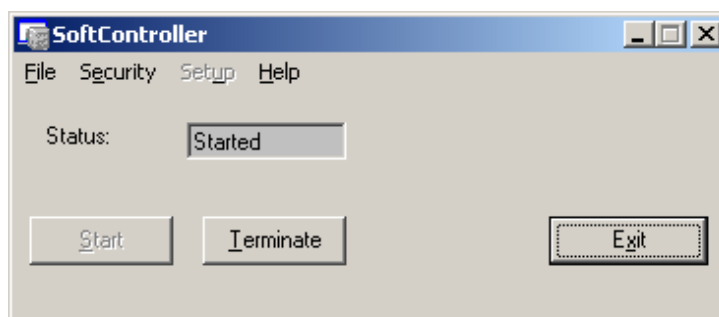
Para simulação, o modelo matemático do processo continua sendo simulado pelo Simulink, que se comunica via OPC com o projeto (receita, aplicações e estratégias de controle), *toolboxes* laranjas da Figura 26, criado no Control Builder. Este programa faz o *download* do projeto para um CLP (Figura 27)



**Figura 27 - Projeto criado no Control Builder**  
**Fonte: Autoria própria**

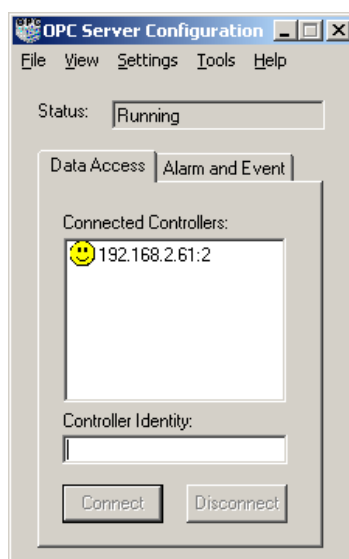
Como neste ambiente não está sendo considerado a existência de um CLP físico, fez-se uso do SoftController (Figura 28) responsável por simular o *hardware* de um CLP.





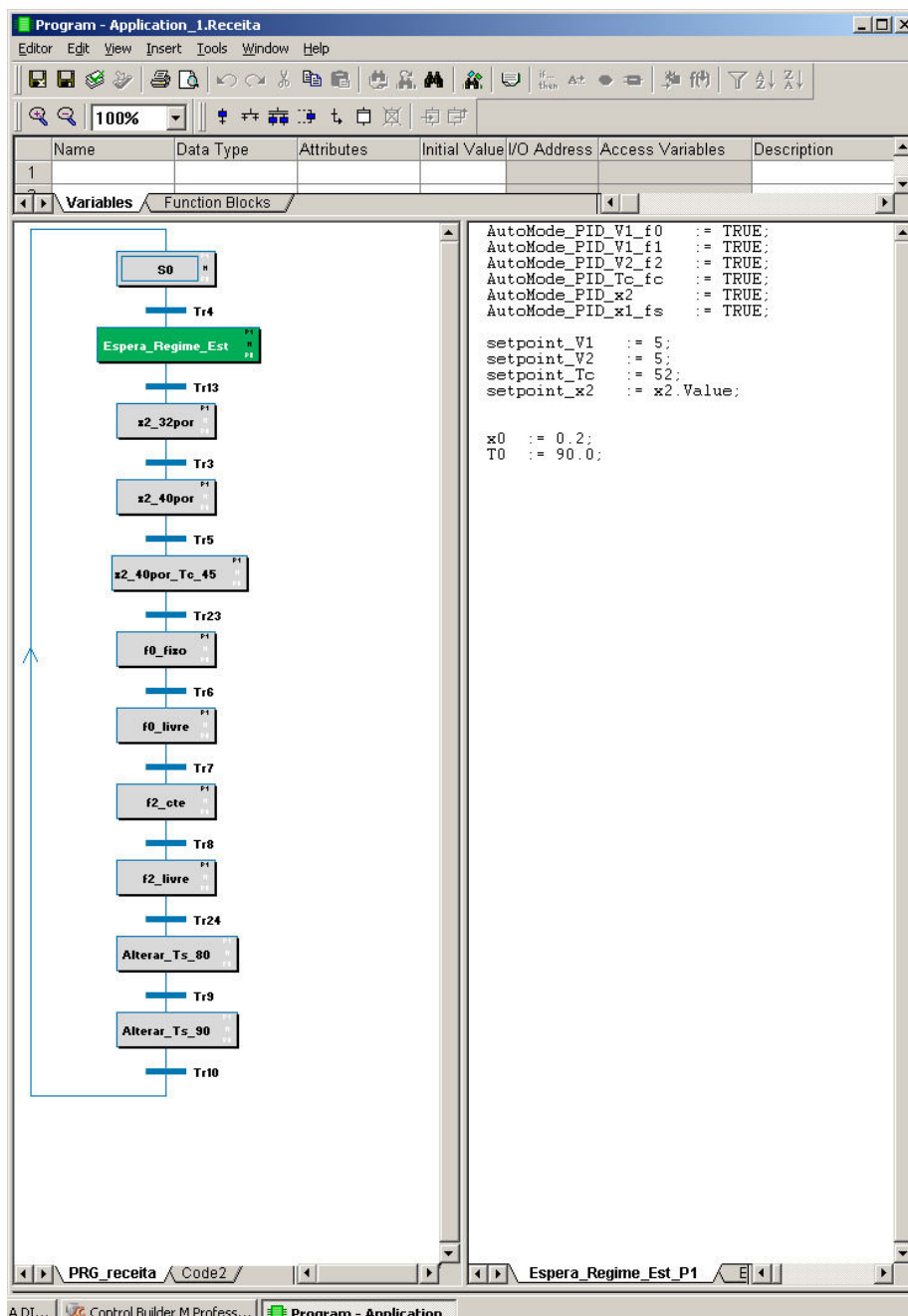
**Figura 28 - SoftController**  
Fonte Autoria própria

Após iniciar o programa SoftCrontoller, deve-se ativar o OPC Server Configuration com número do IP do *hardware* simulado (Figura 29), para que o servidor OPC envie os dados ao OPC cliente.



**Figura 29 - OPC Server Configuration com IP do *hardware* simulado**  
Fonte: Autoria própria

A receita é programada no próprio Control Builder (Figura 30):



**Figura 30 - Receita**  
**Fonte: Autoria própria**

Para as malhas de controle foi utilizado o algoritmo de controle da ABB. O algoritmo implementado no SDCD 800xA é do tipo ideal ou paralelo, onde o controlador faz a leitura regularmente da variável de processo controlada (PV) e o *setpoint* (sp), a uma taxa de amostragem. A Equação (15) apresenta a equação do controlador PID implementada no sistema ABB (ROSA, 2013).

$$M_V = G(\beta_C S_P - P_V + \frac{1}{T_i} \int (S_P - P_V) dt + \frac{T_d(d)}{dt} FilterOf(-P_V, T_{fil})) \quad (15)$$

Onde:

$M_V$  Saída do controlador (variável manipulada);

$G$  Ganho proporcional do controlador;

$\beta_C$  Fator de ponderação do set-point;

$S_P$  Set-point;

$P_V$  Variável de processo;

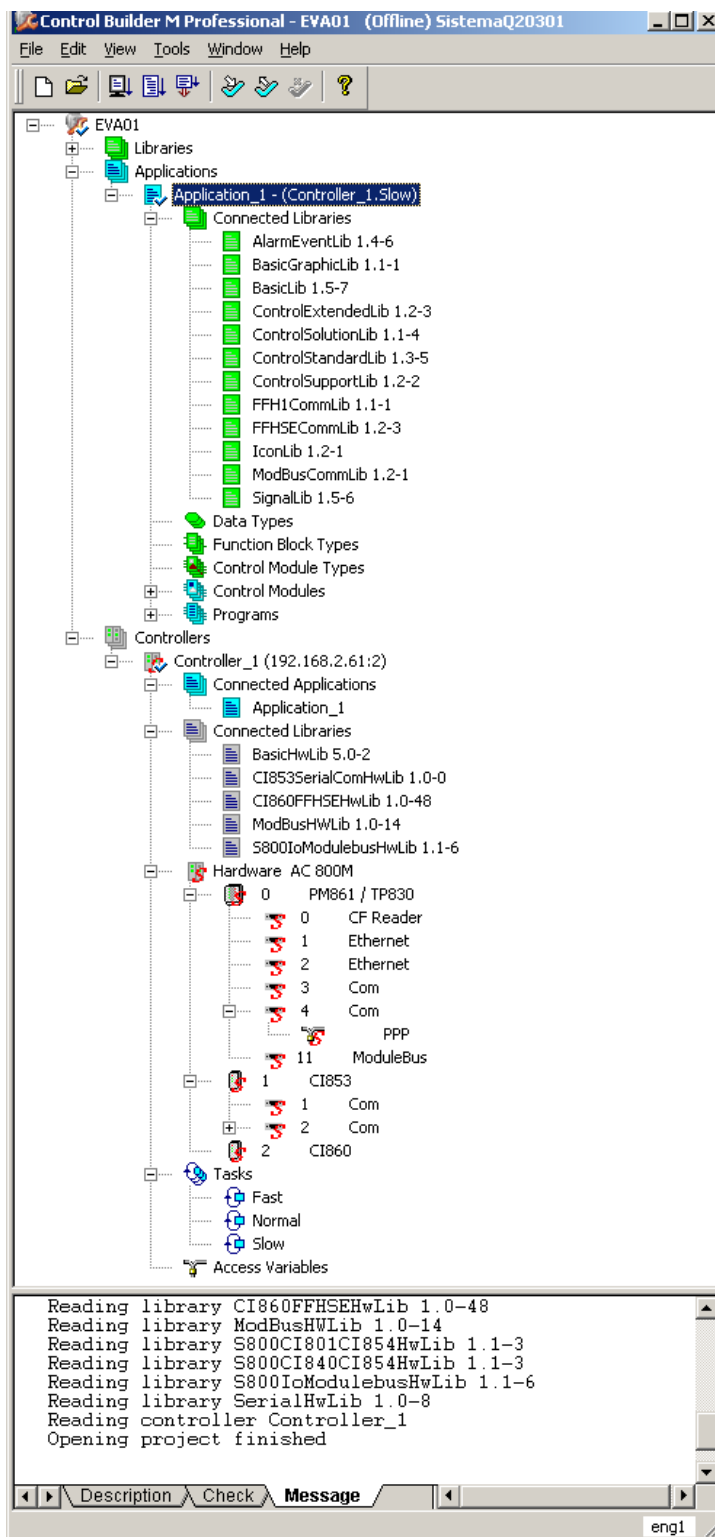
$T_d$  Tempo derivativo do controlador;

$T_i$  Constante de tempo integral do controlador;

$T_{fil}$  Tempo do filtro da parte derivativa do controlador;

*FilterOf* Expressão para um filtro passa baixa da parte derivativa do controlador

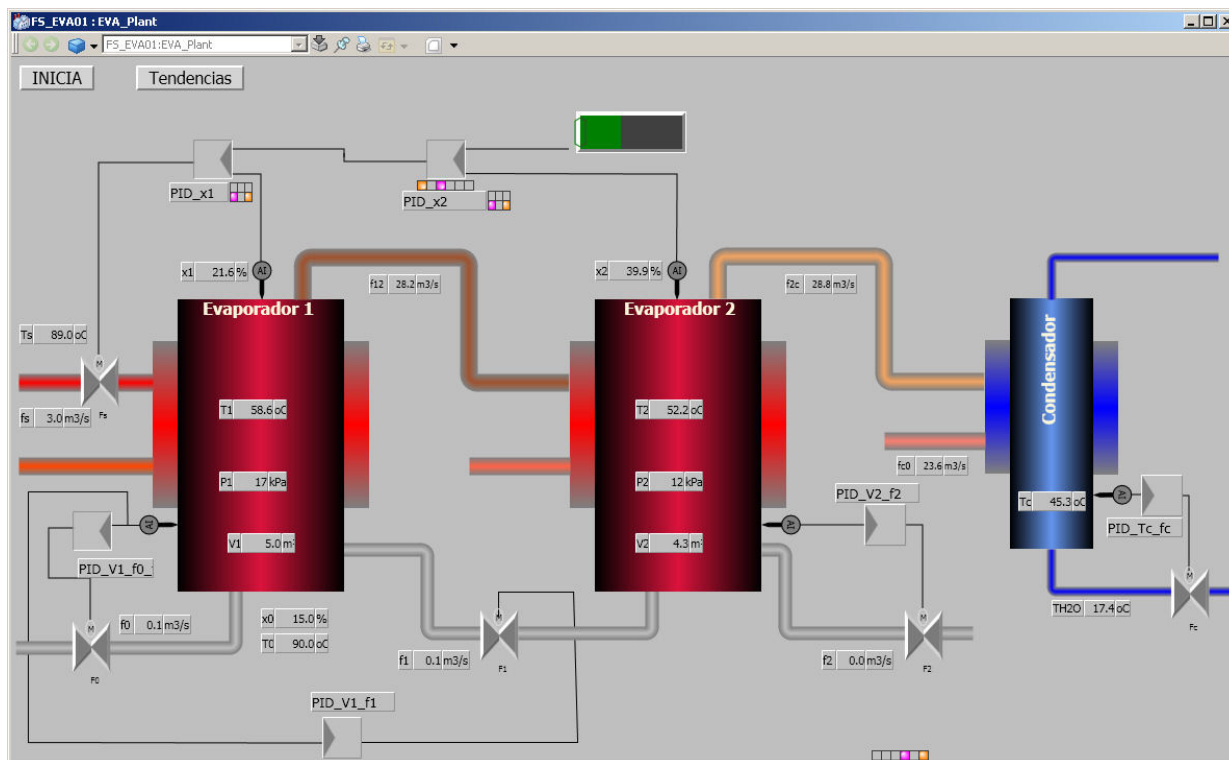
Com o projeto feito, deve-se alterar o *hardware* e aplicação do projeto para *Simulated* (Figura 31) no *software* Control Builder e em seguida fazer o *download* para o *hardware* simulado (SoftController).



**Figura 31 - Projeto Control Builder – modo *simulated***  
**Fonte: Autoria própria**

Para simulação das perturbações, foram definidos valores fixos de  $x_0=0,2$  e  $T_0=90^\circ\text{C}$ .

Com a ferramenta Process Graphic Editor foi possível desenvolver o supervisor (Figura 32) para este sistema.



**Figura 32 - IHM do Processo de Evaporação- Sistema Supervisório da ABB**  
**Fonte: Autoria própria**

Dessa forma o MATLAB lê os dados do Control Builder, dos transmissores Foundation Fieldbus e escreve dados na aplicação do Control Builder. O supervísório recebe informações da aplicação do Control Builder, sendo possível acompanhar em tempo real o processo de evaporação através da IHM.

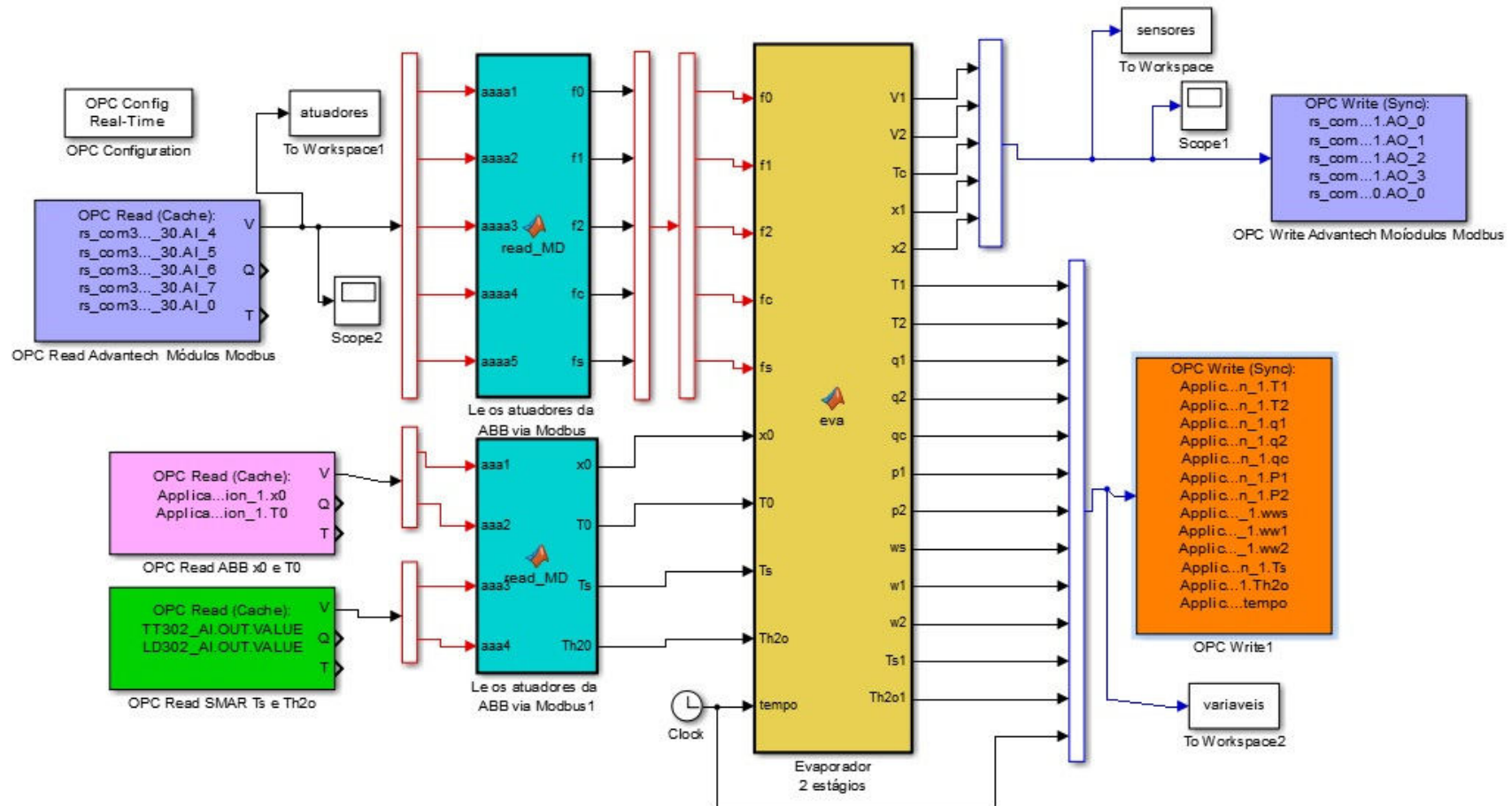
Neste ambiente os usuários têm uma experiência dentro de um laboratório misto, onde parte das simulações são feitas virtualmente e outra parte é realizada utilizando sistemas SDCD no modo de simulação (*simulated*) e equipamentos encontrados na indústria (transmissores inteligentes).

No Apêndice A, estão disponíveis os arquivos MATLAB utilizados para a simulação deste ambiente.

Os resultados da simulação desse ambiente, estão localizados na seção 5.4 RESULTADOS.

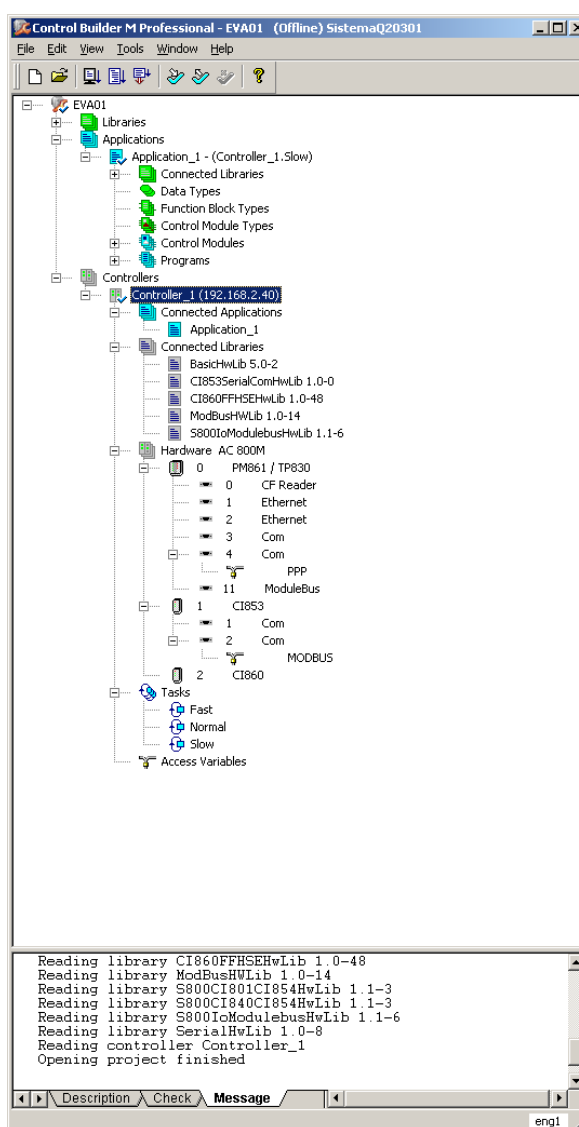
## 5.3 AMBIENTE SIMULADO COM EQUIPAMENTOS INTEGRADOS – LABORATÓRIO MISTO

O ambiente (3) também é considerado laboratório misto (Figura 33)



**Figura 33 - Ambiente 3 - Laboratório Misto**  
**Fonte: Autoria própria**

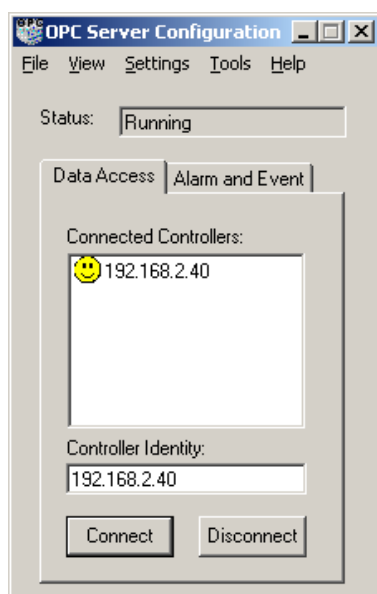
Neste ambiente o MATLAB apenas simula o modelo matemático do processo. Todas as variáveis são simuladas por equipamentos físicos (transmissores, módulos digitais e analógicos e CLP) integrados no sistema. Assim, como no Ambiente 2, a receita, aplicações e estratégias de controle deixam de ser programadas no MATLAB e passam a ser realizadas no Control Builder . Como esse ambiente possui um CLP (ABB) físico, o projeto do Control Builder poderá ser carregado e simulado no *hardware* físico, *toolboxe* laranja da Figura 33. Como a aplicação e o *hardware* do projeto são testadas utilizando um CLP físico, o projeto no Control Builder não recebem mais a configuração *Simulated* (Figura 34).



**Figura 34 - Projeto Control Builder- Utilizando CLP800M ABB**  
**Fonte: Autoria própria**

Para simulação desse ambiente serão utilizados os SDCD's ABB e SMAR, os dois *Kits* de transmissores SMAR, Simulink/ MATLAB, CPL 800M (ABB) conectado a duas expansões, a CI860 para leitura da rede Foundation Fieldbus e a CI853 conversores RS232/485 para leitura dos módulos Modbus.

Para esse ambiente, o programa OPC Server Configuration deve ser ativado com o número do IP do CLP físico (Figura 35).



**Figura 35 - OPC Server Configuration com IP do CLP 800M ABB**  
**Fonte: Autoria própria**

Neste modelo, as perturbações Ts e Th20 continuam sendo simuladas da mesma maneira do ambiente anterior, através de transmissores SMAR do *kit* 1, enviando informações através do OPC Smar.hseoleserver.0 para o MATLAB.

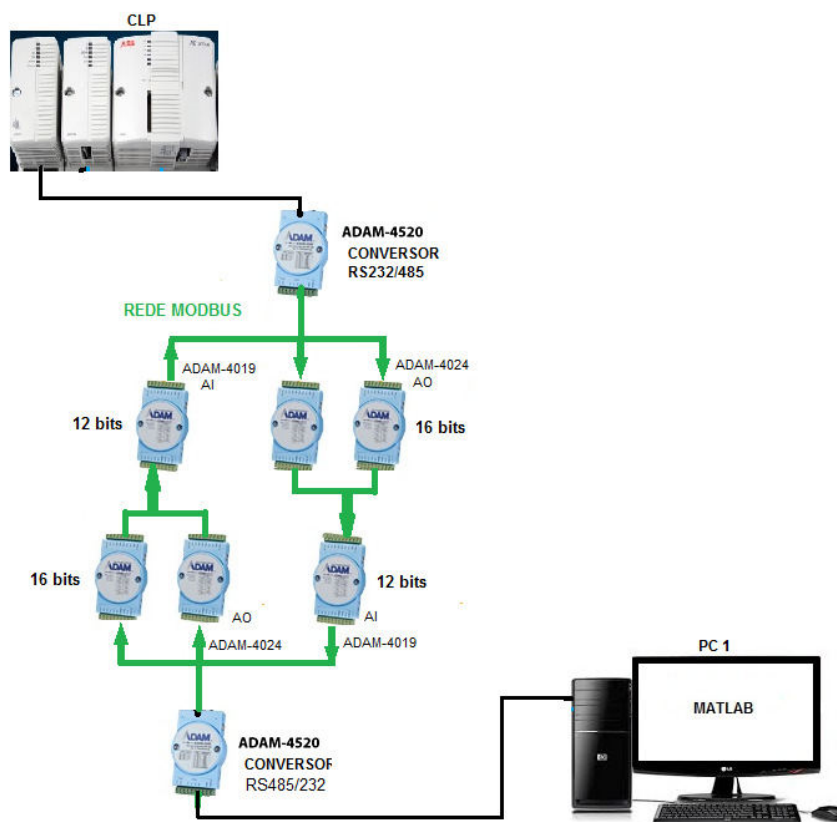
A diferença neste terceiro ambiente, é que o segundo *kit* SMAR também será utilizado, agora para simular as perturbações T0 e x0. Para a configuração desses transmissores foi utilizado o *software* Fieldbus Builder, que permite ao *software* Control Builder ter acesso aos valores lidos através da expansão CI860 (APÊNDICE C).

O *software* Fieldbus Builder utiliza OPC server OpcDaServer.1 enquanto o *software* Control Builder utiliza OPC server OpcDaServer.3. Portanto, existem duas maneiras de envio da leitura dos dados dos transmissores do *kit* 2 para o MATLAB. Para este trabalho optou-se por transmitir os dados utilizando o OpcDaServer.3, ou seja, as informações do Fieldbus Builder são lidas pelo Control Builder, sendo este o



responsável pelo encaminhamento dos dados para o MATLAB. Se fosse utilizado o endereço do servidor OpcDaServer.1, os dados seriam lidos diretamente do programa Fieldbus Builder, sem a necessidade de intervenção do programa Control Builder.

Nesse ambiente, os atuadores estão sendo simulados por módulos Modbus de saídas analógicas (AO) conectados ao CLP. Esses módulos estão conectados a um módulo AI sendo que o MATLAB faz a leitura (*read*) desse módulo. Já para simulação dos sensores, são utilizados módulos AO conectados ao PC que possui o MATLAB. O programa escreve (*write*) o valor das variáveis sensores nesses módulos que estão conectados a outro módulo AI Modbus responsável por enviar informações ao CLP. Para leitura e escrita das variáveis nos Módulos Modbus, utilizou-se o OPC ModbusRtuDa.3. Algumas conversões matemáticas precisaram ser realizadas, já que a leitura dos módulos de saídas analógicas são de 16 bits, enquanto os módulos de entradas analógicas são de 12 bits (Figura 36).



**Figura 36 - Módulos de entradas e saídas analógicas –Advantech**  
**Fonte: Autoria própria**

Dos três ambientes, este é o que mais se aproxima de um laboratório real. Porém ainda é considerado um laboratório misto, pois parte das simulações são realizadas de forma virtual. Esse laboratório limita o número de usuários que podem interferir no sistema em um mesmo instante, exigindo um maior investimento para sua estruturação. Contudo, proporciona aos usuários uma maior interação com equipamentos e *softwares* utilizados na indústria.

As configurações realizadas na rede Modbus e Foundation Fieldbus encontram-se nos APÊNDICES C e D.

A mesma IHM (Figura 32) é utilizada para esse ambiente.

No Apêndice A, estão disponíveis os arquivos MATLAB utilizados para simulação desse ambiente.

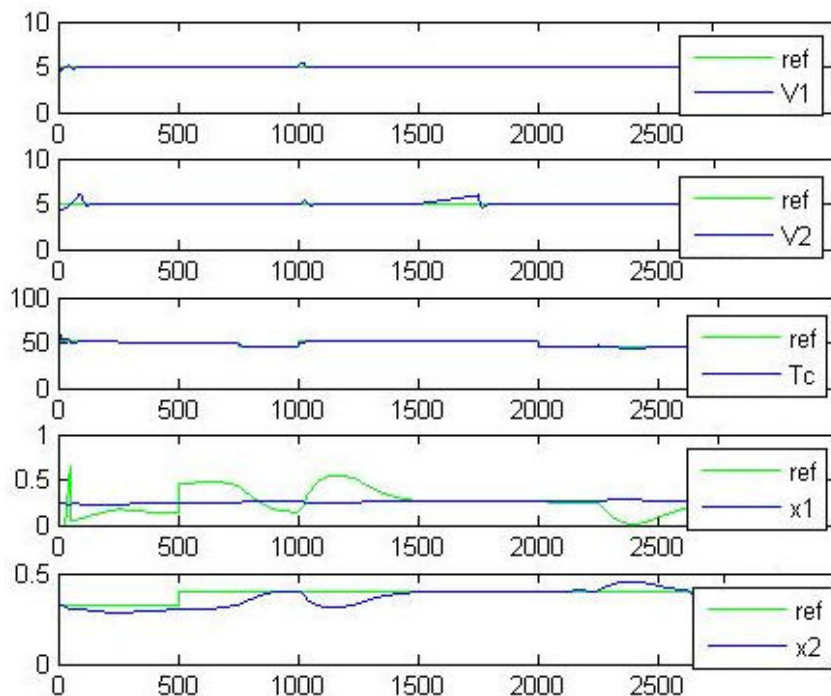
Os gráficos e resultados da simulação deste terceiro ambiente podem ser vistos na seção 5.4 RESULTADOS.

## 5.4 RESULTADOS

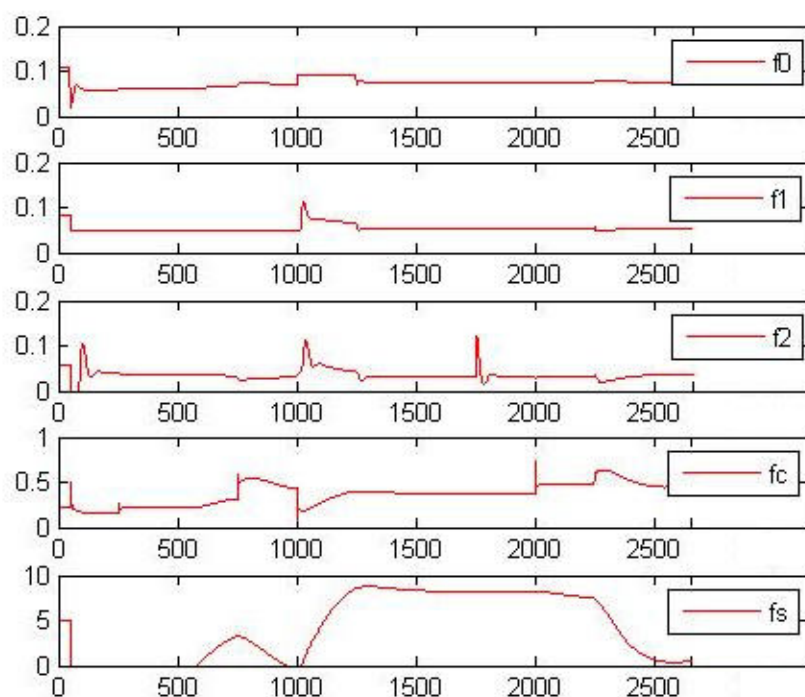
Esta seção mostra a dinâmica de todas as variáveis envolvidas no processo escolhido como estudo de caso deste trabalho, processo de evaporação. Sendo assim, com os gráficos apresentados nas figuras desta seção pretende-se verificar as alterações das variáveis de processo envolvidas e com isso validar as simulações dos três ambientes aqui abordados.

Deste modo, com a implementação das simulações, obteve-se os resultados apresentados nos gráficos abaixo:

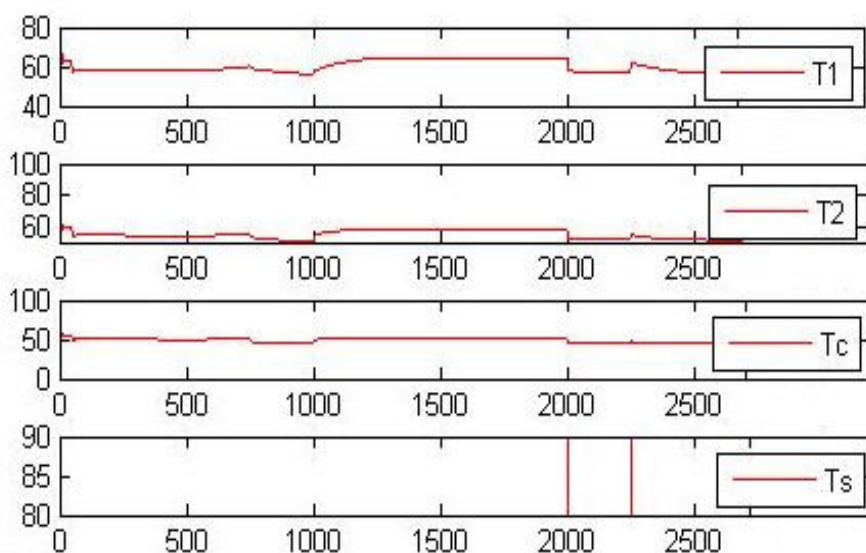
Para verificação e análise dos gráficos, foi considerado que o PID utilizado no ambiente 1 (PID função MATLAB), não é o mesmo PID utilizado nos ambientes 2 e 3 (PID ABB). Vale lembrar que por esse motivo, os gráficos dos ambientes 2 e 3 são similares, enquanto os gráficos do ambiente 1 se diferem. Outra informação relevante é o fato que o modelo estudado, trata-se de um processo multivariável.



**Figura 37 – Sensores V1, V2, Tc, x1 e x2 - Ambiente 1**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 38 - Atuadores  $f_0$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_c$  e  $f_s$  - Ambiente 1**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 39 - Temperaturas  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_c$  e  $T_s$  - Ambiente 1**  
**Fonte: Autoria própria**

Observando os resultados da Figura 37, foi possível verificar que o volume do evaporador 1 ( $V_1$ ) no Ambiente 1 manteve-se constante, tendo uma pequena variação no tempo 1000. Pois nessa etapa a válvula de vazão de entrada do

evaporador 1 ( $f_0$ ) (Figura 38) deixou de ser controlada pelo controlador PID e passou a ter uma abertura constante de  $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$  (controle manual). No caso do primeiro Ambiente, a vazão anterior ao tempo 1000 era menor que  $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ , dessa forma, ao atingir o tempo, o volume do evaporador 1 aumentou. No tempo 1250 o  $f_0$  (Figura 38) volta a ser controlado pelo PID\_V1\_  $f_0$ .

Na Figura 37, também é apresentado o volume do evaporador 2. É possível verificar que dois fatores interferiram na variável V2: aumento ou diminuição do volume V1 (Figura 37) no tempo 1000, e também no tempo 1500, quando o valor da válvula de vazão de saída do evaporador 2 ( $f_2$ ) (Figura 38) mantém-se com abertura constante de  $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ . No ambiente 1, como a abertura de  $f_2$  era maior no tempo anterior ao 1500, ao chegar nessa etapa, com a diminuição de abertura da válvula, ocasionou um aumento de V2.

No tempo 1000,  $f_1$  (Figura 38) reagiu conforme controle do V1 para manter o volume do evaporador 1 (Figura 37), compensando a abertura de valor fixo da válvula  $f_0$  (Figura 38). O mesmo ocorre para  $f_2$  (Figura 38), que para manter o controle de V2 (Figura 37), reage para compensar o valor fixo de  $f_0$  (Figura 38).

Além de interferir nas variáveis V1 e V2,  $f_0$  também implica nas concentrações  $x_1$  e  $x_2$ .

A Figura 37 também mostra que o *setpoint* do PID\_  $x_1$  é influenciado por PID\_  $x_2$ , e a concentração de  $x_1$  é controlada pela abertura da válvula  $f_s$  (Figura 38). Se o *setpoint* de  $x_2$  ( $\text{set}_x2$ ) for maior que  $x_2$ , o *setpoint* de  $x_1$  aumenta. Caso contrário, o *setpoint* de  $x_1$  diminui. Se  $x_1$  for maior que seu *setpoint* a abertura da válvula  $f_s$  diminui, caso contrário ela aumenta.

Baseado no procedimento de teste (receita- Quadro 4), buscou-se manter o valor do *setpoint* de  $x_2$ . No tempo 500 houve uma aumento no *setpoint* de  $x_2$  (figura 37). Como o processo trata-se de um sistema multivariável, ocupou-se um tempo para atingir o valor ideal de  $x_2$ , buscando dessa forma não prejudicar o controle de outras variáveis. No tempo 2000 com diminuição de  $T_s$  (Figuras 39), a concentração de  $x_2$  (Figura 37) também foi implicada.

No tempo 1500,  $f_2$  (Figura 38) passou a ter valor fixo, interferindo em V2 (Figura 37).

O  $f_c$  (Figura 38) foi controlado com base na medição da temperatura do condensador ( $T_c$ ) (Figura 39). Para manter o valor constante desta temperatura abre-se ou fecha-se a válvula  $f_c$ , responsável pela liberação de entrada de água fria.

A válvula fs (Figura 38) opera conforme estratégia de controle dos PID PID\_x1 e PID\_x2. O PID\_x1 recebe o *setpoint* do PID\_x2. A abertura desta válvula visa o aumento da concentração x1 e indiretamente da concentração x2 (Figura 37).

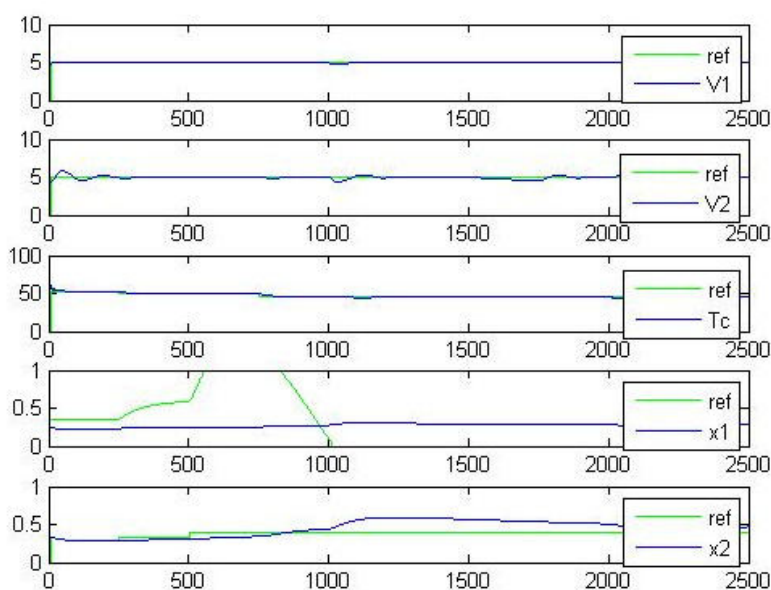
A temperatura de entrada do evaporador 1 (T0) mante-se constante durante todo o processo, com valor de 90°C. A temperatura de água fria (Th2o) para todo o processo foi mantida em 20°C.

Como citado anteriormente, o processo simulado trata-se de um sistema multivariável, isso pode ser observado através da temperatura T1 (Figura 39) que acaba sofrendo Influências das variáveis Ts (Figura 39) e fs (Figura 38).

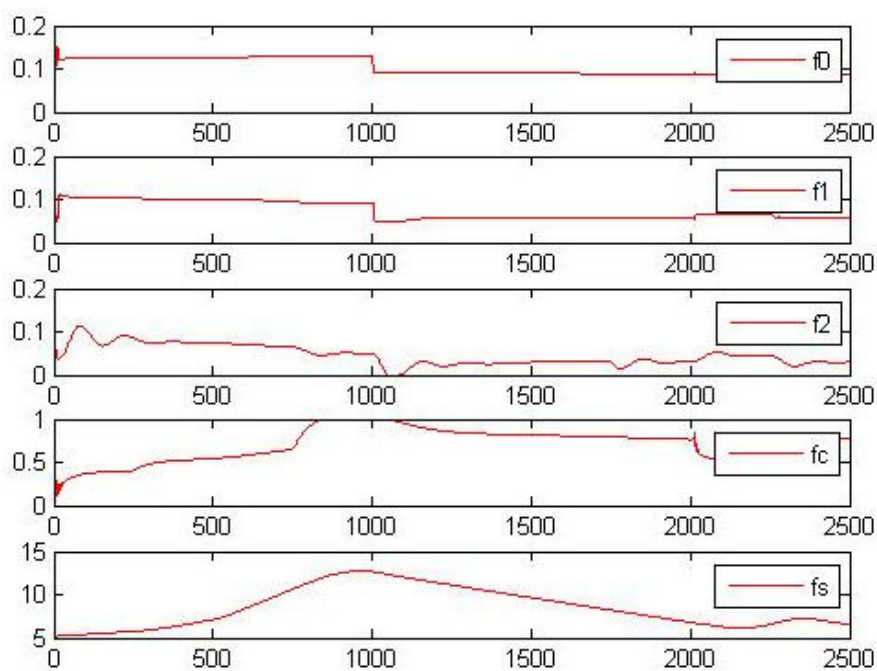
Como o aquecimento do evaporador 2 é dado pelo processo de evaporação do evaporador 1, T2 é influenciado por T1 (Figura 39), sendo indiretamente influenciado também por Ts (Figura 39) e fs (Figura 38). No tempo 2000 observa-se que a variação do Ts implicou em uma variação mais brusca das temperaturas T1 e T2 (Figura 39).

A temperatura do Condensador (Tc) (Figura 39) é controlada pela válvula fc (Figura 38). Quanto maior a abertura de fc maior a vazão de entrada de água fria no condensador, causando uma diminuição em Tc.

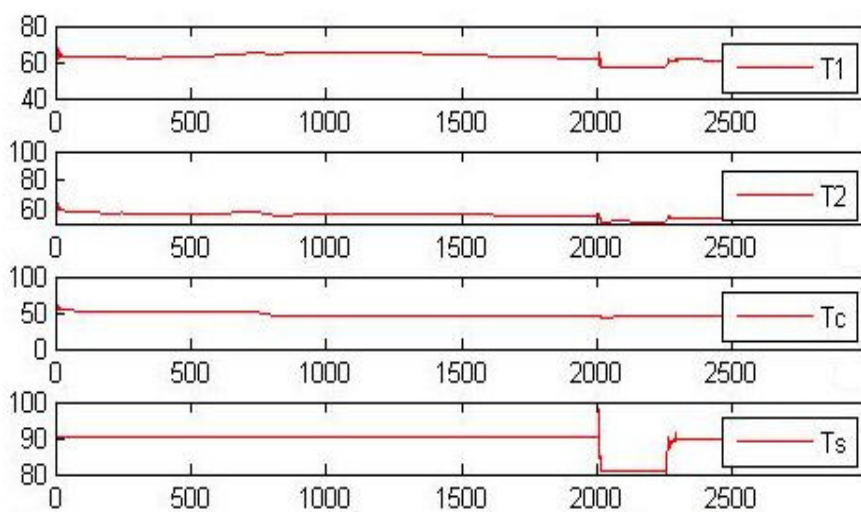
Na sequência serão apresentados os resultados das simulações realizadas nos Ambientes 2 e 3.



**Figura 40 - Sensores V1, V2, Tc, x1 e x2 - Ambiente 2**  
**Fonte: Autoria própria**

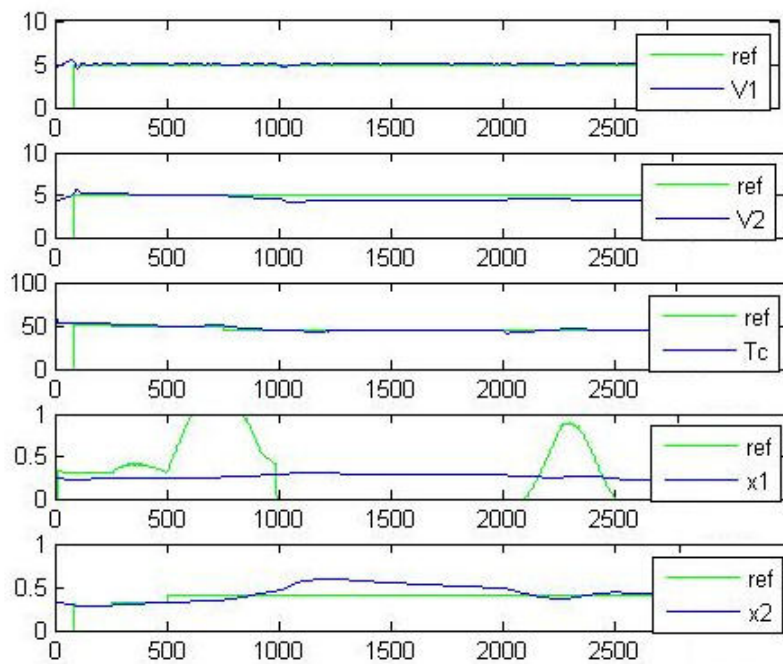


**Figura 41 - Atuadores  $f_0$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_c$  e  $f_s$  - Ambiente 2**  
**Fonte: Autoria própria**

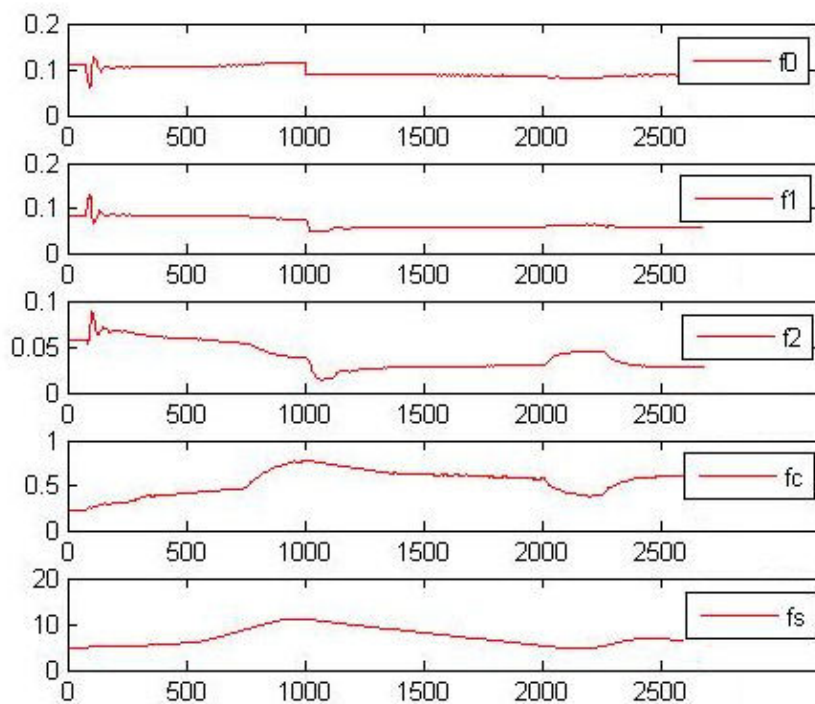


**Figura 42 - Temperaturas  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_c$  e  $T_s$  - Ambiente 2**  
**Fonte: Autoria própria**



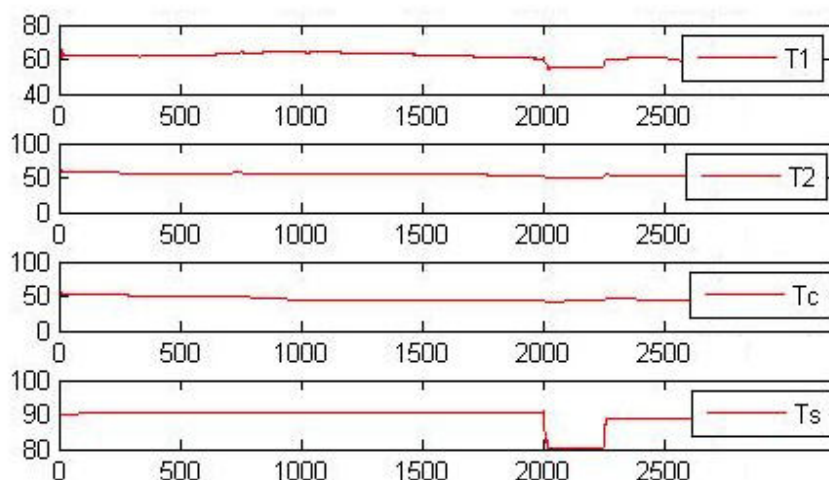


**Figura 43 - Sensores V1, V2, Tc, x1 e x2 - Ambiente 3**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 44 - Atuadores f0, f1, f2,fc e fs - Ambiente 3**  
**Fonte: Autoria própria**





**Figura 45 - Temperaturas T1, T2, Tc e Ts – Ambiente 3**  
**Fonte: Autoria própria**

Considerando que o PID utilizado nos Ambientes 2 e 3 é diferente do PID utilizado no Ambiente 1, os resultados do primeiro ambiente se difere dos dois outros ambientes. Nas Figuras 40 e 43, o volume do evaporador 1 (V1) nos ambientes 2 e 3 também manteve-se constante, tendo uma pequena variação no tempo 1000, onde  $f_0$  (Figuras 42 e 44) assume um valor fixo de abertura de  $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ . No caso do primeiro Ambiente, a vazão anterior ao tempo 1000 era menor que  $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ , dessa forma, ao atingir o tempo, o volume do evaporador 1 no Ambiente 1 aumentou, já nos ambientes 2 e 3 a situação foi contrária, pois antes de atingir essa etapa, a válvula possuía um valor de abertura maior que  $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ , com o valor fixo sendo menor, o volume do evaporador 1 também diminui.

Assim como no Ambiente 1, o volume do evaporador 2 (Figuras 40 e 43) nos Ambientes 2 e 3 manteve-se constante na maior parte do tempo. Dois fatores interferiram na variável V2: aumento ou diminuição do volume V1 no tempo 1000, e também no tempo 1500, quando o valor da válvula de vazão de saída do evaporador 2 ( $f_2$ ) (Figuras 41 e 44) manteve-se com abertura constante de  $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ . Nesses ambientes, com a abertura fixa de  $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$  para  $f_2$ , não houve muita alteração do valor do estado anterior, por isso não houve uma percepção muito grande da variação de V2 nesse tempo.

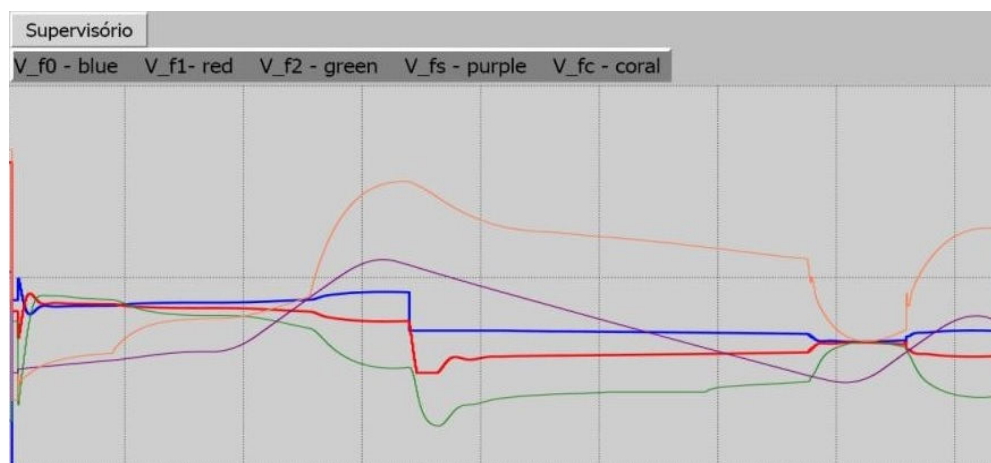
Nesses ambientes o *setpoint* do PID<sub>x1</sub> também é influenciado por PID<sub>x2</sub>, e a concentração de x1 é controlada pela abertura da válvula  $f_s$  (Figuras 41 e 44).

Da mesma forma que no ambiente 1, baseado no procedimento de teste (receita Quadro 4), buscou-se manter o valor do *setpoint* de  $x_2$ . Como o PID do ambiente 1 é diferente dos PIDs dos outros dois ambientes, a resposta obtida também se diferenciou.

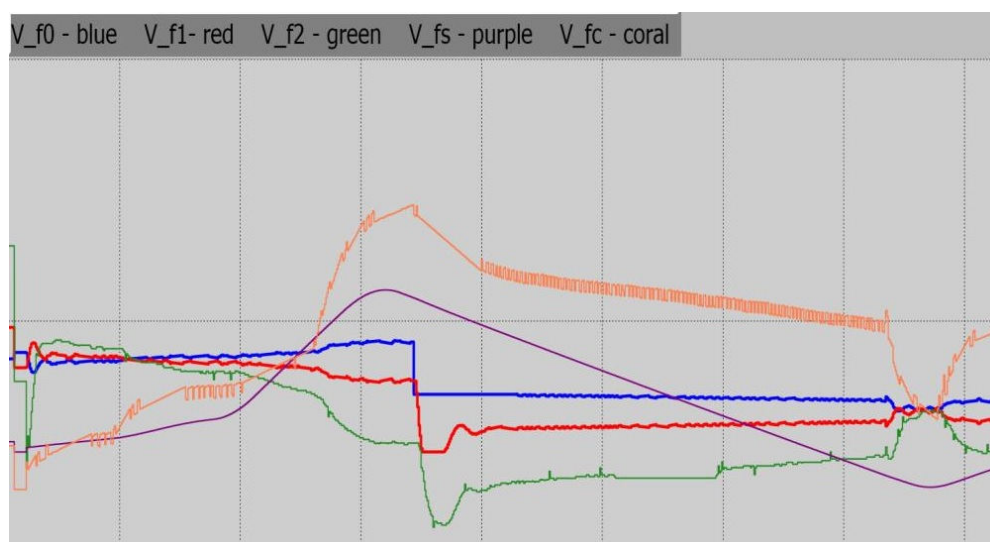
A temperatura de entrada do evaporador 1 ( $T_0$ ) mante-se constante durante todo o processo, com valor de  $90^{\circ}\text{C}$ . A temperatura de água fria ( $Th_2o$ ) para todo o processo foi mantida à  $15^{\circ}\text{C}$  durante a simulação do Ambiente 2 e 3.

Apesar dos resultados dos ambientes 2 e 3 não serem similares ao ambiente 1, a simulação dos 3 ambientes foi válida para demonstrar a utilização do Ambiente Didático proposto por este trabalho.

Outra forma de gerar os gráficos dos ambientes 2 e 3, é utilizando a IHM (Figura 32) do System 800 ABB (Figuras 45 e 46):



**Figura 46 – Resultados das variáveis  $f_0$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_c$ , Ambiente 2- supervisorio ABB**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 47 – Resultados das variáveis  $f_0$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_c$  Ambiente 3- supervisorio ABB**  
**Fonte: Autoria própria**

Como no Ambiente 3 foram utilizados equipamentos físicos para leitura das variáveis, devido ao *range* destes equipamentos, o sistema ABB precisou trabalhar com o arredondamento de valores dos sinais. Na figura 47 é possível visualizar a variação ocasionada por esses arredondamentos.

## 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No primeiro ambiente é possível simular o que ocorre em um processo real, porém não possibilita ao aluno, qualquer contato físico com instrumentos de campos, apenas com *softwares* e tecnologias. Ao utilizar a simulação virtual, é importante lembrar, que alguns fatores acabam não sendo considerados durante a simulação, porém o ambiente pode ser estruturado utilizando menor custo de investimento.

No segundo ambiente, apesar de quase todo processo ser simulado, o aluno já pode interagir com a tecnologia OPC, equipamentos físicos, e simulação do *hardware* CLP (SoftController). Contudo, a estruturação desse ambiente é mais cara que o do primeiro e mais barata que do terceiro.

O terceiro ambiente é mais caro. Mas além de integração com o sistema simulado, também é possível contato e visualização com equipamentos físicos. Existem alguns acontecimentos que não podem ser simulados, porém com equipamentos físicos consegue-se uma simulação mais próxima da real. Mesmo assim o número de alunos que podem interferir no sistema de uma só vez, é reduzido, enquanto no sistema totalmente simulado, vários alunos podem realizar os testes em um mesmo instante.

Em todos ambientes é possível realizar testes e simulações de outros processos industriais utilizando o modelo matemático dos mesmos.

## 6. CONCLUSÃO

Esta dissertação apresentou a estruturação de um ambiente didático a ser utilizado para treinamentos e aulas práticas de controle e automação. Neste ambiente encontram-se tecnologias presentes na automação de processos industriais. O mesmo foi estruturado para a integração de novos equipamentos e seus aplicativos de configuração, bem como a integração de novos *softwares* supervisorio, além dos já utilizados (ABB e SMAR) nas disciplinas de controle do departamento de Eletrônica da UTFPR.

O ambiente proporciona melhorias no método de ensino com o uso ferramentais normalmente utilizadas na indústria. Neste projeto foi demonstrado três formas de se utilizar o ambiente:

1. **Laboratório virtual – Ambiente 1** – integralmente realizado no MATLAB, envolvendo a modelagem da planta e do controle. Não está associado a nenhum sistema supervisorio comercial.
2. **Laboratório virtual – Ambiente 2** – toda a programação das estratégias de controle são simuladas com aplicativos que reproduzem virtualmente o equipamento real (Softcontroller), neste caso, um CLP da ABB e/ou outro fabricante. A planta industrial é modelada por equações diferenciais e algébricas com MATLAB. A comunicação entre processos é feita via OPC.
3. **Laboratório misto – Ambiente 3** – os equipamentos físicos (CLPs, transmissores e soluções de comunicação industrial – Modbus, Ethernet e etc) são integrados e fazem o controle da planta utilizando como resposta dinâmica a fornecida pelo processo modelado no MATLAB.

Este trabalho apresentou ainda a integração de tecnologias no controle de um sistema de evaporação. Com isto, o que se pretende mostrar é que a substituição do sistema de evaporação por outro modelo de planta permite o teste de estratégias de controle e supervisão para qualquer sistema dependendo somente da disponibilidade do modelo matemático da planta.

Via OPC, integraram-se pela comunicação Ethernet os equipamentos Foundation Fieldbus tanto da ABB quanto da SMAR, bem como o CLP AC800M da

ABB. Esta integração visa o controle das plantas industriais simuladas no MATLAB, como diferencial no que se refere ao tratamento dos sensores e atuadores. Por exemplo, válvulas e medidores de temperatura, vazão, pressão, nível e concentração foram considerados na estratégia de controle como Entradas e Sidas reais, tanto do CLP ABB (por meio da comunicação RS232 (CI853) e conversor RS485 (Advantech), quanto no computador com MATLAB simulando a planta. Este último, via cabo conversor USB/RS232 e conversor RS232/RS485 (Advantech), também via servidor OPC no MATLAB, acessando os diversos módulos de Entrada e Saida Modbus. Ou seja, via OPC é possível utilizar estas Entradas/Saidas fazendo acesso direto ao mapeamento de dados do CLP real. Contudo para mostrar o desafio de configurar Modbus tanto no CLP quanto no MATLAB, optou-se pela integração desta solução para fins didáticos.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Em termos de equipamentos, a comunicação via USB-RS485-módulos de Entrada/Saídas Analógicos/Digitais (Advantech) apresentou problemas de compatibilidade de informação devido ao tratamento possivelmente inadequado das faixas de valores das variáveis. Este assunto deverá ser tratado com interesse, pois é observado também na indústria.

Destacam-se ainda os seguintes pontos de interesse para realização futura:

1. Implementação de outras tecnologias de rede industrial;
2. Utilização do ambiente via *web*;
3. Implementação de sistemas *wireless* para conexão de diversos módulos;
4. Criação e testes de outras estratégias de controle;
5. Simulação de outros processos industriais;
6. Expansão do laboratório utilizando outros equipamentos físicos disponíveis na UTFPR (CLP Siemens, Schneider e etc);
7. Melhoria nas estratégias de controle apresentadas neste trabalho.
8. Estudo aprofundado do OPC com relação ao sistema operacional Windows, cujas simulações podem ser configuradas para serem mais

rápidas. Neste trabalho não foi possível fazer este estudo e portanto, as simulações com vários servidores OPC se apresentaram muito lentas.

## REFERÊNCIAS

ABB. **System 800xA Overview**, 2013. Disponível em: <<http://www.abb.com/product/seitp334/6d1455f13733373ac1257289002d2631.aspx>> Acesso 14 mar. 2016

ALBUQUERQUE, P. U. B.; ALEXANDRIA, A. R. **Redes Industriais: Aplicações em Sistemas Digitais de Controle Distribuído**. Editora: Ensino Profissional, São Paulo, 2009.

ALFA INSTRUMENTOS. **Manual Protocolo de comunicação Modbus RTU/ASCII**. Versão 1.0, 2000.

ANAUATE, C. A. **Redes Industriais**. Apostila IV do Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial, 2013. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/MobileIPVideo/apostila-redes-industriais-iv>> Acesso em 31/08/2016.

ANDERSON, G.; BERNDTHSSON, N. **Intermediate Evaporation Process and Operational Data**, MegaSkog AB, 1999.

AUER, M.; PESTER, A.; URSUTIU, D.; SAMOILA, C. **Distributed Virtual and Remote Labs in Engineering**. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY (ICIT), 2003, Maribor, Slovenia. New York: IEEE, 2003. v.2, p. 1208 – 1213. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1290837>> Acesso em 20 mar. 2016.

BARBOSA, A. L. S. **Laboratório Virtual de Controle e Automação com Arquitetura Baseada em Serviço**. Dissertação apresentada a Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2010. Disponível em: <[http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select\\_action=&co\\_obra=194204](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=194204)> Acesso em 20 set. 2012.

BASILIO, J. C.; MOREIRA, M. V. (2004). **State-space parameter identification in a second control laboratory**. IEEE Transactions on Education, 47, 204-210. Disponível em: <



<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1296780>> Acesso em 12 jun. 2016.

BEGA, E. A.; DELMÉE, G. J.; COHN, P. E; BULGARELLI, R.; KOCH, R.; FINKEL, V. S. **Instrumentação Industrial**. 2. Ed. Rio de Janeiro, RJ. Ed. InterCiência, 2003.

BHARGAVA, R., KHANAM, S., MOHANTY, B., RAY, A. A. **Simulation of flat falling film evaporator system for concentration of black liquor**. Computers and Chemical Engineering. 2008. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S0098135408000951/1-s2.0-S0098135408000951-main.pdf?\\_tid=16e2c868-ad7c-11e6-b492-00000aacb35e&acdnat=1479466095\\_15357da544488d5c212c862ae9cca3d3](http://ac.els-cdn.com/S0098135408000951/1-s2.0-S0098135408000951-main.pdf?_tid=16e2c868-ad7c-11e6-b492-00000aacb35e&acdnat=1479466095_15357da544488d5c212c862ae9cca3d3)> Acesso em 3 abr. 2016.

BOTELHO, D.; MOREIRA, M. V. **Um Laboratório Virtual para o Ensino de Automação Industrial**. Abenge, 2008, SP. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2008/artigos/3379.pdf>> Acesso em 10 jan. 2016.

BRANDÃO, D. **Ferramenta de Simulação para Projeto, Avaliação e Ensino de Redes Fieldbus**. Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-14102015-103122/pt-br.php>> Acesso em 15 jun. 2016.

BRANDÃO, D.; PINOTTI JUNIOR, M.; **Projecting and integrating Fieldbus Foundation Function Blocks**. Sicon 01 Sensors for industry Conference, 2001. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=968514> Acesso em 07 mar. 2012.

BRONDINO, O. C.; BRONDINO, N. C. M. **Em Busca de um Método para Melhorar a Aprendizagem em um Curso de Engenharia: Relato de uma Experiência**. Cobenge, Pará, 2012. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2012/artigos/103761.pdf>> Acesso em 5 abr. 2016.

CAGNI, E.; PEREIRA, D. R.; DÓRIA NETO, A. D.; MELO, J. d.; OLIVEIRA, L. A. **G.The Implementation of the Self-Calibration, Self-Compensation and Self – Validation Algorithms dor Foundation Fieldbus Sensors are Present using**

**Standard Function Blocks.** IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications, 2005. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1522865> Acesso em 08 mar. 2012.

CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais.** Editora Edgard Blücher, Petrobras, 2006.

CAPRI, M. R.; LUZ, Y. N. S.; NETO, A. C. **Avaliação do Uso de Material Multimídia como Instrumento de Apoio Didático a uma Disciplina Experimental em Cursos de Engenharia.** Congresso COBENGE 2012, Belém-PA.

CARVALHO, A.S.; SILVA; R. C.; NASCIMENTO, D. B. **Sistema de Comunicação OPC para uma Coluna de Destilação Piloto.** Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – IV Circuito de Iniciação Científica, 2008. Disponível em: <<http://www.essentiaeditora.iFoundationFieldbus.edu.br/index.php/CircuitolC/article/view/1935>> Acesso em: 24 nov. 2013.

CASSIOLATO, C. **Redes Industriais.** SMAR, 2011. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/artigo-tecnico/redes-industriais>> Acesso em 18: mar. 2012.

CATHOLICO, R. A. R. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Estratégia de ensino em Curso Técnico a partir dos Estilos de Aprendizagem de Felder-Soloman,** 2009, 128 p. Dissertação (Mestrado). Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18140/tde-20102009-171201/pt-br.php>> Acesso em 22 mai. 2012.

CICILLINI, D. A. **Desenvolvimento de um Algoritmo de Escalonamento para Rede Foundation Fieldbus.** Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em: <[www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)> Acesso em: 19 mar. 2012.

CONCER, G. M. **Identificação de Processos Industriais utilizando tecnologia Foundation Fieldbus.** Monografia aprensetada a Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. Disponível em: <[http://www.dnc.gov.br/CapitalHumano/Arquivos/PRH34/Gustavo-concer\\_PRH34\\_UFSC\\_DAS\\_G.pdf](http://www.dnc.gov.br/CapitalHumano/Arquivos/PRH34/Gustavo-concer_PRH34_UFSC_DAS_G.pdf)> Acesso em 19 mar. 2012.

DIAS, M. A. **Automação de uma Unidade de Experimentação de Escoamento Multifásico Utilizando Tecnologia Foundation**. Dissertação apresentada a Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/162685/339046.pdf?sequenc=1>> Acesso 01 jul. 2016.

FALTIN, N.; BÖHNE, A.; TUTTAS, J.; WAGNER, B. **Distributed Team-Learning in an Internet-Assisted Laboratory**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING EDUCATION, 2002, Manchester, UK. Manchester: University of Manchester Press, 2002. Disponível em: <<http://discoverlab.com/References/icee02.pdf>> Acesso em 6 fev. 2016.

FAVARO, J. **Controle Preditivo Aplicado à Planta Piloto de Neutralização de PH**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-16072013-170810/pt-br.php> Acesso em 01 out. 2016.

FERNANDES JUNIOR, R. F. **Identificação Remota de Plantas Industriais Utilizando Tencnologias OPC e CYBEROPC**. Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde-16062009-103207/pt-br.php>> Acesso em: 29 mar. 2012 as 7:51.

FERREIRA, J. M. M.; COSTA, R. J.; ALVES G.; COOPER, M. **The PEARL Digital Electronics Lab: full access to the workbench via the web**. In: Annual Conference on Innovations in Education for Electrical and Information Engineering (EAEIEA), 13, York, England, Apr. 2002.

FIELDBUS FOUNDATION, 2011. **News**. Disponível em: <[www.fieldbus.org](http://www.fieldbus.org)> Acesso em: 19 mar. 2012.

FONSECA, M. de O. **Comunicação OPC – Uma abordagem prática**. In: SEMINÁRIO DE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DA ABM, Vitória-ES, Brasil, 2002. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/~seixas/PaginaSDA/Download/DownloadFiles/OPCMarcosFonseca.PDF>> Acesso em: 10/05/2012 as 13:07.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L., ANDERSEN, L. B. **Principios das operações unitárias**. Editora Guanabara Dois. 2ª Edição. 670p., 1982.

FREITAS, C. M. **Protocolo Modbus: Fundamentos e Aplicações**. Artigo técnico O Embarcados, 2014. Disponível em: <<http://www.embarcados.com.br/protocolo-modbus/>> Acesso em: 01 set. 2016.

FULTON, S. **Selecting the right cable for Foundation Fieldbus Control Networks- What You Need To know**. NORTHWIRE Technical Cable, 1-2, 2008. Disponível em: <[http://www.fieldbus.org/images/stories/newsroom/articles/foundation\\_fieldbus\\_itc-pltc\\_cables\\_explained.pdf](http://www.fieldbus.org/images/stories/newsroom/articles/foundation_fieldbus_itc-pltc_cables_explained.pdf)> Acesso em: 20 mar. 2012.

GENG, L.; YAN, B. **Application of Foundation Fieldbus Technology in Chain Grate Boiler Automation Control System**. The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments ICEMI, 2007.

GERMANO, J.S.E.; CARVALHO, A. S.; GRILLO, F. S.; DENNIS, R. da S., **Simulações físicas educacionais com parâmetros variáveis em Interactive Physics**, Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA- XIII ENCITA/ 2007. Disponível em:< <http://www.bibl.ita.br/xiiiencita/FUND02.pdf>> Acesso em 1 out. 2016.

GLÓRIA, L. S., **Desenvolvimento de Simulador Industrial para Processamento de Gás Natural**, VIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – SEGeT/2011. Disponível em: <<http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos11/45814537.pdf>> Acesso em 1 out. 2016.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Programação Linear**. 2 ed. , Rio de Janeiro, Elsevier, 2005.

GRÄNFORS, A.; NILSSON, B. **Modelling of Single Evaporators**, Engineering Company, 1999. Disponível em: <<http://faculty.ksu.edu.sa/Emad.Ali/mylib/modules/CPCcase1Model.pdf>> Acesso em: 1 out. 2015.

GUTIERREZ, R. M. V.; PAN, S. K. **Complexo Eletrônico: Automação do Controle Industrial**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 28, p. 189-232, set. 2008. Disponível em: < <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES> >. Acesso em: 26 jul. 2009.

HENRIQUE, A. M. **Escalonamento no Fieldbus**. Tese apresentada a Escola Politecnica de São Paulo, 2005.

HONG, S. H.; JANG, B. D. Time-Critical **Data Transmission in the Foundation Fieldbus**. ISIE, 555-559, 2001. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=931853>> Acesso em: 07 mar. 2001.

HOON, P. S.; HUAN, Y. R.; BERGE J.; SIM, B. **Foundation Fieldbus High Speed Ethernet (HSE) Implementation**. International Simposium on Intelligent Control Vancouver, Canada, 777-782, 2002. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1157860>> Acesso em 07 mar. 2012.

JÚNIOR, J. C. R. P. E RAPKIEWICZ, C. E. **O Processo de Ensino e Aprendizagem de Algoritmos e Programação: Uma Visão Crítica da Literatura**. III Workshop de Educação em Computação e Informática do estado de Minas Gerais (WEIMIG, 2004). Belo Horizonte, MG, Brasil.

KAFOORI, K. E.; MOTAMEDI, S. A., ZIAEI, A. **Foundation Fieldbus H1 Physical Layer Diagnosis improvement**. IEEE Africon, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez48.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5308122>> Acesso em: 08 mar. 2012.

KAYA, D., SARAC, H. I. **Mathematical modeling of multiple-eFoundation Fieldbussect evaporators and energy economy**. Energy 32. p 1536-1542. 2004.

LEE, Y. H.; HONG, S. H. **Dependency on Prioritized Data in the Delay Analysis of Foundation Fieldbus**. Control Engineering Practice 18, 845-851, 2010. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S0967066108001986/1-s2.0-S0967066108001986-main.pdf?\\_tid=652fb09c-ad88-11e6-b069-00000aab0f27&acdnat=1479471380\\_b83dddff93e497eb4b05cfdfc5f2374](http://ac.els-cdn.com/S0967066108001986/1-s2.0-S0967066108001986-main.pdf?_tid=652fb09c-ad88-11e6-b069-00000aab0f27&acdnat=1479471380_b83dddff93e497eb4b05cfdfc5f2374)> Acesso em 10 out. 2016.

LI, Q., RANKIN, J.; JIANG, J. **Evaluation Delays Induced by Foundation Fieldbus H1 Networks**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, n.10, 3684-3692, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5173546>> Acesso em 07 mar. 2012.

MANGUINHO, D.A. **Sistema de Monitoração de Sensores Inteligentes em Rede Foundation Fieldbus para Melhoria dos Processos de Medição e Controle na Indústria do Petróleo.** Relatório de Estágio apresentado a Universidade Federal do Rio Grande do Norte- UFRN, 2008. Disponível em: <<http://www.engcomp.ufrn.br/publicacoes/ECC-2008-2-4.pdf>> Acesso em 19 mar. 2012.

MARANGÉ, P.; GELLOT F.; RIERA B. **Remote Control of Automation Systems for DES courses**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 54, n. 6, p. 3103–3111, 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4376291>> Acesso em: 12 out. 2016.

MARTIN, C.; URQUIA, A.; DORMIDO, S. **Implementation of Interactive Virtual Laboratories for Control Education Using Modelica.** Proceedings of European Control Conference, 2007, Kos (Greece), pp. 2679-2686. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7068966>> Acesso em 12 out. 2016.

MATRIKON OPC. **DCOM Configuration for OPC.** Disponível em: <<http://www.matrikonopc.com/dcom-configuration-opc.aspx>> Acesso em 10 mar. 2015.

MILGRAM, P.; KISHINO, F. A Taxonomy of Mixed-reality Visual Displays. **IEICE Transactions Information Systems**, New York, v. E77-D, n. 12, p. 1321-1329, 1994.

MOORE Industries-International. **Implementing Foundation Fieldbus H1 Networks in Hazardous Areas.** Inc, 2007. Disponível em: <[http://www.miinet.com/Portals/0/PDFs/Implementing\\_FF\\_in\\_Hazardous\\_Areas.pdf](http://www.miinet.com/Portals/0/PDFs/Implementing_FF_in_Hazardous_Areas.pdf)> Acesso em 20 out. 2016.

MORIOKA, Y. **Japanese Participation in the Development of The International Fieldbus Specification.** SICE, 909-912, 2002. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=1195284](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1195284)> Acesso em 19 mar. 2002.

MOSSIN, E.A.; BRANDÃO, D.; PANTONI, R. P.; TORRISI, N. M. **Teaching Foundation Fieldbus Standards through Remote Simulation.** Congresso INDUSCON 2008, Poços de Caldas.

MOSSIN, E. A.; PANTONI, R. P.; BRANDÃO, D. **A fieldbus simulator for training purposes.** ISA Transactions 48, 132-141, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001905780800044X>> Acesso em: 19 mar. 2012.

NASCIMENTO, J. M. A. do; LUCENA, P. B. **PROTOCOLO MODBUS.** UFRN - Redes para Automação Industrial – DCA2401/ Julho de 2003. Disponível em: <[http://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA447/trabalho3/trabalho3\\_13.pdf](http://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA447/trabalho3/trabalho3_13.pdf)> Acesso em 23 jun. 2016.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Foundation Fieldbus Overview.** Manual Técnico elaborado pela empresa National Instruments, 2003. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/370729a.pdf>>\_Acesso em 20 mar. 2012.

OLIVEIRA, J. M. C; MELO JUNIOR, S. S.; CALAZANZ, J. R. G.; SILVA, J. B.; RODRIGUES, W. M. R.; SAMPAIO, R. B. **Desenvolvimento da Plataforma do Laboratório de Acesso Remoto e Instrumentação Virtual Via Web.** Congresso COBENGE 2012, Belém-PA. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2012/artigos/103876.pdf>> Acesso em 3 jul. 2016.

OLIVEIRA, L. M. de; TEIXEIRA, D. P.; OLIVEIRA, A. R.; CARMO, M. J; ARAÚJO JUNIOR, L. O. de. **Utilização de uma Planta Didática SMAR para Complementação do Ensino de Engenharia de Controle e Automação.** CEFET III, Leopoldina, COBENGE 2012, Belém- PA. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2012/artigos/104420.pdf>> Acesso em 6 ago 2016.

OPC FOUNDATION, 2012 - **What is OPC?** Disponível em: <[http://www.opcfoundation.org/Default.aspx/01\\_about/01\\_what\\_is\\_opc.asp](http://www.opcfoundation.org/Default.aspx/01_about/01_what_is_opc.asp)> Acesso em 04 mar. 2012.

PHILIPP, Paul; D'ALMEIDA, Maria L. O. **Celulose e Papel: Tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica.** 2ª ed. Vol I. São Paulo. Ed. SENAI/IPT, 559 p. 1988.

PUDA, A.P. **Padronização da comunicação através da tecnologia OPC**. 2009. Disponível em: <[www.isarj.org.br/artigos/Padronizacao-da-Comunicacao-atraves-da-Tecnologia-OPC.pdf](http://www.isarj.org.br/artigos/Padronizacao-da-Comunicacao-atraves-da-Tecnologia-OPC.pdf)> Acesso em 09 mar. 2012

RAMALHO, L. S. G. **Reconfiguração Dinâmica de Estratégias Distribuídas em Dispositivos Foundation Fieldbus para Otimização de Processos na Indústria do Petróleo**. Dissertação apresentada a Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009. Disponível em: <[http://bdtd.bczm.ufrn.br/tesesimplificado/tde\\_arquivos/41/TDE-2009-11-30T055900Z-2258/Publico/LeonardoSGR.pdf](http://bdtd.bczm.ufrn.br/tesesimplificado/tde_arquivos/41/TDE-2009-11-30T055900Z-2258/Publico/LeonardoSGR.pdf)> Acesso em: 19 mar. 2012

RAPANELLO, R. M. **Laboratório remoto de qualidade de energia elétrica**. Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista- UNESP, 2008. Disponível em:< [http://feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/231-dissertacao\\_rogerio\\_rapanello.pdf](http://feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/231-dissertacao_rogerio_rapanello.pdf)> Acesso em 5 jul. 2016.

REHG, J.A.; SWAIN, W.H.; YANGULA em, B.P.; WHEATMAN, S. **Fieldbus in the Process Control Laboratory- Its Time Has Come**. ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, 13b4-12 – 13b4-17, 1999. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=840380](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=840380)> Acesso em: 19 mar. 2012.

RESENDE, D. S. **Um Estudo da Tecnologia Wireless Gateways para Redes Industriais**. Monografia apresentada à Universidade do Leste de Minas Gerais- UnilesteMG, 2006. Disponível em: <<http://bm-group.com.br/arquivos/max/diego06.pdf>> Acesso em: 19 mar. 2012.

ROSA, E. L. **Projeto de Controle e Otimização de um Sistema de Geração de Vapor com Múltiplas Cadeiras com Simulação Dinâmica**. Dissertação de Mestrado, UTFPR, 2013. Disponível em: <[http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/688/1/CT\\_CPGEI\\_M\\_Rosa%2c%20Eduardo%20Ledoux\\_2013.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/688/1/CT_CPGEI_M_Rosa%2c%20Eduardo%20Ledoux_2013.pdf)> Acesso em 20 set. 2016.

SAITO, Y.; TAKAHASHI, S.; HASHIZUMI, K.; OCHIAI, S. **Foundation Fieldbus Devices Today and Tomorrow**. Yokogawa Technical Report English Edition, n.38, 1-4, 2004. Disponível em: <<http://www.yokogawa.com/rd/pdf/TR/rd-tr-r00038-001.pdf>> Acesso em: 07 mar. 2012.



SAMSON. **Technical Information Foundation Fieldbus**. Manual Técnico elaborado pela empresa SAMSON, 2005. Disponível em: <[http://www.samson.de/pdf\\_en/l454en.pdf](http://www.samson.de/pdf_en/l454en.pdf)> Acesso em: 20 mar. 2012.

SANTOS, A. M.; CARVALHO, D. O.; MARQUES, J. E. S.; AMADO, J. A. D.; ROCHA, M. C. M.; ANDRADE, P. H. R.; SILVA, T. M. **O Ensino da Engenharia por meio de Laboratórios Virtuais: Software de Automação Industrial**. Congresso COBENGE, 2012. Belém-PA. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2012/artigos/104258.pdf>> Acesso em 6 ago. 2016.

SATO, Y. **Engineering Experience in Foundation Fieldbus Technology**. ICROS-SICE International Joint Conference, 2087-2090, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5333014>> Acesso em 07 mar. 2012.

SCHAF, F. M. **Arquitetura para Ambiente de Ensino de Controle e Automação Utilizando Experimentos Remotos de Realidade Mista**. Dissertação apresentada a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/10320>> Acesso em 5 mar. 2016.

SHOSHANI, G.; MITSCHKE, S.; STEPHAN, S. **Industrial Fieldbus Technology and Fieldbus Cable Overview- Cable Standards and Electrical Qualifications**. IEEE n.36, 1-10, 2010.

SCOTT, A.V.; BUCHANAN, W.J. **Truly Distributed Control System using Fieldbus Technology**. Seventh IEEE International Conference and Workshop on the Issue, Edinburgh, UK, pp. 165-173, 2000. Disponível em: <<http://researchrepository.napier.ac.uk/3994>> Acesso em: 19 mar. 2012.

SEIXAS FILHO, C. **Foundation Fieldbus, capítulo R4**. Universidade de Minas Gerais, 2003. Disponível em: <[http://www.cpdee.ufmg.br/~seixas/PaginaSDA/Download/DownloadFiles/FOUNDATION\\_FIELDBUS.pdf](http://www.cpdee.ufmg.br/~seixas/PaginaSDA/Download/DownloadFiles/FOUNDATION_FIELDBUS.pdf)> Acesso em: 20 mar. 2012.

SILVA; L. R.B.; ENDO, W.; SCALASSARA, P.R.; ANGÉLICO, B. A. **Práticas de Aprendizagem para Sistemas de Controle de Processos: Identificação de Sistemas Utilizando uma Planta Didática Industrial**. Congresso COBENGE, 2012. Belém-PA. Disponível em: <

81 <http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2012/artigos/103881.pdf>> Acesso em 7 out. 2016.

SMAR. **Manual dos procedimentos de Instalação, operação e Manutenção**, 2008. Disponível em: <[www.smar.com](http://www.smar.com)> Acesso em 20 mar. 2012

SMAR Equipamentos Industriais Ltda, 1998. **Como Implementar Projetos com Foundation Fieldbus**. Disponível em: <[http://www.smar.com/System302/Files/projetosFoundation\\_Fieldbus/cursofb01.pdf](http://www.smar.com/System302/Files/projetosFoundation_Fieldbus/cursofb01.pdf)> Acesso em: 20 mar. 2012.

SMAR. **Manual de Instrução dos Blocos Funcionais – Library A Smar**, 2013a.

SMAR. **Manual de Instrução, Operação e Manutenção TT302**, 2012.

SMAR. **Manual de Instrução, Operação e Manutenção LD302**, 2013b.

SMAR. **Manual de Treinamento SMAR**, 2003.

SMAR. **Planta Didática HART, FOUNDATION™ Fieldbus e PROFIBUS**. Artigos Técnicos, 2016. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/produto/pd3-planta-didatica-hart-foundation-fieldbus-e-profibus>> Acesso em: 01 set. 2016.

SMAR. **SYSTEM302- Automação Empresarial**. 2008

SOARES, L. H. **Aprendizagem Significativa na Educação Matemática: uma proposta para a aprendizagem de Geometria Básica**. UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA. 2009, 137 p. Disponível em: <<http://www.fisica.ufpb.br/~romero/pdf/DissertacaoHavelange.pdf>> Acesso em 22.mai.2012.

SOARES, T. C. A. P., CORDEIRO E. S., STEFANI Í. G. A., TIRELO, F. **Uma Proposta Metodológica para o Aprendizado de Algoritmos em Grafos Via Animação Não-Intrusiva de Algoritmos**. III Workshop de Educação em Computação e Informática do Estado de Minas Gerais (WEIMIG' 2004). Belo Horizonte, MG, Brasil. Disponível em:<

[http://www.italost.com/academic/papers/pdf/ring\\_weimig2004.pdf](http://www.italost.com/academic/papers/pdf/ring_weimig2004.pdf)> Acesso em 8 fev 2016.

SOUZA, J. P. P. de; ROSA, E. L.; SCHNEIDER, G. A.; ACOSTA, S. M.; ARRUDA, L. V. R; JUNIOR, F. N. **Unindo a Teoria e a Prática no Ensino de Automação Industrial e Controle de Processos**. Cobenge, Belém, 2012. Disponível em:<<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2012/artigos/104239.pdf>> Acesso em 9 out. 2016.

THEPMANEE, T.; PONGSWATD, S.; JULSEREEWONG, A.; JULSEREEWONG, P. **Foundation Fieldbus- Based Laboratory: A Case study of Harmonas- DEO System**. SINCE Annual Conference, 2011, pag 101-105, IEEE. Disponível em <94<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6060584>> Acesso em 2 jul. 2016.

THOMESSE, J. P. **A Review of the Fieldbus**. Annual Reviews in Control 22, 35-45, 1998. Elsevier Science Ltd. Disponível em: <<http://hal.inria.fr/LORIA/inria-00098449>> Acesso em: 19 mar. 2012.

TRIBESS, A.; SOUZA, H. A.; RODRIGUES, E. F. **O Papel do Professor na Motivação à Aprendizagem dos Alunos de Engenharia**. Cobenge 2001. Disponível em: <<http://www.pp.ufu.br/Cobenge2001/trabalhos/EQC014.pdf>> Acesso em 23.mai.2012.

VERHAPPEN, I. **Foundation Fieldbus**. ISA, Edição 2, USA, 2006. Disponível em:<[http://ac.els-cdn.com/S0019057800000057/1-s2.0-S0019057800000057-main.pdf?\\_tid=b9903660-ada2-11e6-a487-00000aacb362&acdnat=1479482689\\_2c32781740f8a01f790f8f959c2b069b](http://ac.els-cdn.com/S0019057800000057/1-s2.0-S0019057800000057-main.pdf?_tid=b9903660-ada2-11e6-a487-00000aacb362&acdnat=1479482689_2c32781740f8a01f790f8f959c2b069b)> Acesso em: 7 jul. 2016.

VERHAPPEN, I. **Foundation Fieldbus Economics Comparison**. ISA, 2000.

VICENT, S.J. **Foundation Fieldbus High Speed Ethernet Control System**. Fieldbus Inc., 1-9, 2001. Disponível em: <<http://lutung.lib.ums.ac.id/dokumen/ebooks/Elektro/pacontrol/www.pacontrol.com/download/HSE-Overview.pdf>> Acesso em: 07 mar. 2012.

WATSON, K. **Utilization of Active and Cooperative Learning in EE courses:**

**three classes and the results.** In: CONFERENCE FRONTIERS IN EDUCATION, 1995, Atlanta, USA. New York: IEEE, 1995. v. 2, p. 3c2.1 – 3c2.6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=483137>> Acesso em 10 out. 2016.

WEISS, L.A. **Desenvolvimento de Blocos Funcionais para Compensação de Atraso de Transporte Utilizando a Tecnologia Foundation Fieldbus.** Monografia submetida à Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. Disponível: <[http://www.anp.gov.br/CapitalHumano/Arquivos/PRH34/Leonardo-Weis\\_PRH34\\_UFSC\\_DAS\\_G.pdf](http://www.anp.gov.br/CapitalHumano/Arquivos/PRH34/Leonardo-Weis_PRH34_UFSC_DAS_G.pdf) > Acesso em 10 mai. 2012 às 14:28.

ZERBETTO NETO, A. **Análise do Impacto da Comunicação em redes Foundation Fieldbus no Desempenho de Sistemas de Controle.** Dissertação apresentada a Universidade do Rio Grande do Sul, 2007. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/10714/000600032.pdf?sequence=1>> Acesso em: 19 mar. 2012.

ZHENG, L.; NAKAGAWA, H. **OPC (OLE For Process Control) Specification and its developments.** Since Annual Conference, 2002. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1195286>> Acesso em 10 out. 2016.

## **APÊNDICE A**

Arquivos MATLAB para Simulação dos 3 Ambientes no LACOS

---

## ctl\_eva (AMBIENTE 1)

```
function [f0,f1,f2,fc,fs,x_0,T_0,T_s,T__H20,tempos,...
        set_V1,set_V2,set_Tc,set_x1,set_x2] = ...
        ctl_eva (V1,V2,Tc,x1,x2,x0,T0,Ts,T_H20,tempo)

persistent controladores ...
yOldV1 IOldV1 DOldV1 ...
yOldV2 IOldV2 DOldV2 ...
yOldV3 IOldV3 DOldV3 ...
yOldTc IOldTc DOldTc ...
yOldx2 IOldx2 DOldx2 ...
yOldx1 IOldx1 DOldx1 ;

f0      = 0.11;
f1      = 0.0822;
f2      = 0.0577;
fc      = 0.2139;
fs      = 5;
x_0     = x0;
T_0     = T0;
T_s     = Ts;
T__H20  = T_H20;
tempos  = tempo;
set_V1  = 0.0;
set_V2  = 0.0;
set_Tc  = 0.0;
set_x1  = 0.0;
set_x2  = 0.0;

Temp_int = 0.01;
Temp_ctl = Temp_int*100;

if isempty(controladores)
    controladores =0;
    yOldV1=0; IOldV1=0; DOldV1=0;
    yOldV2=0; IOldV2=0; DOldV2=0;
    yOldV3=0; IOldV3=0; DOldV3=0;
    yOldTc=0; IOldTc=0; DOldTc=0;
    yOldx2=0; IOldx2=0; DOldx2=0;
    yOldx1=0; IOldx1=0; DOldx1=0;
elseif tempo <= 50
    set_V1 = 5;
    set_V2 = 5;
    set_Tc = 52;
    set_x2 = .32;
    % controla V1 por f0
    [f0,v,yOldV1,IOldV1,DOldV1] = ...
    pid_alg_ABB(set_V1,V1,.1,10,0,Temp_ctl,yOldV1,IOldV1,DOldV1,0,.22,1);

    % controla V1 por f1
    [f1,v,yOldV2,IOldV2,DOldV2] = ...
    pid_alg_ABB(set_V1,V1,.2,10,0,Temp_ctl,yOldV2,IOldV2,DOldV2,0,3,-1);

    % controla V2 por f2
    [f2,v,yOldV3,IOldV3,DOldV3] = ...
    pid_alg_ABB(set_V2,V2,.1,10,0,Temp_ctl,yOldV3,IOldV3,DOldV3,.1,3,-1);
```

```

% controla Tc por fc
[fc, v, yOldTc, IOldTc, DOldTc] = ...
pid_alg_ABB(set_Tc, Tc, .05, 20, 0, Temp_ctl, yOldTc, IOldTc, DOldTc, 0, .42, -1);

% controla x2
[out_x2, v, yOldx2, IOldx2, DOldx2] = ...

pid_alg_ABB(set_x2, x2, 50, 10000, 100, Temp_ctl, yOldx2, IOldx2, DOldx2, 0, 1, 1);
% controla x1 por fs, hot stream
set_x1 = out_x2;
[fs, v, yOldx1, IOldx1, DOldx1] = ...
pid_alg_ABB(set_x1, x1, 1, 50, 0, Temp_ctl, yOldx1, IOldx1, DOldx1, 0, 90, 1);
f0 = 0.11;
f1 = 0.0822;
f2 = 0.0577;
fc = 0.2139;
fs = 5; %15;
Ts= 90;
IOldx1 = 5;
tempo
else
controle_f0=1;
controle_f2=1;
set_V1 = 5;
set_V2 = 5;
set_Tc = 52;
set_x2 = .4;

switch controladores
    case 0
        set_V1 = 5;
        set_V2 = 5;
        set_Tc = 52;
        set_x2 = .32;
        if tempo == 250
            controladores = 1;
        end
    case 1
        set_V1 = 5;
        set_V2 = 5;
        set_Tc = 50;
        set_x2 = .32;
        if tempo == 500
            controladores = 2;
        end
    case 2
        set_V1 = 5;
        set_V2 = 5;
        set_Tc = 50;
        set_x2 = .40;
        if tempo == 750
            controladores = 3;
        end
    case 3
        set_V1 = 5;
        set_V2 = 5;
        set_Tc = 45;
        set_x2 = .4;
        if tempo == 1000
            controladores = 4;

```

```

        end
    case 4
        controle_f0=2
        if tempo == 1250
            controladores = 5;
        end
    case 5
        controle_f0=1
        if tempo == 1500
            controladores = 6;
        end
    case 6
        controle_f2=2
        if tempo == 1750
            controladores = 7;
        end
    case 7
        controle_f2=1
        if tempo == 2000
            controladores = 8;
        end
    case 8
        set_V1 = 5;
        set_V2 = 5;
        set_Tc = 45;
        set_x2 = .4;
        T_s      = 80;

        if tempo == 2250
            controladores = 9
        end
    case 9
        set_V1 = 5;
        set_V2 = 5;
        set_Tc = 45;
        set_x2 = .4;
        T_s      = 90;
        if tempo == 2500
            controladores = 9
        end
    otherwise
        set_V1 = 4;
        set_V2 = 5;
        set_Tc = 52;
        set_x2 = .4;
        controle_f0=1;
        controle_f2=1;
end

if controle_f0==2
    f0= 0.09;
else
    controle_f0==1;
% controla V1 por f0
[f0,v,yOldV1,IOldV1,DOldV1] = ...
pid_alg_ABB(set_V1,V1,.1,10,0,Temp_ctl,yOldV1,IOldV1,DOldV1,0,.22,1);

```



```

end

% controla V1 por f1
[f1,v,yOldV2,IOldV2,DOldV2] = ...
pid_alg_ABB(set_V1,V1,.2,10,0,Temp_ctl,yOldV2,IOldV2,DOldV2,0.05,.16,-
1);

if controle_f2==2;
    f2 = 0.03;
else
    controle_f2==1;
% controla V2 por f2
[f2,v,yOldV3,IOldV3,DOldV3] = ...
pid_alg_ABB(set_V2,V2,.1,10,0,Temp_ctl,yOldV3,IOldV3,DOldV3,0,.12,-1);
end

% controla Tc por fc
[fc,v,yOldTc,IOldTc,DOldTc] = ...
pid_alg_ABB(set_Tc,Tc,.05,20,0,Temp_ctl,yOldTc,IOldTc,DOldTc,0,1,-1);
[fc Tc set_Tc]
% controla x2
[out_x2,v,yOldx2,IOldx2,DOldx2] = ...
pid_alg_ABB(set_x2,x2,4,1000,100,Temp_ctl,yOldx2,IOldx2,DOldx2,0,1,1);
% controla x1 por fs, hot stream
set_x1 = out_x2;
[fs,v,yOldx1,IOldx1,DOldx1] = ...
pid_alg_ABB(set_x1,x1,10,100,0,Temp_ctl,yOldx1,IOldx1,DOldx1,0,20,1);
%fs = fs + Ts;
[fs out_x2 IOldx2 DOldx2 IOldx1 DOldx1]
end

```

---

## eva (AMBIENTE 1)

```

function [V1,V2,Tc,x1,x2,T1,T2,q1,q2,qc,p1,p2,ws,w1,w2] = ...
    eva (f0,f1,f2,fc,fs,x0,T0,Ts,Th2o,tempo)

```

```

persistent estado x

```

```

if isempty(estado)
    estado = 0;
    x = [5; 0.2507; 312.8; 5; 0.3400; 274.1]; % regime estacionário
x1 = .2; % liqour composition in evap 1
T1 = 60; % liqour temperature in evap 1
V1 = 5; % liqour volume in evap 1

x2 = 0.3; % liqour composition in evap 2
T2 = 60; % liqour temperature in evap 2
V2 = 5; % liqour volume in evap 2

q1=0.0;
q2=0.0;
qc=0.0;
p1=0.0;
p2=0.0;
Tc=0.0;
ws=0.0;
w1=0.0;
w2=0.0;

```

```

else
    t = 1;
    Temp_int = 0.01;
    %x = [V1; x1; T1; V2; x2; T2];
    [sys,yy]=model_eva_1(tempo,x,[f0 f1 f2 fc x0 T0 Ts Th2o fs]);
    for aaa=1:1:100
        x = x + Temp_int*sys;
    end

    x1 = x(2); % liqour composition in evap 1
    T1 = t1blq(x(2),x(3)); % liqour temperature in evap 1
    V1 = 1000*x(1)./dnslblq(T1,x(2)); % liqour volume in evap 1

    x2 = x(5); % liqour composition in evap 2
    T2 = t1blq(x(5),x(6)); % liqour temperature in evap 2
    V2 = 1000*x(4)./dnslblq(T2,x(5)); % liqour volume in evap 2

    q1=yy(1,1);
    q2=yy(2,1);
    qc=yy(3,1);
    p1=yy(4,1);
    p2=yy(5,1);
    Tc=yy(6,1);
    ws=yy(7,1);
    w1=yy(8,1);
    w2=yy(9,1);
end

```

---

### dnslblq (AMBIENTES 1, 2 e 3)

```

function dns=dnslblq(T,X) %#codegen
%
% Density (m3/kg)for liquid black liqour as a function of
% temperature (°C) and concentration (kg water / kg solution).
%
% dnslblq takes scalars as argument and givs an argument back.
%
% Constructed by Anders Gränfors november 1997.
%
dns = 1007.4 - 0.495*T + 600*X;

```

---

### entlblq (AMBIENTES 1, 2 e 3)

```

function [epl]=entlblq(T,X) %#codegen
%
% Entphalpy (kJ/kg) for liquid black liqour as a function of
% temperature (°C) and concentration (kg water / kg solution).
%
% entlblq takes scalars as argument and givs an argument back.
%
% Constructed by Anders Gränfors november 1997.
%
epl = (4.1868-2.261*X)*T;

```

---

### eph2o (AMBIENTES 1, 2 e 3)

```

function epl = eplh2o(P, T) %#codegen
%EPLH2O Specific entalpy of liquid water, E = EPLH2O(P,T) (kJ/kg), as a
function
%   of pressure, P (kPa) and temperature T (°C).
%
%   Source: Ernst Schmidt, 1969, Properties of water and steam in SI-
units,
%   Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, R. Oldenbourg Munchen.
%
%   Pressure range: 0.6 - 19000 kPa. Temperature range: 0 - 362 C.
%   Max. error relative the International Skeleton Tables: 0.15 %
%
%   The program uses the subprogram EQTH2O.
%
%   Author : C. Engman , Dept. Chem. Eng. I, Lund, February 1983
%   Revised: R. Colschen, Dept. Chem. Eng. I, Lund, August 1985
%   Revised: R. Colschen, Dept. Chem. Eng. I, Lund, May 1987
%   Revised: Stefan Törn, Dept. Chem. Eng. I, Lund, March 1988
%   Revised: R. Colschen, Dept. Chem. Eng. I, Lund, May 1990
%   Converted to MATLAB by:
%           Anders Gränfors, Dept. Chem. Eng. I, Lund 5 Mars 1995
%   Revised: Anders Gränfors, Dept. Chem. Eng. I, Lund, 19 December ,
1995
% TooLowOrHigh = find((T < 0) | (T > 374) | (P < 0.61)...
%                   | (T > 19000) | (T.*0.9999 > eqth2o(
P )));

t1 = 0.00154487872701993.*T+0.421983624285494;
t2 = t1.*t1;
t3 = t2.*t1;
t4 = t2.*t2;
t6 = t4.*t2;
t7 = t4.*t3;
t8 = t4.*t4;
t10 = 1./t6;
t11 = 1.0 -0.8438375405.*t2-0.0005362162162.*t10;
t12 = t11.*t11;
t14 = sqrt(1.72.*t12-0.00022685859691024.*T-0.0619664257460328 +...
0.44989682368897e-
5.*P);
t15 = 1.0 -0.8438375405.*t2-0.0005362162162.*t10+t14;
t17 = -0.00260725333075854.*T-0.712171247296694 + 0.00321729729720./t7;
t24 = t15.^(1./17);
t25 = t24.*t24;
t26 = t25.*t25;
t32 = abs(0.231731805714506 - 0.00154487872701993.*T);
t33 = t32.*t32;
t34 = t33.*t33;
t35 = t34.*t34;
t38 = t8.*t8;
t39 = t38.*t3;
t43 = abs(0.115e-5 + t39).^2;
t48 = t8.*t3;
t51 = (0.000015108+t48).^2;
t54 = P.^2;
t55 = t54.*P;
t61 = 7.002753165 + 0.00004520795666003617.*P;
t62 = t61.*t61;
t69 = t54.*t54;
t71 = 739.301458788841.*T + 163920.466110549-0.276364606019155e7.*t2...

```

```

+0.944280256739551e7.*t3-
0.208307675590731e8.*t4+0.306822124630358e8.*t4.*t1;
t72 = -0.301196627013353e8.*t6 + 0.189794973993922e8.*t7 -...
0.696083281226833e7.*t8 +
0.113161485881604e7.*t8.*t1;
t73 = 559.749606393127.*(t15.*(-0.830459770114945 +
0.700773129897994.*t2 +...
0.000445305995637357.*t10 + 0.58620689551725.*t14 + 0.416666666667.*t1
.*t17)...
+0.000113429298455121.*T+0.0309832128730164 -
0.72.*t1.*t11.*t17)./(t26.*t24);
t74 = 0.00317.*(-0.02616571843 - 0.02284279054.*t2 + 242.1647003.*...
(0.0139039085431794.*T+4.45156804856945).*t35.*t32+0.1269716088e-9.*...
(20.*t39+0.115e-
5)./t43).*P;
t75 = -70.1204.*((12.*t48 + 0.000015108).*(0.937992010849910e-11.*P+...
0.444317439561950e-16.*t54+ 0.102161218698085e-21.*t55))./t51;
t76 = 906.966657888536.*t38.*t2.*(2.41196+ 19.*t2).*(1./t62./t61+...
0.135410710940326e-7.*P)+ 0.172888641578764e-16.*t55+0.37197019193547e-
27.*...

t69./t38./t4;
ep1 = t71 + t72 + t73 + t74 + t75 + t76;
% ep1(TooLowOrHigh) = zeros(size(TooLowOrHigh));

```

---

### epvh2o (AMBIENTES 1, 2 e 3)

```

function epv = epvh2o(P, T) %#codegen
%EPVH2O Specific enthalpy of steam E = EPVH2O(P,T) H(kJ/kg), as a
function
% of pressure, P(kPa), and temperature, T (°C).
%
% Source: Ernst Schmidt, 1969, Properties of water and steam in SI-
units,
% Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, R. Oldenbourg Munchen.
%
% Pressure range: 0.6 - 18000 kPa. Temperature range: 0 - 800 C.
% Max. error relative the International Skeleton Tables: 0.20 %
%
% The program uses the subprogram EQTH2O.
%
% Author : C Engman , Dept. Chem. Eng I, Lund, September 1982
% Revised: R Colschen , Dept. Chem. Eng I, Lund, August 1985
% Revised: R Colschen , Dept. Chem. Eng I, Lund, May 1987
% Revised: Stefan Törn, Dept. Chem. Eng I, Lund, March 1988
% Revised: R Colschen , Dept. Chem. Eng I, Lund, May 1990
% Converted to MATLAB by:
% Anders Gränfors, Dept, Chem, Eng. I, Lund, 8 Mars 1995
% Revised: Anders Gränfors, Dept. Chem. Eng. I, Lund, 21 December ,
1995
TSAT = eqth2o(P);
%TooLowOrHigh = find((T.*1.00010 < TSAT) | (P < 0.60)...
% | (P > 18000.0) | (T < 0.0) | (T >
800));

t1 = 0.1544878727019929D-2.*T+0.4219836242854936D0;
t2 = t1.^2;
t4 = t2.^2;

```

```

t11 = exp(0.1323657500328418D1-0.3537772284721149D-2.*T);
t15 = P.^2;
t18 = exp(0.7941945001970508D1-0.212266337083269D-1.*T);
t19 = (0.6798054997429492D1+0.212266337083269D-1.*T).*t18;
t22 = exp(0.8824383335522787D0-0.2358514856480766D-2.*T);
t26 = exp(0.4412191667761393D0-0.1179257428240383D-2.*T);
t30 = t15.*P;
t37 = t15.^2;
t44 = exp(0.6177068334865951D1-0.1650960399536536D-1.*T);
t48 = t37.*P;
t59 = exp(0.1058926000262734D2-0.283021782777692D-1.*T);
t68 = 1./(0.4006073948D0.*t44+0.23940900987136D18./t37);
t69 = t1.*t44.*t68;
t79 = exp(0.8383164168746648D1-0.2240589113656728D-1.*T);
t83 = 1./(0.8636081627D-1.*t79+0.5295727298354483D22./t48);
t84 = t1.*t79.*t83;
t92 = exp(0.2382583500591152D2-0.6367990112498069D-1.*T);
t94 = exp(0.1191291750295576D2-0.3183995056249034D-1.*T);
t100 = 1./(-0.8532322921D0.*t92+0.3460208861D0.*t94...
          +0.1171414878396012D27./t37./t15);
t101 = t1.*(-0.460745437734D2.*t92+0.93425639247D1.*t94).*t100;
t108 = -0.1787039916770122D2+0.5967497936042021D-1.*T;
t110 = 0.1324291291154024D1-0.527894635872084D-1.*T+0.1931380707D2.*t2;
t111 = 1./t110;
t113 = t108.*t111;
t145 = t37.^2;
t148 = t110.^2;
t149 = t148.^2;
t150 = t149.^2;
s1 = 0.1823801244130845D1.*T+0.2500857472660724D4-
0.3036678101852136D2...
.*t2+0.9182563265566376D2.*t2.*t1-0.180178197593935D2.*t4-0.317D-
2.*P.*...
(0.6670375918D-1.*(0.5187484164810188D1+0.1533034656712498D-1.*T)).*...
exp(0.5735849168089812D1-0.1533034656712498D-1.*T)+0.1388983801D1.*...
(0.1966342499571582D1+0.3537772284721149D-2.*T).*t11)...
-0.1433092224231465D-6.*t15.*(0.8390104328D-1.*t19+0.2614670893D-1.*...
(0.1644228333047721D1...
+0.2358514856480766D-2.*T).*t22-0.3373439453D-
1.*(0.1322114166523861D1...
+0.1179257428240383D-2.*T).*t26);
s3 = s1-0.6478717107737182D-
11.*t30.*(0.4520918904D0.*t19+0.1069036614D0...
.*(0.4221141665238607D1+0.1179257428240383D-
1.*T).*exp(0.4412191667761393D1...
-0.1179257428240383D-1.*T));
s2 = s3-0.2928895618326032D-15.*t37.*(-
0.5975336707D0.*(0.9052854163096516D1...
+0.2948143570600958D-1.*T).*exp(0.1103047916940348D2-
0.2948143570600958D-1.*T)...
-0.8847535804D-1.*(0.5509598331334049D1+0.1650960399536536D-
1.*T).*t44)...
-0.1324093860002727D-19.*t48.*(0.5958051609D0.*(0.1130765332876354D...
+0.3773623770369226D-1.*T).*exp(0.1411901333683646D2-
0.3773623770369226D-1.*T)...
-0.5159303373D0.*(0.100191966626681D2+0.3301920799073073D-1.*T)).*...
exp(0.123541366697319D2-0.3301920799073073D-1.*T)+0.2075021122D0.*...
(0.8730739996572656D1+0.283021782777692D-1.*T).*t59);
s3 = s2-0.701204D2.*(0.1190610271D0.*exp(0.5294630001313672D1...
-0.141510891388846D-1.*T)).*(0.4865369998286328D1+0.141510891388846D-
1.*...

```

```

T-0.4281157692242383D1.*t69)-0.9867174132D-
1.*exp(0.4853410834537533D1...
-0.1297183171064421D-1.*T).*(0.4543255831762467D1+0.1297183171064421D-
1.*...
T-0.4281157692242383D1.*t69)).*t68;
s4 = s3-0.701204D2.*(0.1683998803D0.*t59.*(0.8730739996572656D1+...
0.283021782777692D-1.*T-0.1252519705247871D1.*t84)-0.5809438001D-
1.*t18.*...
(0.6798054997429492D1+0.212266337083269D-1.*T-
0.1252519705247871D1.*t84)).*t83;
s5 = s4;
s7 = -0.701204D2.*(0.6552390126D-2.*t59.*(0.8730739996572656D1+...
0.283021782777692D-1.*T-0.7633333333D0.*t101)+0.5710218649D-
3.*t44.*...
(0.5509598331334049D1+0.1650960399536536D-1.*T-
0.7633333333D0.*t101)).*t100;
s8 = 0.1130337239540422D-
45.*(0.1936587558D3+0.1936587558D4.*t1.*t108.*t111...
-
0.1388522425D4.*(0.1D1+t1.*(0.1D2.*t113+0.7633333333D0)).*t26+0.4126607219D
4.*...
(0.1D1+t1.*(0.1D2.*t113+0.152666666666D1)).*t22-
0.6508211677D4.*(0.1D1+t1.*...
(0.1D2.*t113+0.228999999999D1)).*t11+0.5745984054D4.*(0.1D1+t1.*(0.1D2.*t113
...
+0.30533333332D1)).*exp(0.1764876667104557D1-0.4717029712961533D-2.*T)...
-
0.2693088365D4.*(0.1D1+t1.*(0.1D2.*t113+0.38166666665D1)).*exp(0.2206095833
880697D1...
-0.5896287141201916D-
2.*T)+0.5235718623D3.*(0.1D1+t1.*(0.1D2.*t113+0.45799999998D1)).*...
exp(0.2647315000656836D1-0.7075544569442299D-2.*T)).*t145.*t30./t150./t148;
s6 = s7+s8;
epv = s5+s6;
% epv(TooLowOrHigh) = zeros(size(TooLowOrHigh));

```

---

### eqpblq (AMBIENTES 1, 2 e 3)

```

function eqp = eqpblq( T, X) %#codegen
%
% Equilibrium pressure(kPa)for liquid black liqour as a function of
% temperature (°C) and concentration (kg water / kg solution).
%
% eqpblq takes scalars as argument and givs an argument back.
%
% Constructed by Anders Gränfors november 1997.
%
a = -1.794212795739585;
b = -0.2918880381183214;
c = 2.433040569149102;
d = -1.720704009754379;
e = 0.6476654714484422;
f = -4.072742538773348;
g = 6.56473933777589;
h = -3.844316226130731;
j = 0.1112786142523355;
[T X];
eqp=exp(a+b*T+c*T/log(T)+d*T^(0.5)+e*X^(1.5)+f*X^2+g*X^(2.5)+h*X^3+j/log((X
)));

```

---

### eqph2o (AMBIENTES 1, 2 e 3)

```
function eqp = eqph2o(T) %#codegen
%EQPH2O Saturation pressure P = EQPH2O(T) (kPa) of water at temperature
T(°C).
%
% Source: Ernst Schmidt, 1969, Properties of water and steam in SI-
units,
% Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, R. Oldenbourg Munchen.
%
% Temperature range: 0 - 374 C. Maximum relative error compared
% with the International Skeleton Tables from 1963: 0.05 %.
%
% Author : C. Engman , Dept. Chem. Eng. I, Lund, March 1981
% Revised: Rolf Colschen, Dept. Chem. Eng. I, Lund, August 1985
% Revised: Rolf Colschen, Dept. Chem. Eng. I, Lund, May 1987
% Revised: Stefan Törn , Dept. Chem. Eng. I, Lund, March 1988
% Revised: Rolf Colschen, Dept. Chem. Eng. I, Lund, May 1990
% Converted to MATLAB by:
% Anders Gränfors, Dept. Chem. Eng. I, Lund, 5 Mars , 1995
% Revised: Anders Gränfors, Dept. Chem. Eng. I, Lund, 26 July , 1995
%TooLowOrHigh = find((T < 0) | (T > 374));

t1 = 0.578016375714506410 - 0.00154487872701992894.*T;
t2 = t1 .* t1;
t4 = t2 .* t2;
t5 = 0.340866205048354704e1-0.643769090066429787e-
2.*T+0.209750676e2.*t2;
t6 = (0.154487872701992894e-2.*T+0.42198362428549359) -
t1./(0.1e10.*t2+0.6e1);
eqp = 0.2212e5.*exp((-0.444565952745342190e1+0.118820246624439982e-
1.*T...
-0.2608023696e2.*t2-0.1681706546e3.*t2.*t1+0.6423285504e2.*t4...
-0.1189646225e3.*t4.*t1)./t5./t6);
% eqp(TooLowOrHigh) = zeros(size(TooLowOrHigh));
```

---

### eqth2o (AMBIENTES 1, 2 e 3)

```
function eqt = eqth2o(P) %#codegen
%EQTH2O Saturation temperature, T = EQTH2O(P) (C°) of liquid water
at pressure P (kPa).
%
% Source: Ernst Schmidt, 1969, Properties of water and steam in SI-
units,
% Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, R. Oldenbourg Munchen.
%
% The program is an Chebyshev series approximation of the
% inverce of the subprogram EQPH2O.
%
% Pressure range: 0.61 - 22100 kPa. Maximum relative error compared
% with the International Skeleton Tables from 1963: 0.04%
%
% Author : C. Engman , Dept. Chem. Eng. I, Lund, November 1982
% Revised: R. Colschen, Dept. Chem. Eng. I, Lund, August 1985
% Revised: R. Colschen, Dept. Chem. Eng. I, Lund, May 1987
% Revised: Stefan Törn, Dept. Chem. Eng. I, Lund, March 1988
% Converted to MATLAB by:
```

```

%               Anders Gränfors Dept. Chem. Eng. I, Lund, 5 Mars 1995
%               Revised: Anders Gränfors Dept. Chem. Eng. I, Lund, 26 July 1995
%TooLowOrHigh = find((P < 0.61) | (P > 22100));

t1 = log(0.4520795660036166E-4.*P);
t2 = 0.1888400223132171.*t1+0.1E1;
t3 = t2.*t2;
t4 = t3.*t2;
t5 = t3.*t3;
t6 = t5.*t4;
t7 = t5.*t5;
t9 = t5.*t2;
t13 = t5.*t3;
t14 = +0.284512853142352E2.*t1-0.6916844869689344E1.*t7.*t13...
+0.1274756995590758E2.*t7.*t5 -0.9465572679331328E1.*t7.*t3...

+0.287775527065216E1.*t7+0.902245392406144.*t13+0.1459587761857318E2.*t5...
+0.6913856612901767E2.*t3;

eqt = 0.2532157687873905E3-0.1024333779003474E1.*t7.*t6...
-0.5888872353188045E1.*t7.*t9+0.1436069002308024E2.*t7.*t4...
-0.1259342127811501E2.*t7.* t2+0.4896246302433824E1.*t6...
+0.460292856119901E1.*t9+0.3269971037796052E2.*t4 + t14;
%   eqt(TooLowOrHigh) = zeros(size(TooLowOrHigh));

```

---

## model\_eva\_1 (AMBIENTES 1, 2 e 3)

```

%=====
===
% mdlInitializeSizes
% Return the sizes, initial conditions, and sample times for the S-
function.
function [sys,yy]=model_eva_1(t,x,u) %#codegen
% DEREVAPSYS is an unsteady-state model of a 2-stage evaporator system
%   expressed on state-space form.
%   States: M1 = x(1) = total mass in evap 1      [ton]
%           (m1 in kg (m1 = 1000*x(1)))
%           x1 = x(2) = TS composition in evap 1 [kg/kg]
%           h1 = x(3) = enthalpy in evap 1      [kJ/kg]
%           M2 = x(4) = total mass in evap 2      [ton]
%           (m2 in kg (m2 = 1000*x(4)))
%           x2 = x(5) = TS composition in evap 2 [kg/kg]
%           h2 = x(6) = enthalpy in evap 2      [kJ/kg]
%
%global q1 q2 qc p1 p2 Tc wws ww1 ww2

% rename variables
m1=1000*x(1,1); x1=x(2,1); h1=x(3,1);
m2=1000*x(4,1); x2=x(5,1); h2=x(6,1);
% rename inputs
f0in = u(1); flin = u(2);
f2in = u(3); fcin = u(4);
% rename disturbances
x0 = u(5); T0 = u(6);
Ts = u(7); Tcin = u(8);
Fs = u(9);

```



```

Ts = Ts*.66 + Fs;
k1 = 4; A1 = 2900;           % evap 1
k2 = 4; A2 = 3300;           % evap 2
kc = 5; Ac = 3000;           % cond

Cpc = 4.18; rhoc= 1000;      % cool water
fmin0 = 0; fmax0 = 0.22;     % control valve 0 (feed)
fmin1 = 0; fmax1 = 0.16;     % control valve 1
fmin2 = 0; fmax2 = 0.12;     % control valve 2
fmin3 = 0; fmax3 = 0.42;     % control valve 3 (cooling)

% feed - physical data
%      properties
rho0 = dns1blq(T0,x0);
h0 = ent1blq(T0,x0);

% evaporator 1 - physical data
%      properties in the liquor
T1 = tlblq(x1,h1);
rho1 = dns1blq(T1,x1);
V1 = m1./rho1;
%      properties in the steam
p1 = eqpblq(T1,x1);
Tc1 = eqth2o(p1);
pc1 = eqph2o(Tc1);
hs1 = epvh2o(pc1,Tc1);
hl1 = eplh2o(pc1,Tc1);
%      heat transfer
q1 = k1*A1*(Ts - T1);
pcs = eqph2o(Ts);
hs0 = epvh2o(pcs,Ts);
hl0 = eplh2o(pcs,Ts);
ws = (q1/(hs0 - hl0));%*(1+u(9))

% evaporator 2 - physical data
%      properties in the liquor
T2 = tlblq(x2,h2);
rho2 = dns1blq(T2,x2);
V2 = m2./rho2;
%      properties in the steam
p2 = eqpblq(T2,x2);
Tc2 = eqth2o(p2);
pc2 = eqph2o(Tc2);
hs2 = epvh2o(pc2,Tc2);
hl2 = eplh2o(pc2,Tc2);
%      heat transfer
q2 = k2*A2*(Tc1 - T2);
w1 = q2/(hs1 - hl1);

% Valve 1 (Feed valve)
%f0in = fm0/rho0;
%f0=Valve(f0in,fmin0,fmax0);
f0=f0in;

% Valve 2 (Outflow valve from evap 1)
%f1in = 0.0822;
%f1=Valve(f1in,fmin1,fmax1);
f1=f1in;

```

```

% Valve 3 (Outflow valve from evap 2)
%f2in = 0.0577;
%f2=Valve(f2in,fmin2,fmax2);
f2=f2in;

% Valve 4 (Cooling water valve)
%fcin = 0.2139;
%fc=Valve(fcin,fmin3,fmax3);
fc=fcin;

% condensor
%
%           heat transfer
% calculation of Tc using following relations
%
%           qc = kc*Ac*(Tc2 - Tc) = wc*(hc - hcin)
Tc = (kc*Ac*Tc2+fc*rhoc*Cpc*Tcin)/(kc*Ac+fc*rhoc*Cpc);
qc = kc*Ac*(Tc2 - Tc);
w2 = qc/(hs2 - hl2);

% evaporator 1 - mass, component (water) and energy balances
% States: M1 = x(1) = total mass in evap 1      [ton]
%           (m1 in kg (m1 = 1000*x(1)))
%           x1 = x(2) = TS composition in evap 1 [kg/kg]
%           h1 = x(3) = enthalpy in evap 1      [kJ/kg]
%           M2 = x(4) = total mass in evap 2    [ton]
%           (m2 in kg (m2 = 1000*x(4)))
%           x2 = x(5) = TS composition in evap 2 [kg/kg]
%           h2 = x(6) = enthalpy in evap 2      [kJ/kg]
dx=zeros(6,1);
dx(1,1) = (rho0*f0 - rho1*f1 - w1)/1000;          % [ton/s]
dx(2,1) = (rho0*f0*(x0 - x1) + x1*w1)/m1;        % [1/s]
dx(3,1) = (rho0*f0*(h0 - h1) - w1*(hs1 - h1) + q1)/m1; % [kJ/(kg s)]
% evaporator 2 - mass, component (water) and energy balances
dx(4,1) = (rho1*f1 - rho2*f2 - w2)/1000;
dx(5,1) = (rho1*f1*(x1 - x2) + x2*w2)/m2;
dx(6,1) = (rho1*f1*(h1 - h2) - w2*(hs2 - h2) + q2)/m2;

[Ts ws f0 f1 w1 f2 w2 ];

wws = ws;
ww1 = w1;
ww2 = w2;

sys=dx;

yy=zeros(9,1);

yy(1,1) = q1;
yy(2,1) = q2;
yy(3,1) = qc;
yy(4,1) = p1;
yy(5,1) = p2;
yy(6,1) = Tc;
yy(7,1) = ws;
yy(8,1) = w1;
yy(9,1) = w2;

%-----

```

```

function [fout]=Valve(fin,fmin,fmax)
% VALVE is a subfunction for a linear control valve
% with saturation
if fin<fmin
    f = fmin; % minimal flow (closed valve)
elseif fin>fmax
    f = fmax; % open valve
else
    f = fin; % control (inside saturation limits)
end
fout = f;

% end DerEvapsys
%
%=====
===
% mdlOutputs
% Return the block outputs.
%=====
===
%
function sys=OutEvapsys(t,x,u)

y=zeros(6,1);
y(2) = x(2); % liqour composition in evap 1
y(3) = t1blq(x(2),x(3)); % liqour temperature in evap 1
y(1) = 1000*x(1)./dnslblq(y(3),x(2)); % liqour volume in evap 1

y(5) = x(5); % liqour composition in evap 2
y(6) = t1blq(x(5),x(6)); % liqour temperature in evap 2
y(4) = 1000*x(4)./dnslblq(y(6),x(5)); % liqour volume in evap 2

sys = y;
% end OutEvapsys

```

---

## pid-alg\_ABB (AMBIENTE 1)

```

function [w,v,yLast,INew,DNew] =
pid_alg(uc,y,K,Ti,Td,h,yOld,IOld,DOld,ulow,uhigh,direta) %#codegen

%Variaveis utilizadas
%** Entrada
%--- uc          - setpoint
%--- y           - resposta do sistema
%--- K           - ganho do controlador
%--- Ti          - tempo de integracao
%--- Td          - tempo de derivacao
%--- h           - periodo de amostragem
%--- yOld        - ultimo valor da resposta do sistema
%--- IOld        - ultimo valor da parte integral
%--- DOld        - ultimo valor da parte derivativa

%** Saida
%--- w           - saída do controlador PID limitada
%--- v           - saída do controlador PID
%--- INew        - ultimo valor da parte integral
%--- DNew        - ultimo valor da parte derivativa

```

```

%** Calculo
%--- Tt      - tempo de 'tracking'
%--- N       - máximo ganho derivativo
%--- ulow    - limite de saída inferior
%--- uhigh   - limite de saída superior

%Variaveis de calculo
Tt = .5 * Ti;
N = 1000;

if direta == 1
    erro = uc-y;
else
    erro = y-uc;
end;

%Calculo da parte proporcional
P = erro;

%Atualiza os dados referentes a parte integral
INew = IOld + erro;

%Calculo da parte derivativa
DNew = (Td/(Td + N*h))*DOld - K*N*(Td/(Td + N*h))*(y - yOld);

%Calculo do sinal de controle
v = K*(P + INew/Ti);

%Gerencia as limitacoes do atuador
if (v < ulow)
    w = ulow;
elseif (v > uhigh)
    w = uhigh;
else
    w = v;
end

yLast = y;

```

---

## eva (AMBIENTE 2)

```

function [V1,V2,Tc,x1,x2,T1,T2,q1,q2,qc,p1,p2,ws,w1,w2,x01, T01,Ts1,Th2o1]
= ...
    eva (f0,f1,f2,fc,fs,x0,T0,Ts,Th2o,tempo)

[f0 f1 f2 fc fs x0 T0]

persistent estado x

if isempty(estado)
    estado = 0;
    x = [5; 0.2507; 312.8; 5; 0.3400; 274.1]; % regime estacionário
x1 = .2; % liqour composition in evap 1
T1 = 60; % liqour temperature in evap 1
V1 = 5; % liqour volume in evap 1

x2 = 0.3; % liqour composition in evap 2

```

```

T2 = 60; % liqour temperature in evap 2
V2 = 5; % liqour volume in evap 2

q1=0.0;
q2=0.0;
qc=0.0;
p1=0.0;
p2=0.0;
Tc=0.0;
ws=0.0;
w1=0.0;
w2=0.0;
x01= x0;
T01= T0;
Ts1 = Ts;
Th2o1 = Th2o;

else
t = 1;
Temp_int = 0.01;
%x = [V1; x1; T1; V2; x2; T2];
[sys,yy]=model_eva_1(t,x,[f0 f1 f2 fc x0 T0 Ts Th2o fs]);
for aaa=1:1:100
x = x + Temp_int*sys;
end

x1 = x(2); % liqour composition in evap 1
T1 = t1blq(x(2),x(3)); % liqour temperature in evap 1
V1 = 1000*x(1)./dns1blq(T1,x(2)); % liqour volume in evap 1

x2 = x(5); % liqour composition in evap 2
T2 = t1blq(x(5),x(6)); % liqour temperature in evap 2
V2 = 1000*x(4)./dns1blq(T2,x(5)); % liqour volume in evap 2
q1=yy(1,1);
q2=yy(2,1);
qc=yy(3,1);
p1=yy(4,1);
p2=yy(5,1);
Tc=yy(6,1);
ws=yy(7,1);
w1=yy(8,1);
w2=yy(9,1);
x01= x0;
T01= T0;
Ts1 = Ts;
Th2o1 = Th2o;
End

```

---

### read\_MD Modbus (AMBIENTE 3)

```

function [f0,f1,f2,fc,fs] = ...
read_MD (aaaa1,aaaa2,aaaa3,aaaa4,aaaa5,inicia)

if inicia == -1
f0= aaaa1/16/1000;
f1 = aaaa2/16/1000;
f2 = aaaa3/16/1000;
fc = aaaa4/16/1000;
fs = aaaa5/16/10;

```

```

else
    f0 = 0.11;
    f1 = 0.0822;
    f2 = 0.0577;
    fc = 0.2139;
    fs = 5;
end

```

---

### read\_MD FOUNDATION FIELD BUS (AMBIENTE 3)

```

function [x0,T0,Ts,Th20] = ...
    read_MD (aaa1,aaa2,aaa3,aaa4,inicia)

if inicia == -1
    x0 = aaa1/100;
    T0 = aaa2;
    Ts = aaa3;
    Th20 = aaa4;
else
    x0 = 0.2;
    T0 = 90;
    Ts = 90;
    Th20 = 15;
end

```

---

### eva (AMBIENTE 3)

```

function [V1,V2,Tc,x1,x2,T1,T2,q1,q2,qc,p1,p2,ws,w1,w2,x01, T01,Ts1,Th2o1]
= ...
    eva (f0,f1,f2,fc,fs,x0,T0,Ts,Th2o,tempo)

[f0 f1 f2 fc fs x0 T0]

persistent estado x

if isempty(estado)
    estado = 0;
    x = [5; 0.2507; 312.8; 5; 0.3400; 274.1]; % regime estacionário
x1 = .2; % liqour composition in evap 1
T1 = 60; % liqour temperature in evap 1
V1 = 5; % liqour volume in evap 1

x2 = 0.3; % liqour composition in evap 2
T2 = 60; % liqour temperature in evap 2
V2 = 5; % liqour volume in evap 2

q1=0.0;
q2=0.0;
qc=0.0;
p1=0.0;
p2=0.0;
Tc=0.0;
ws=0.0;
w1=0.0;
w2=0.0;

```

```

x01= x0;
T01= T0;
Ts1 = Ts;
Th2o1 = Th2o;

else
    t = 1;
    Temp_int = 0.01;
    %x = [V1; x1; T1; V2; x2; T2];
    [sys,yy]=model_eva_1(t,x,[f0 f1 f2 fc x0 T0 Ts Th2o fs]);
    for aaa=1:1:100
        x = x + Temp_int*sys;
    end

    x1 = x(2); % liquor composition in evap 1
    T1 = t1blq(x(2),x(3)); % liquor temperature in evap 1
    V1 = 1000*x(1)./dnslblq(T1,x(2)); % liquor volume in evap 1

    x2 = x(5); % liquor composition in evap 2
    T2 = t1blq(x(5),x(6)); % liquor temperature in evap 2
    V2 = 1000*x(4)./dnslblq(T2,x(5)); % liquor volume in evap 2

    q1=yy(1,1);
    q2=yy(2,1);
    qc=yy(3,1);
    p1=yy(4,1);
    p2=yy(5,1);
    Tc=yy(6,1);
    ws=yy(7,1);
    w1=yy(8,1);
    w2=yy(9,1);
    x01= x0;
    T01= T0;
    Ts1 = Ts;
    Th2o1 = Th2o;
end

V1=V1*100;
V2=V2*100;
Tc=Tc;
x1=x1*1000;
x2=x2*1000;

```

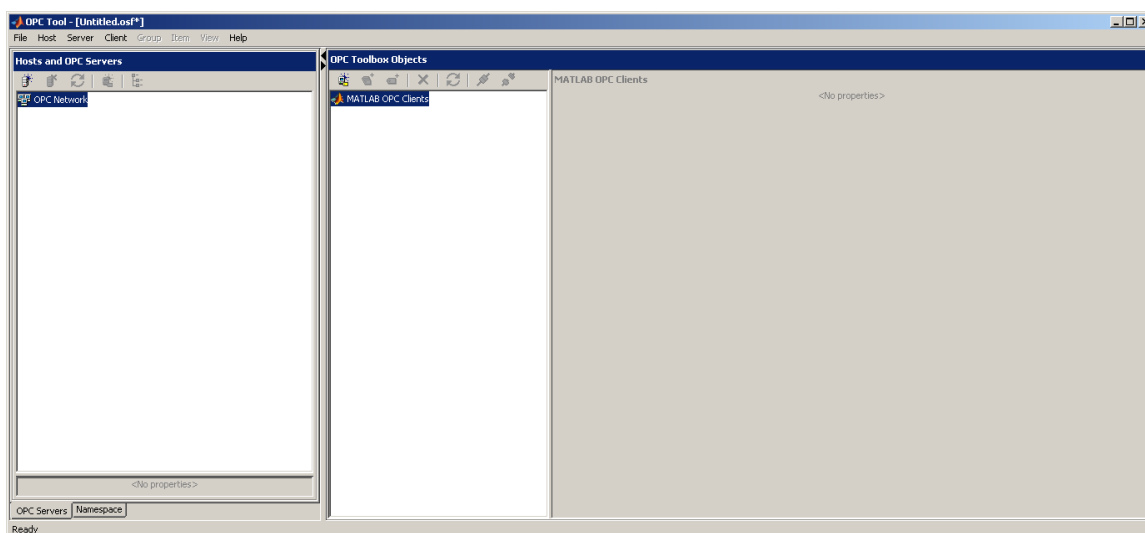
---

## **APÊNDICE B**

Teste dos servidores OPC

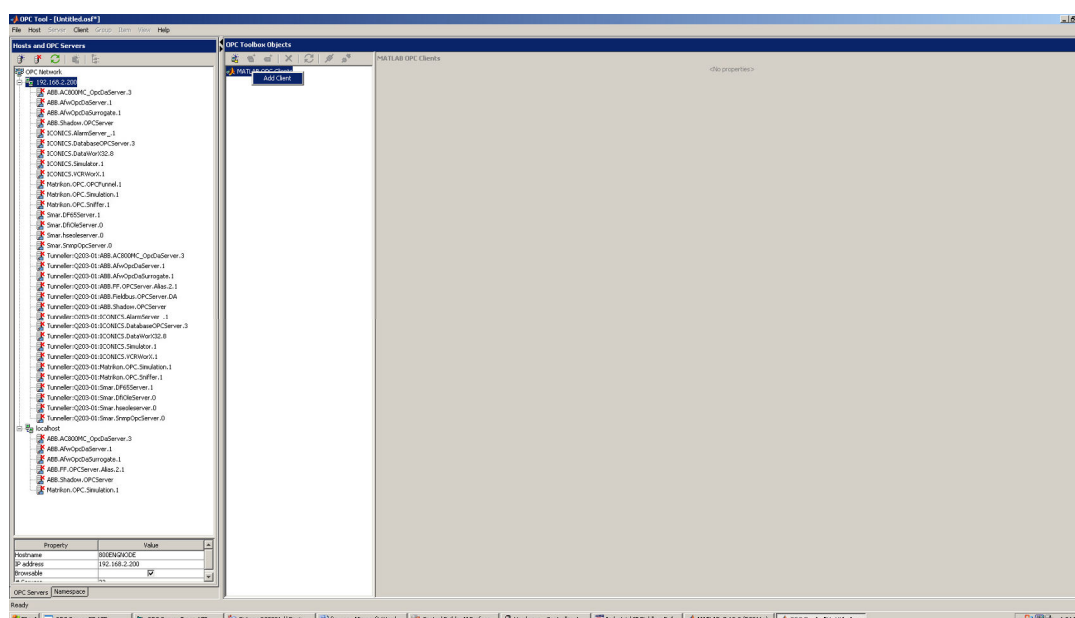


Para testar o funcionamento dos servidores OPC utilizados neste trabalho, fez-se uso da ferramenta OPCTool do programa MATLAB (FIGURA 48).



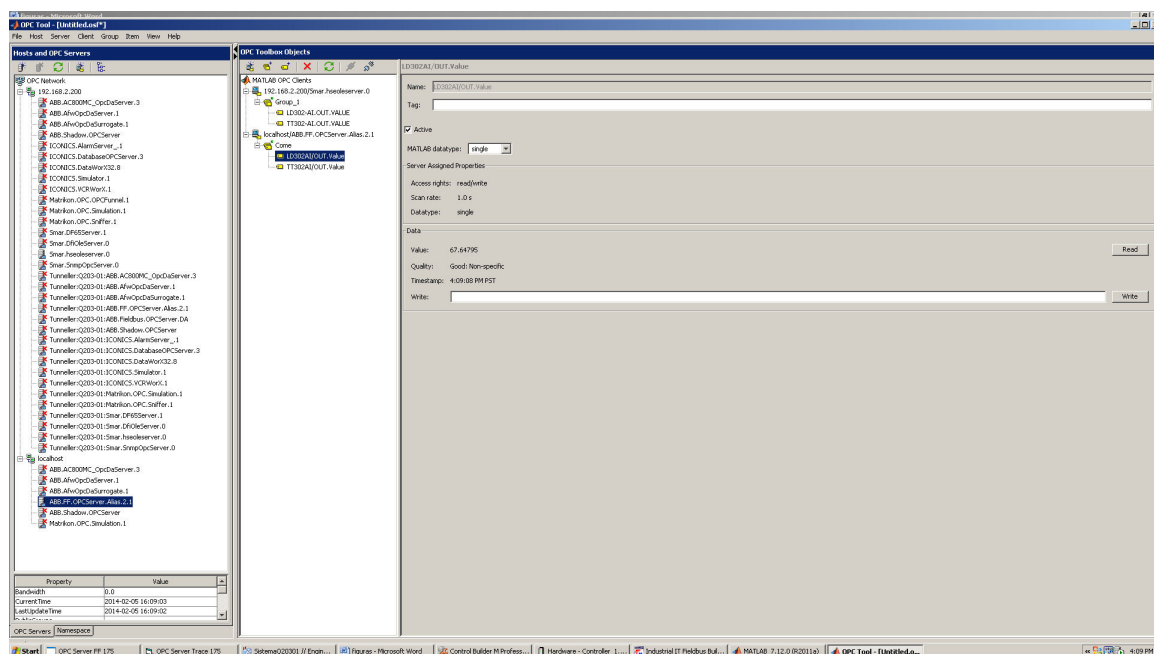
**Figura 48- OPCTool**  
Fonte: Autoria própria

Através dessa ferramenta é possível visualizar os OPCs *server*s localizados na rede e fazer a conexão com os *clientes* OPCs (Figura 49).



**Figura 49- Conexão de cliente OPC**  
Fonte: Autoria própria

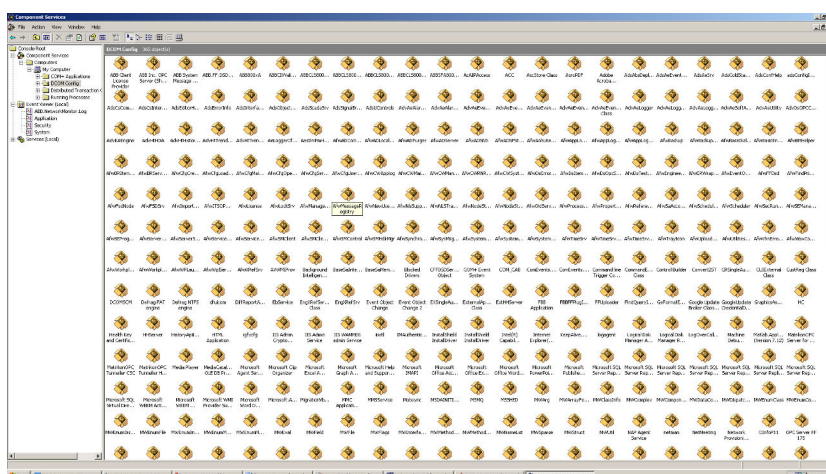
Abaixo de cada cliente OPC, pode-se adicionar as variáveis que serão utilizadas e monitorar sua leitura na parte direita da tela (Figura 50)



**Figura 50-Leitura das variáveis via OPCTool**

Fonte: Autoria própria

Para que seja possível a visualização dos servidores e clientes OPC, é preciso que antes seja feita todas configurações necessárias na DCOM dos computadores (Figura 51).



**Figura 51- Configuração da DCOM**

Fonte: Autoria própria

Mais informações da sobre configuração da DCOM podem ser encontradas no site da MARIKON OPC.

## **APÊNDICE C**

Configuração e Parametrização Rede Foundation Fieldbus

Neste trabalho foram utilizados os *softwares* Fieldbus Builder (fabricante ABB) e o *software* Syscon (fabricante SMAR) para configuração e parametrização de dois transmissores de pressão (LD302) e dois transmissores de temperatura (TT302) pertencentes a rede Foundation Fieldbus.

## FIELDBUS BUILDER

Foram realizadas as seguintes etapas, pra configuração de rede Foundation Fieldbus através do Fieldbus Builder:

### 1- Configuração do servidor OPC (Figura 52)

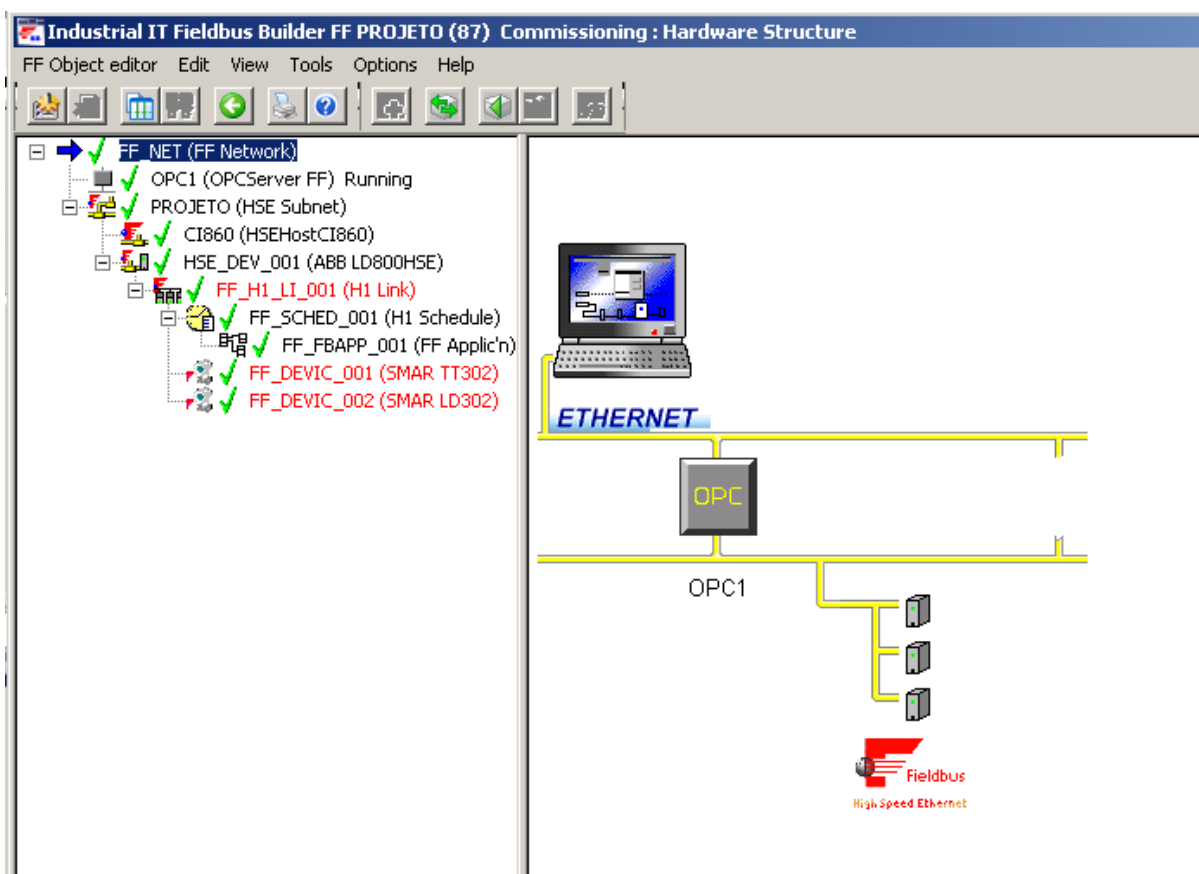
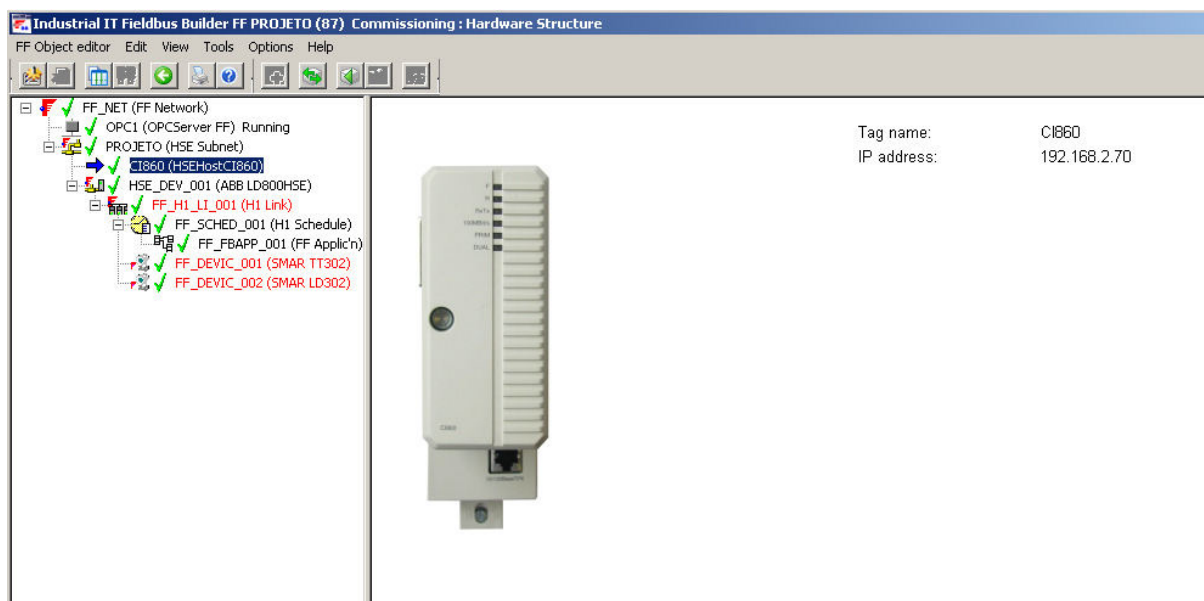


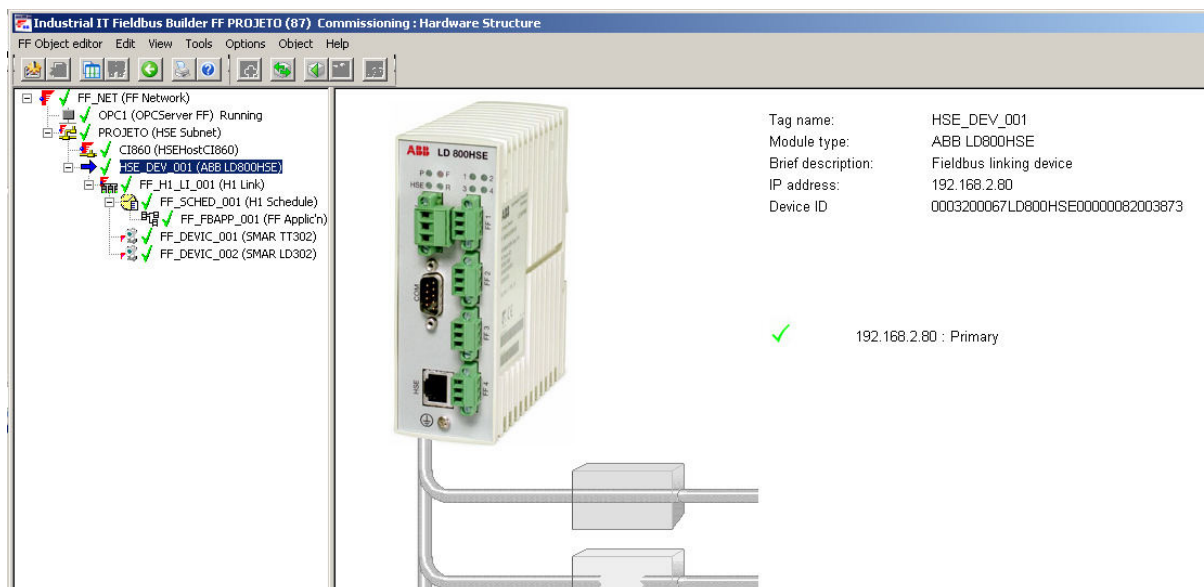
Figura 52- Configuração do servidor – Fieldbus Builder  
Fonte: Autoria própria

### 2- Inserção da Expansão CI860 no sistema, para utilização da subrede HSE (Figura 53)



**Figura 53-Expansão CI860 Foundation Fieldbus**  
**Fonte: Autoria própria**

3- Inserção da LD800HSE na rede Foundation Fieldbus, para ligação da subrede H1 no sistema (Figura 54)



**Figura 54-Link Device LD800HSE ABB**  
**Fonte: Autoria própria**

A Figura 55 mostra a programação da rede Foundation Fieldbus

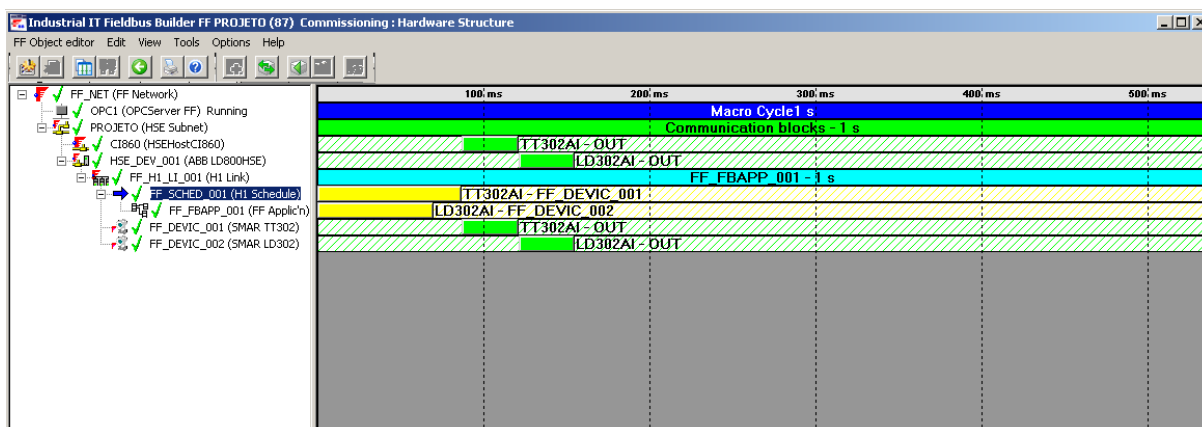


Figura 55- Programação da rede Foundation Fieldbus  
Fonte: Autoria própria

#### 4- Programação utilizando lógica de blocos (Figura 56)

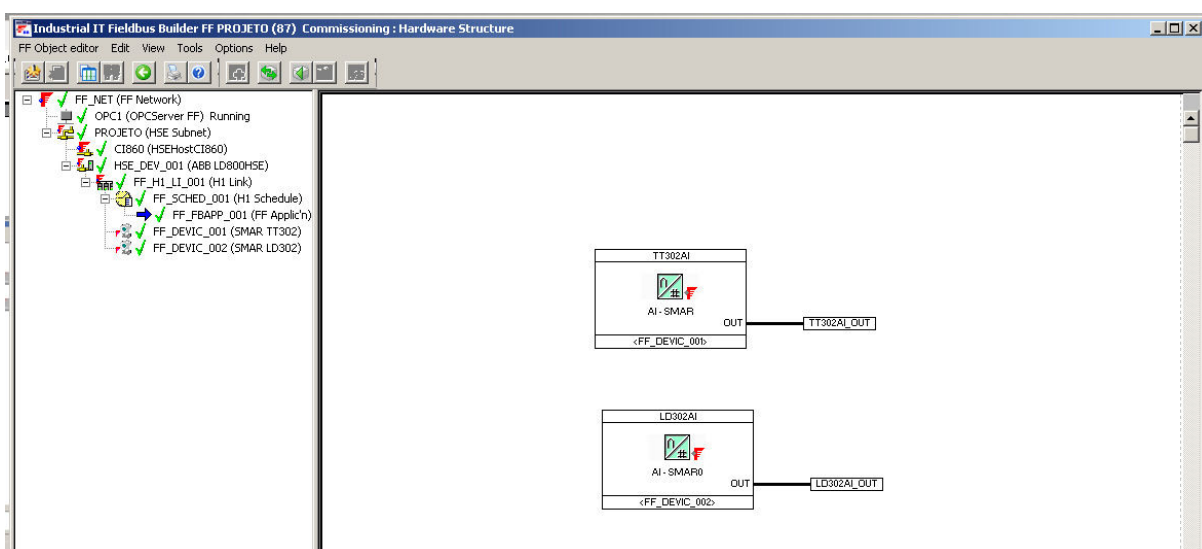


Figura 56-Lógica de Blocos  
Fonte: Autoria própria

#### 5- Configuração e parametrização dos transmissores inteligentes (Figura 57 e 58).

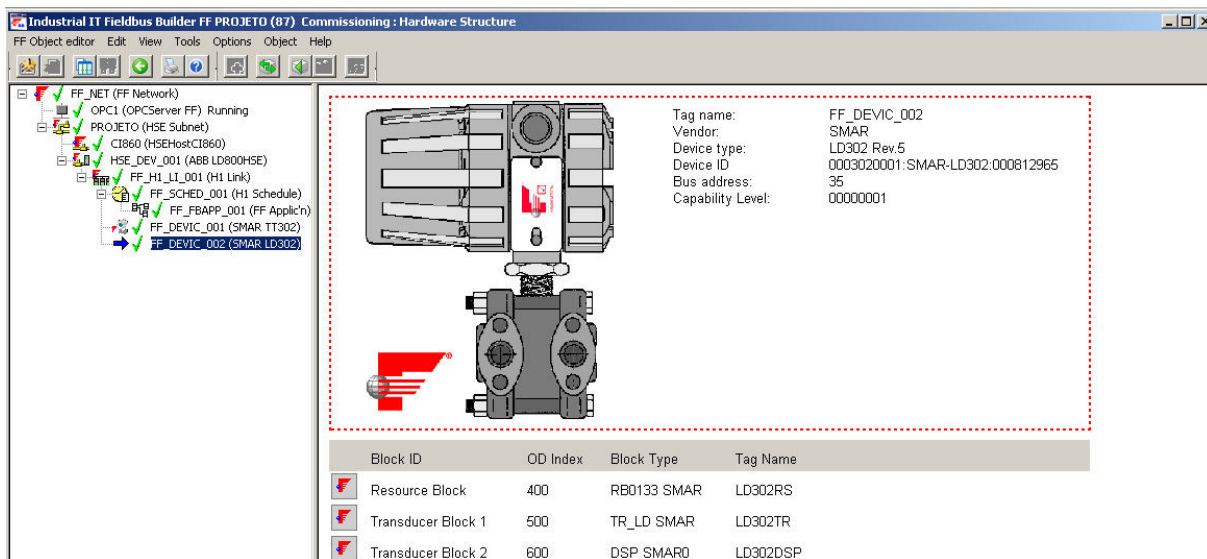


Figura 57- Transmissor TT302  
 Fonte: Autoria própria

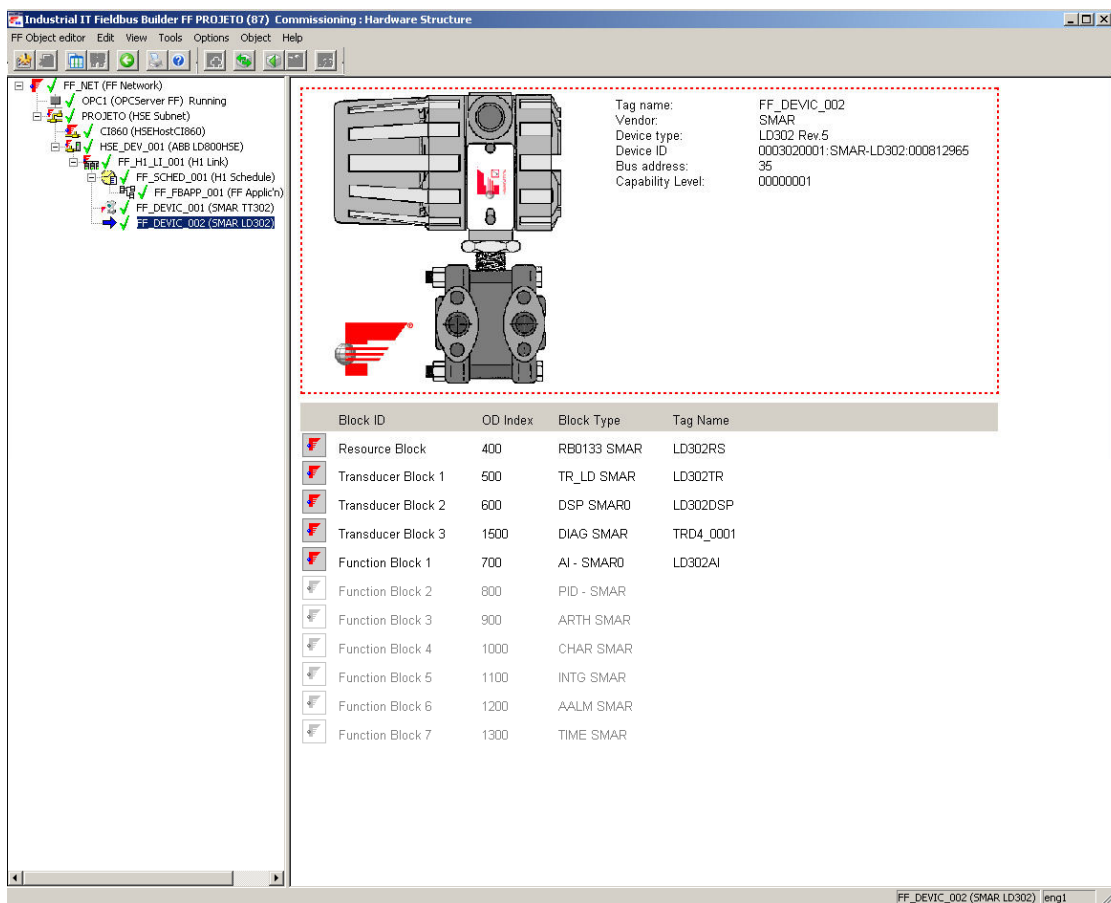


Figura 58-Transmissor LD302  
 Fonte: Autoria própria

## 6- Parametrização dos blocos de recurso, transdutores e funções (Figura 59)

Tag name: FF\_DEVIC\_001  
Vendor: SMAR  
Device type: TT302 Rev.5  
Device ID: 0003020002:SMAR-TT302:004811169  
Bus address: 36

Parameters: AI - SMAR (Current values)

General data  
Name: TT302AI  
Short text:  
Long text:

Relative	Name	Value	Unit	Do	Up	Type	Range	Class	Comment
6.16	OutOfService					Bool		DYN CONT	
7	PV					Record		DYN CONT	
7.1	Status	Good	NonCasc			Enumerated1		DYN CONT	
7.2	.Value	35.71169	Ohm			Float(4 octets)		DYN CONT	
8	OUT					Record		DYN CONT	
8.1	Status	Good	NonCasc			Enumerated1		OUT	
8.2	.Value	35.71169	Ohm			Float(4 octets)		OUT	
9	SIMULATE					Record		DYN CONT	
9.1	.Simulate Status	Good	NonCasc			Enumerated1		DYN CONT	
9.2	.Simulate Value	35.71169	Ohm			Float(4 octets)		DYN CONT	
9.3	.Transducer Status	Good	NonCasc			Enumerated1		DYN CONT	
9.4	.Transducer Value	35.71169	Ohm			Float(4 octets)		DYN CONT	
9.5	.Simulate Fr/Fix	Disabled				Enumerated1		DYN CONT	
10	VD_SCALE					Record		DYN CONT	
10.1	.EU at 100%	200.0	Ohm			Float(4 octets)		CONT	
10.2	.EU at 0%	0.0	Ohm			Float(4 octets)		CONT	
10.3	.Units Index	0	Ohm			Enumerated2		CONT	
10.4	Decimal	2				Integer(1 octet)		CONT	
11	OUT_SCALE					Record		DYN CONT	
11.1	.EU at 100%	200.0	Ohm			Float(4 octets)		CONT	
11.2	.EU at 0%	0.0	Ohm			Float(4 octets)		CONT	
11.3	.Units Index	0	Ohm			Enumerated2		CONT	
11.4	Decimal	2				Integer(1 octet)		CONT	
12	GRANT_DENY					Record		DYN CONT	
12.1	Grant					Bit Framework		DYN CONT	

Close Cancel Correct Current values Config. values Help

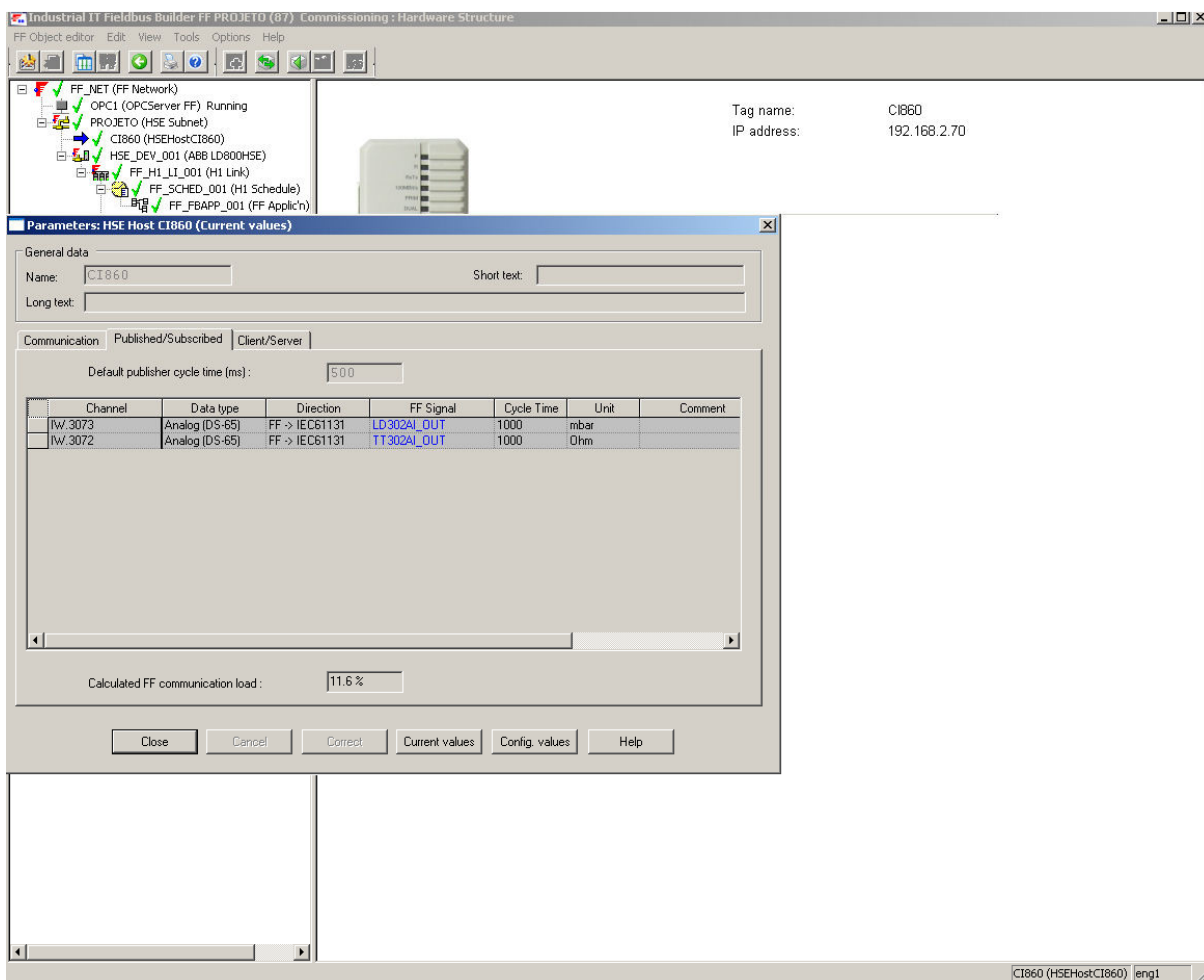
Function Block 7	1400	AALM SMAR	Out of Service (O/S)
Function Block 8	1500	ISEL SMAR	Out of Service (O/S)
Function Block 9	1600	SPG SMAR	Out of Service (O/S)

FF\_DEVIC\_001 (SMAR TT302) | eng1

**Figura 59-Parametrização Transmissores**  
**Fonte: Autoria própria**

## 7- Configuração CI860-HSE (Figuras 60)





**Figura 60-Configuração HSE**  
**Fonte: Autoria própria**

8- Leitura de dados dos transmissores (Figura 61 e 62)

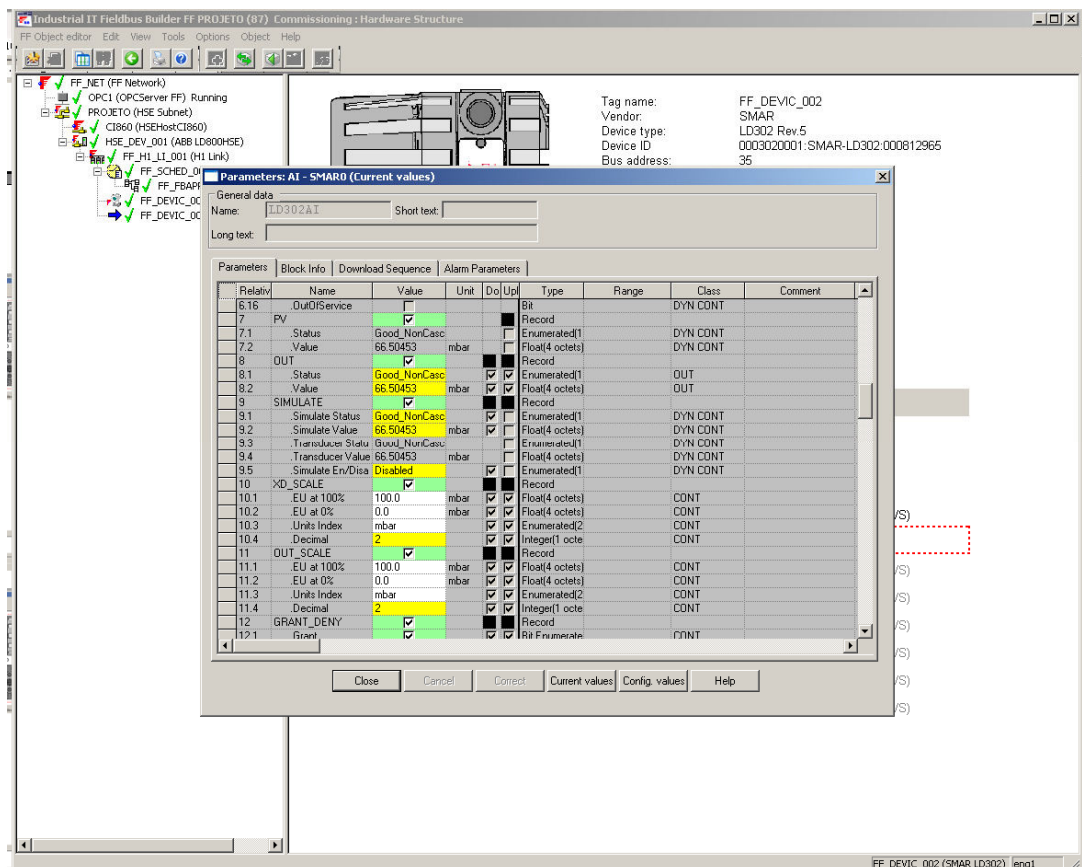


Figura 61- Leitura de dados do Transmissor LD302  
 Fonte: Autoria própria

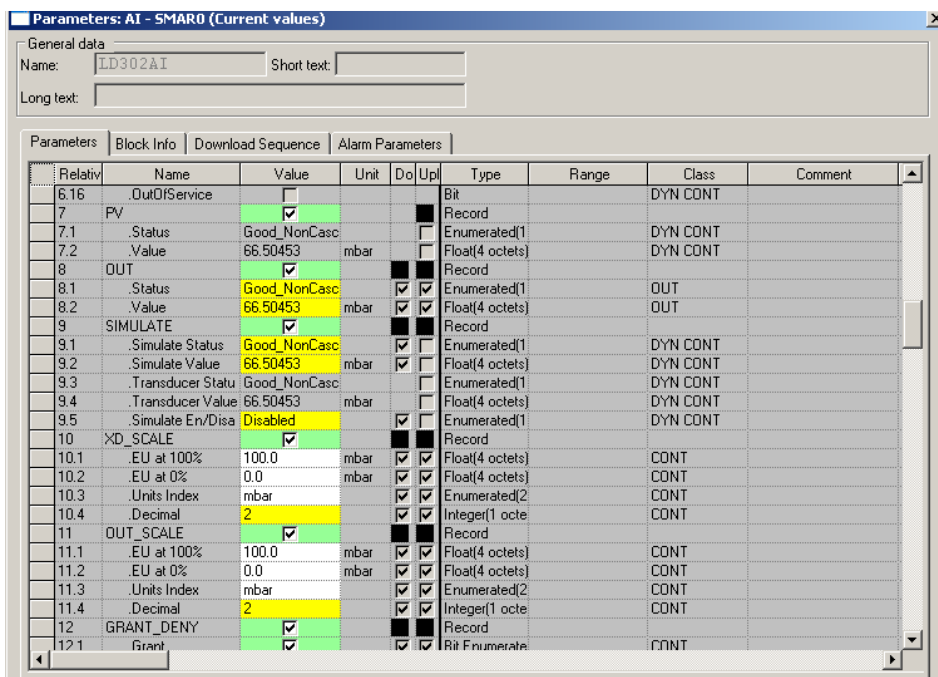
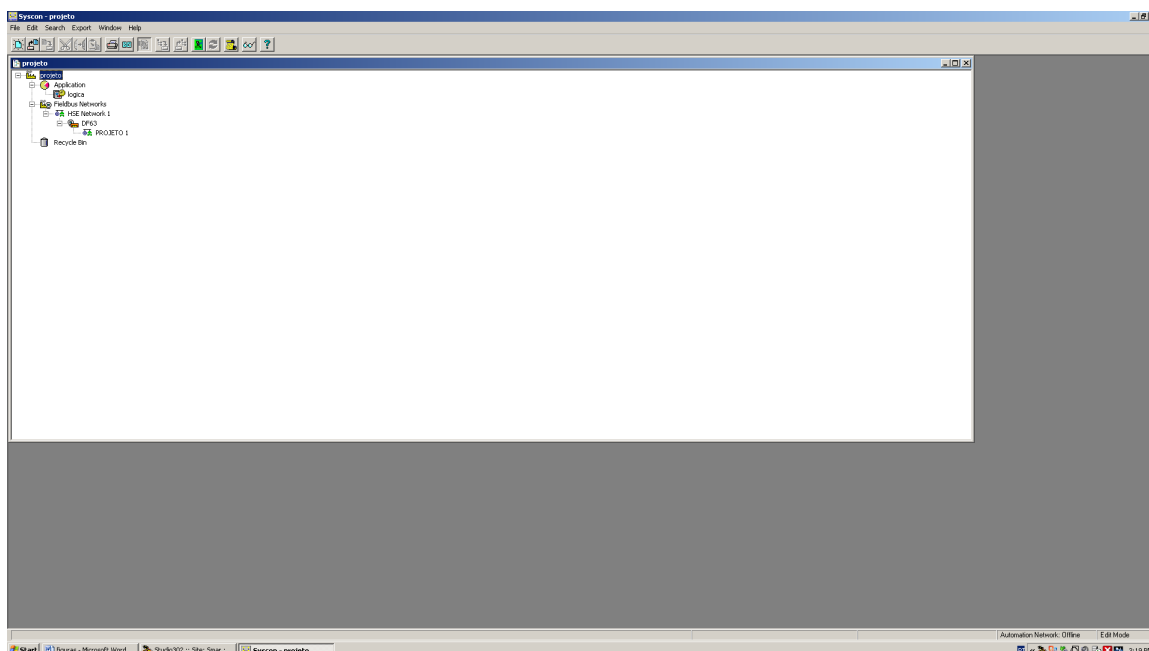


Figura 62- Leitura de dados do Transmissor TT302  
 Fonte: Autoria própria.

## Syscon (SMAR)

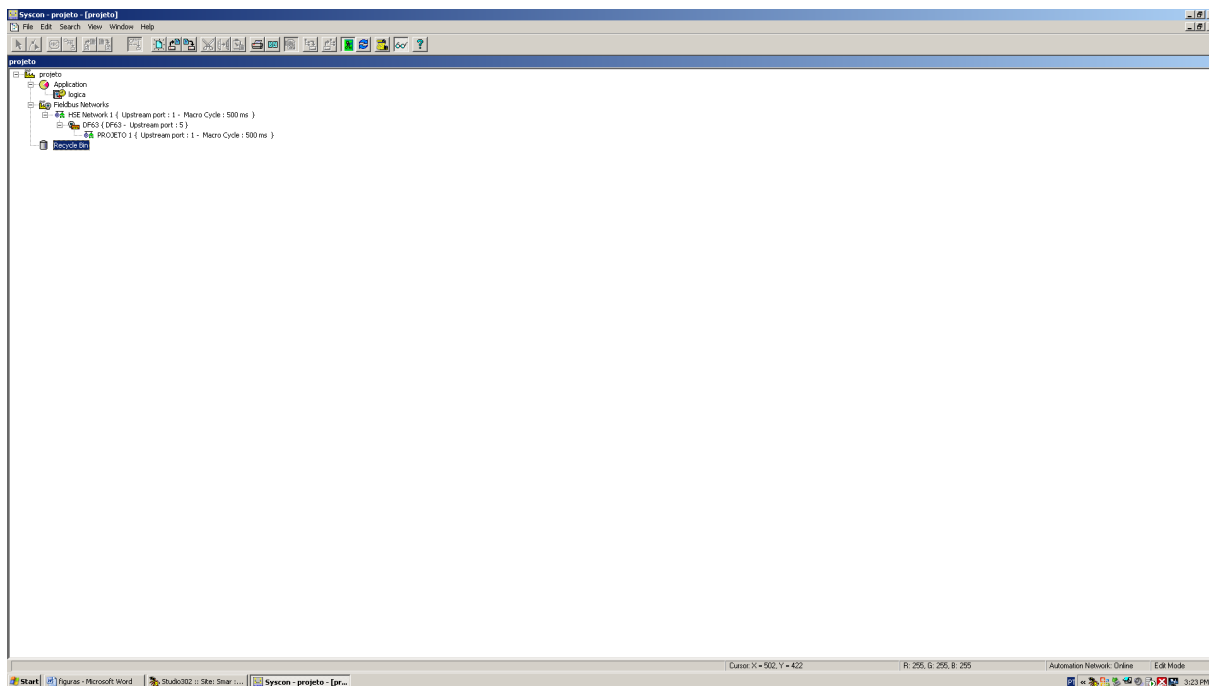
Foram realizadas as seguintes etapas, pra configuração de rede Foundation Fieldbus através do Syscon.

### 1. Criação do Projeto (Figura 63)



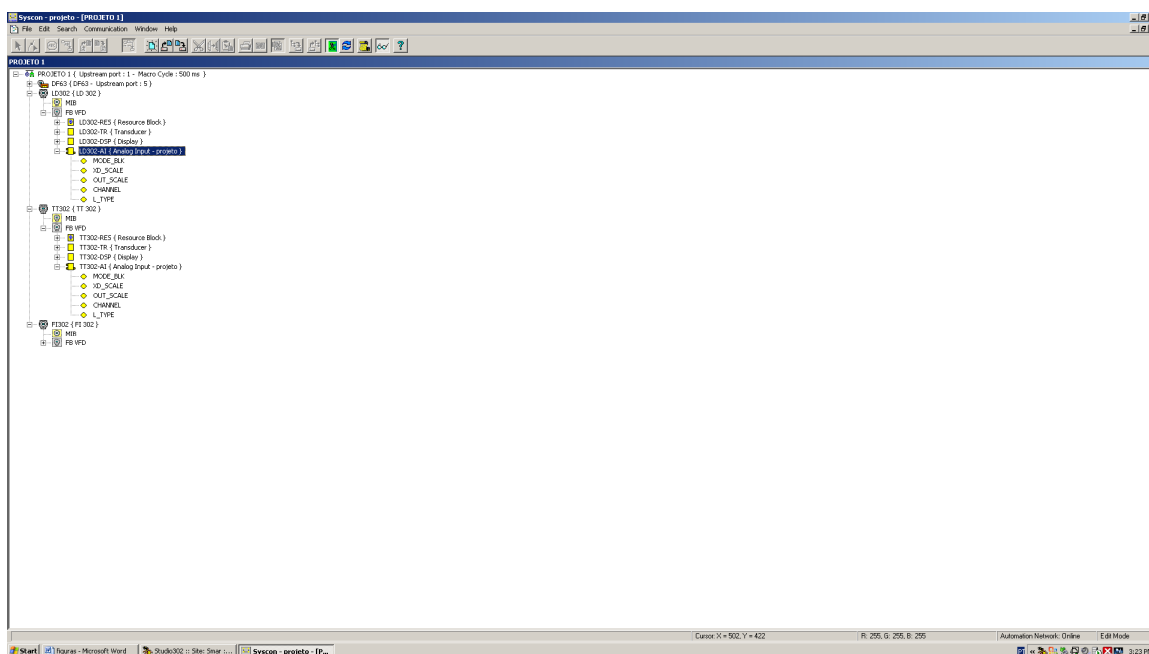
**Figura 63- Criação do Projeto - Syscon**  
**Fonte: Autoria própria**

### 2. Configuração das redes HSE e H1 (Figura 64)



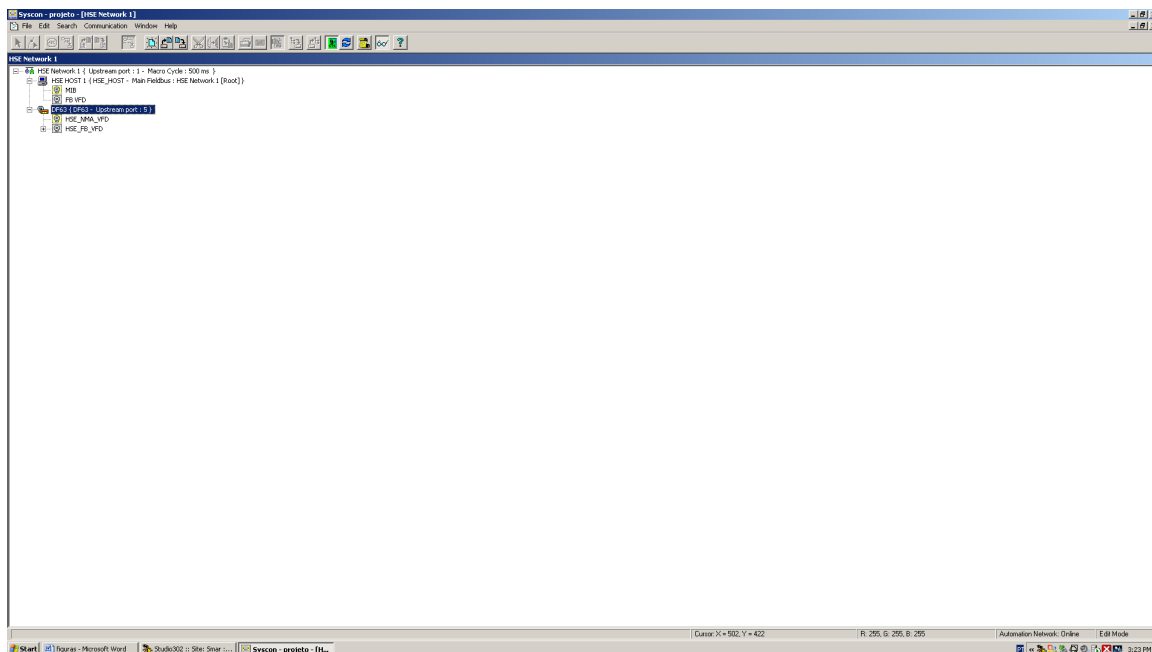
**Figura 64- Configuração redes HSE e H1**  
**Fonte: Autoria própria**

### 3. Parametrização e Configuração Blocos de Recursos, Transdutores e Funções (Figura 65).



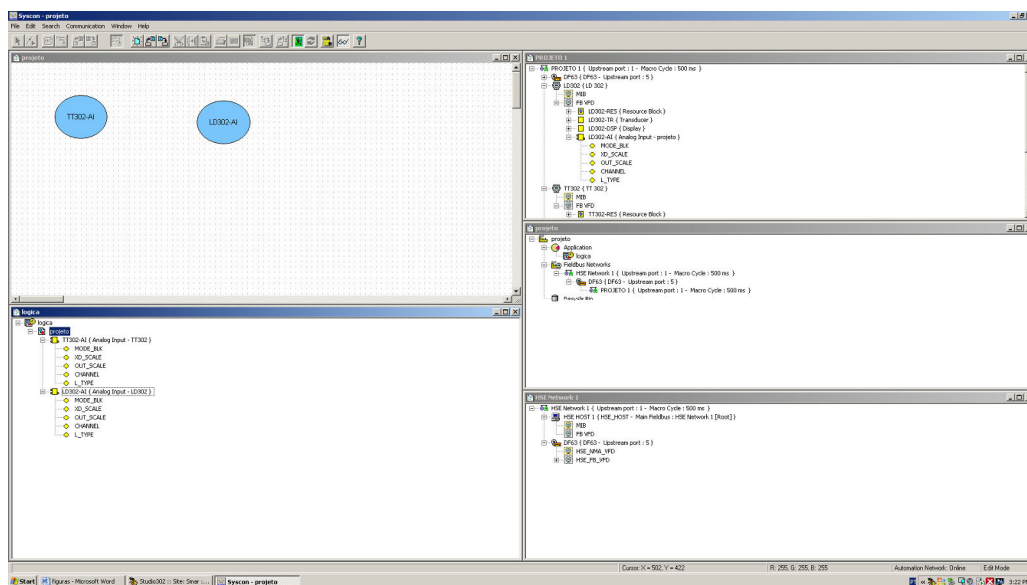
**Figura 65- Parametrização dos Blocos de Recursos, Transdutores e Funções**  
**Fonte: Autoria própria**

### 4. Configuração do *Host* (Figura 66)



**Figura 66- Configurações do Host**  
**Fonte: Autoria própria**

5. Visão Geral do Projeto criado no programa Syscon (Figura 67). No primeiro campo é mostrado os Blocos de Funções utilizados no sistema.



**Figura 67- Visão geral do projeto criado**  
**Fonte: Autoria própria**

## **APÊNDICE D**

### Configuração e Parametrização Modbus

## MÓDULO MODBUS

- ADAM 4024: saídas analógicas, cada módulo possui 4 saídas;
- ADAM 4019: entradas analógicas cada módulo possui 8 entradas.
- ADAM 4520 conversor R232/RS482 (1 utilizado pelo MATLAB e 1 utilizado pelo CLP)

As configurações dos módulos podem ser feitas ou pelo *software* da advantech ou pelo próprio MATLAB, neste trabalho foi utilizado o *software* da advantech, onde os módulos foram configurados com seus respectivos endereços, sinais de entradas e saídas e modo de transmissão RUT

Para mudar o endereço deve-se desligar o módulo e colocar a chave lateral na opção init, faz alteração do endereço e demais configurações, logo após, desliga-se o módulo e coloca no modo normal e liga o equipamento novamente.

O 4051 é o único que não possui a chave lateral, para fazer as modificações é necessário desligar e curto-circuitar as saídas init com terra, fazer alterações e desligar tirar curto circuito e ligar novamente o módulo.

O 4520 conversor não precisa fazer nenhuma alteração.

As entradas e saídas foram configuradas da seguinte forma:

- Saída analógica: +-10v, 16 bits (0 a 65535)
- Entradas analógicas: +-10v, 12 bits (0 a 4095)

A Comunicação da rede Modbus com o PC (MATLAB) com o CLP 800M ABB, foi realizada utilizando-se conversores RS232 e a para a comunicação entre os módulos foi utilizado o meio físico RS 485.

As Figuras 68 a 73 representam as configurações realizadas no Control Builder para leitura dos módulos Modbus.

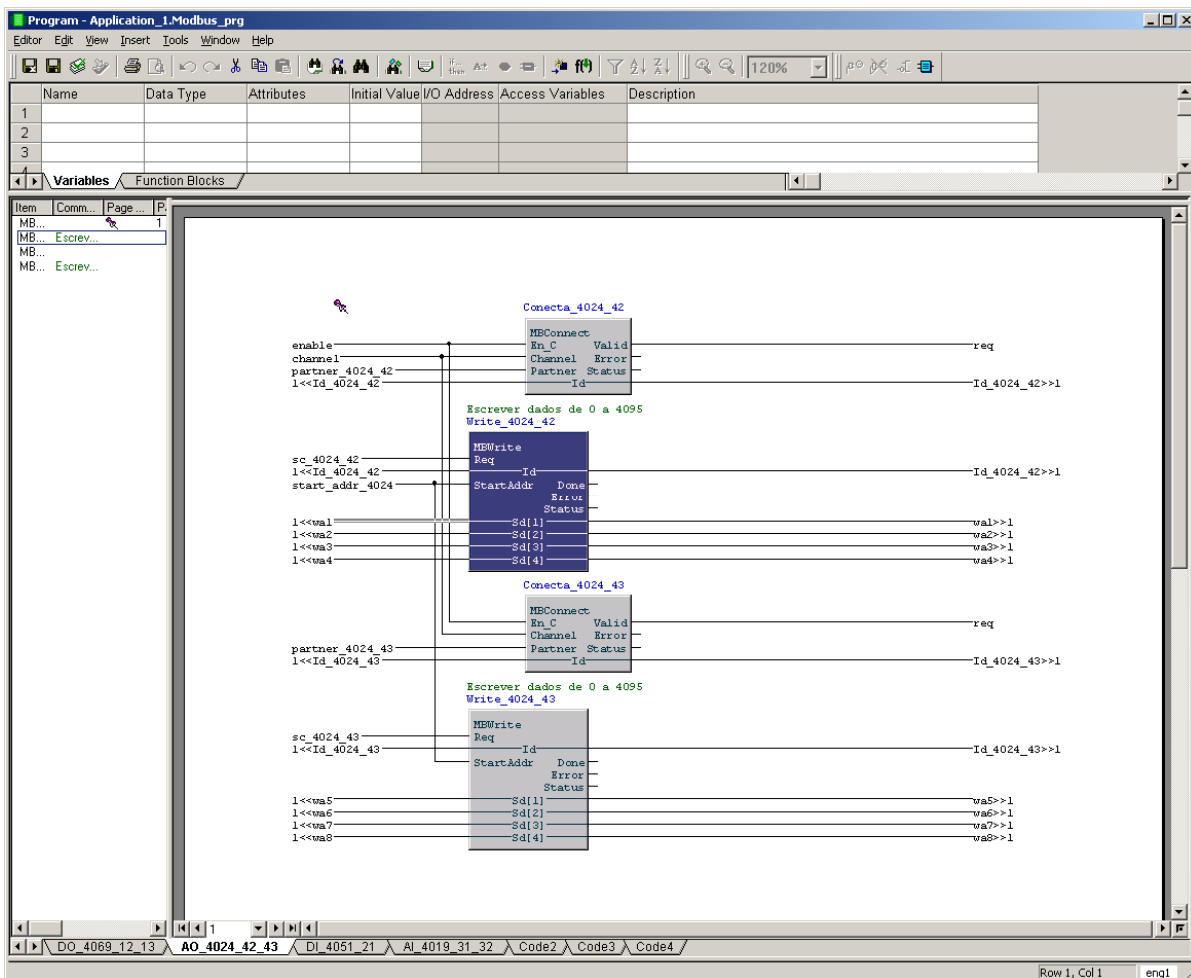


Figura 68- Configuração módulo 4024  
 Fonte: Autoria própria



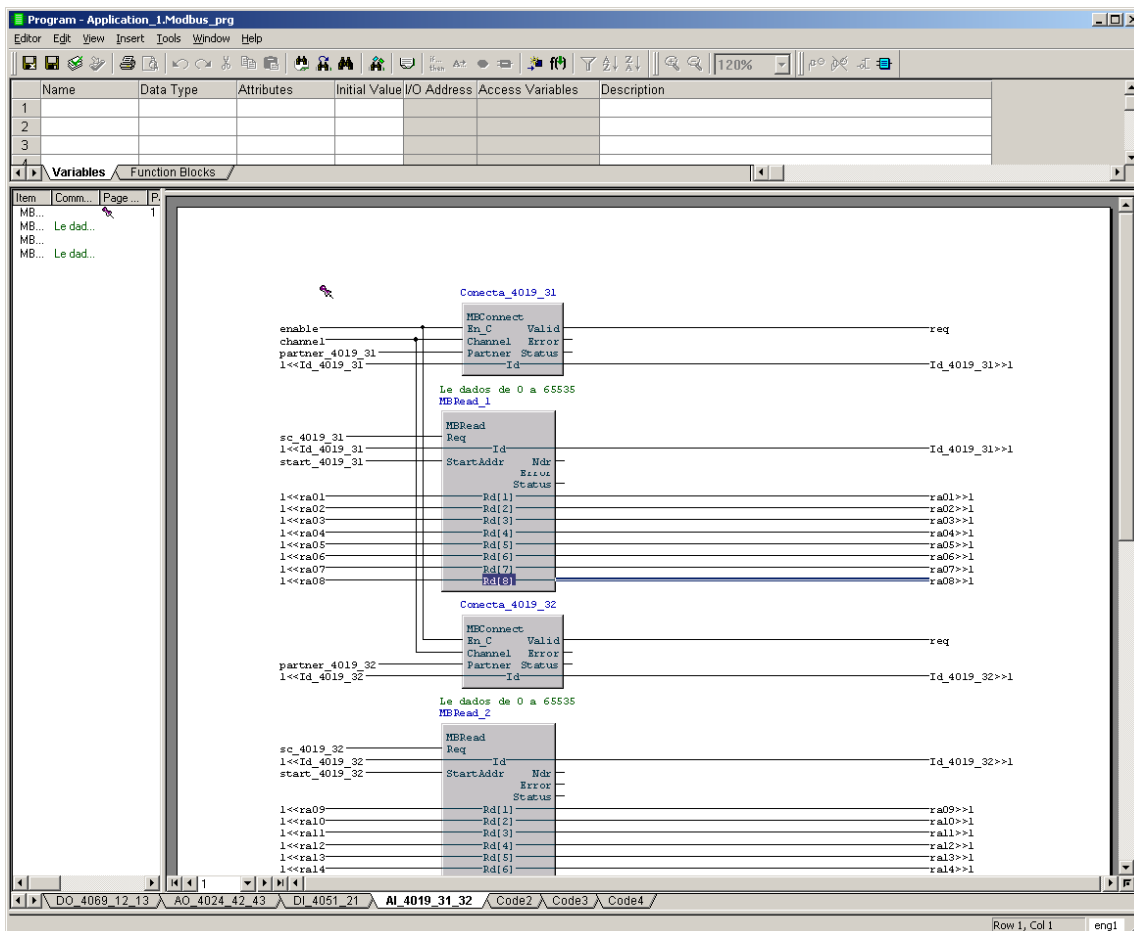
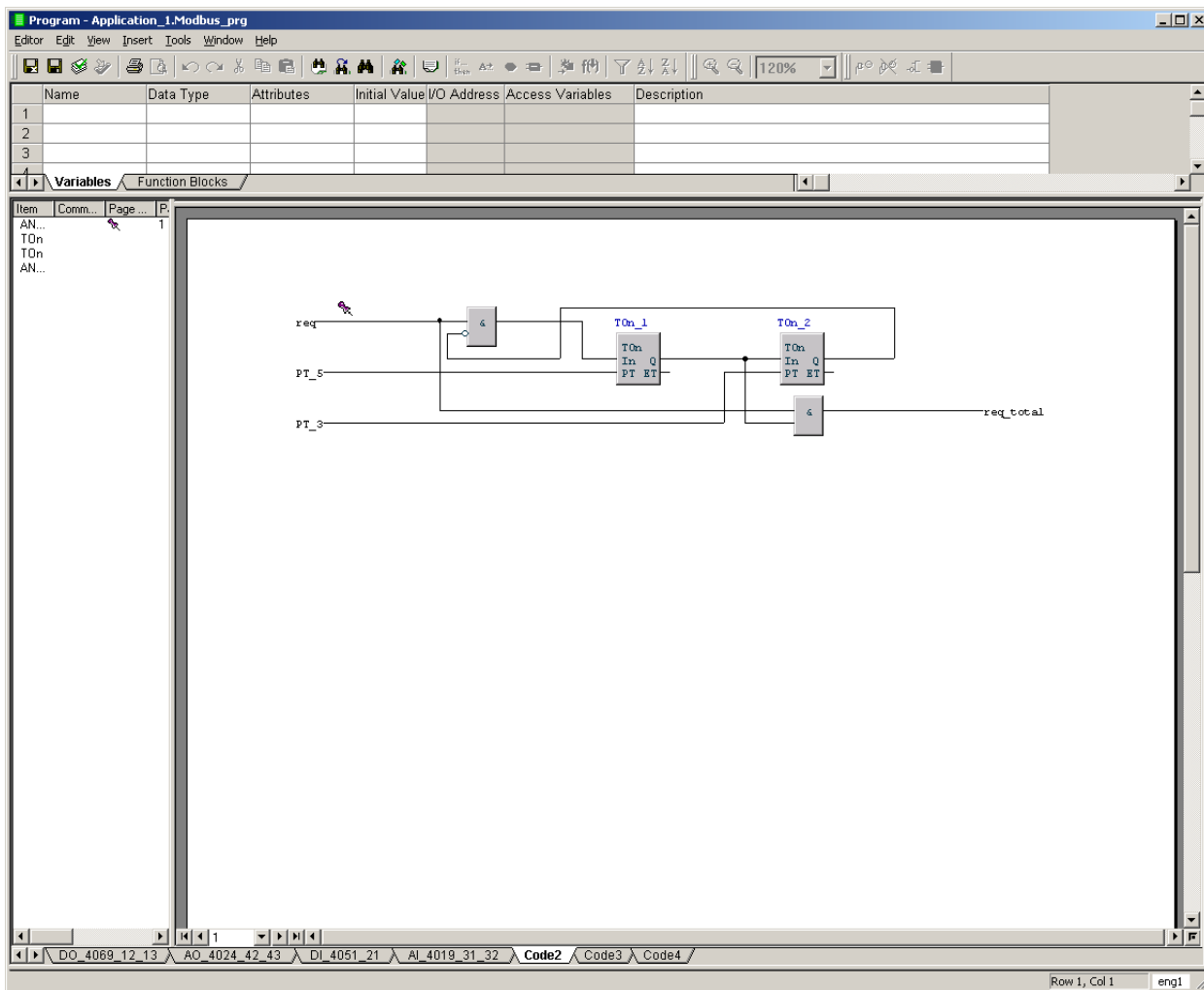


Figura 69-Configuração módulo 4019  
 Fonte: Autoria própria



**Figura 70-Configuração programação Modbus**  
**Fonte: Autoria própria**

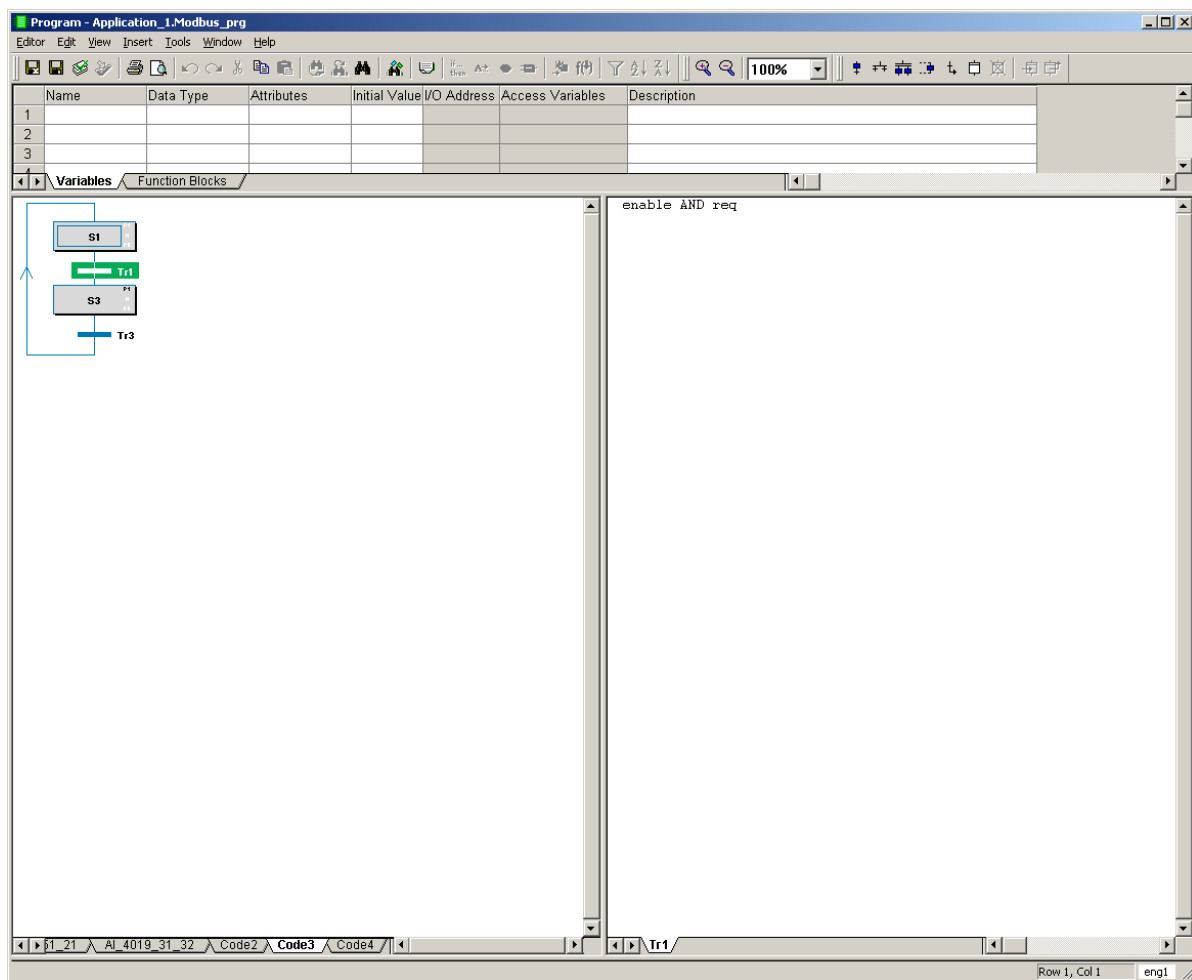


Figura 71- Configuração *enable* e *req*  
Fonte: Autoria própria

Program - Application\_1.Modbus\_prg

Editor Edit View Insert Tools Window Help

100%

Name	Data Type	Attributes	Initial Value	I/O Address	Access Variables	Description
1						
2						
3						

Variables Function Blocks

```

if (* entrada digital endereço 21 *)
  sc_4051_21 = true then
    sc_4051_21 := false;

  (* saída digital endereço 12 *)
  sc_4069_12 := true;
elseif sc_4069_12 = true then
  sc_4069_12 := false;

  (* saída digital endereço 13 *)
  sc_4069_13 := true;
elseif sc_4069_13 = true then
  sc_4069_13 := false;

  (* entrada analógica endereço 31 *)
  (* entrada analógica PT100 *)
  sc_4019_31 := true;
elseif sc_4019_31 = true then
  sc_4019_31 := false;

  (* entrada analógica endereço 32 *)
  sc_4019_32 := true;
elseif sc_4019_32 = true then
  sc_4019_32 := false;

  (* saída analógica endereço 42 *)
  sc_4024_42 := true;
elseif sc_4024_42 = true then
  sc_4024_42 := false;

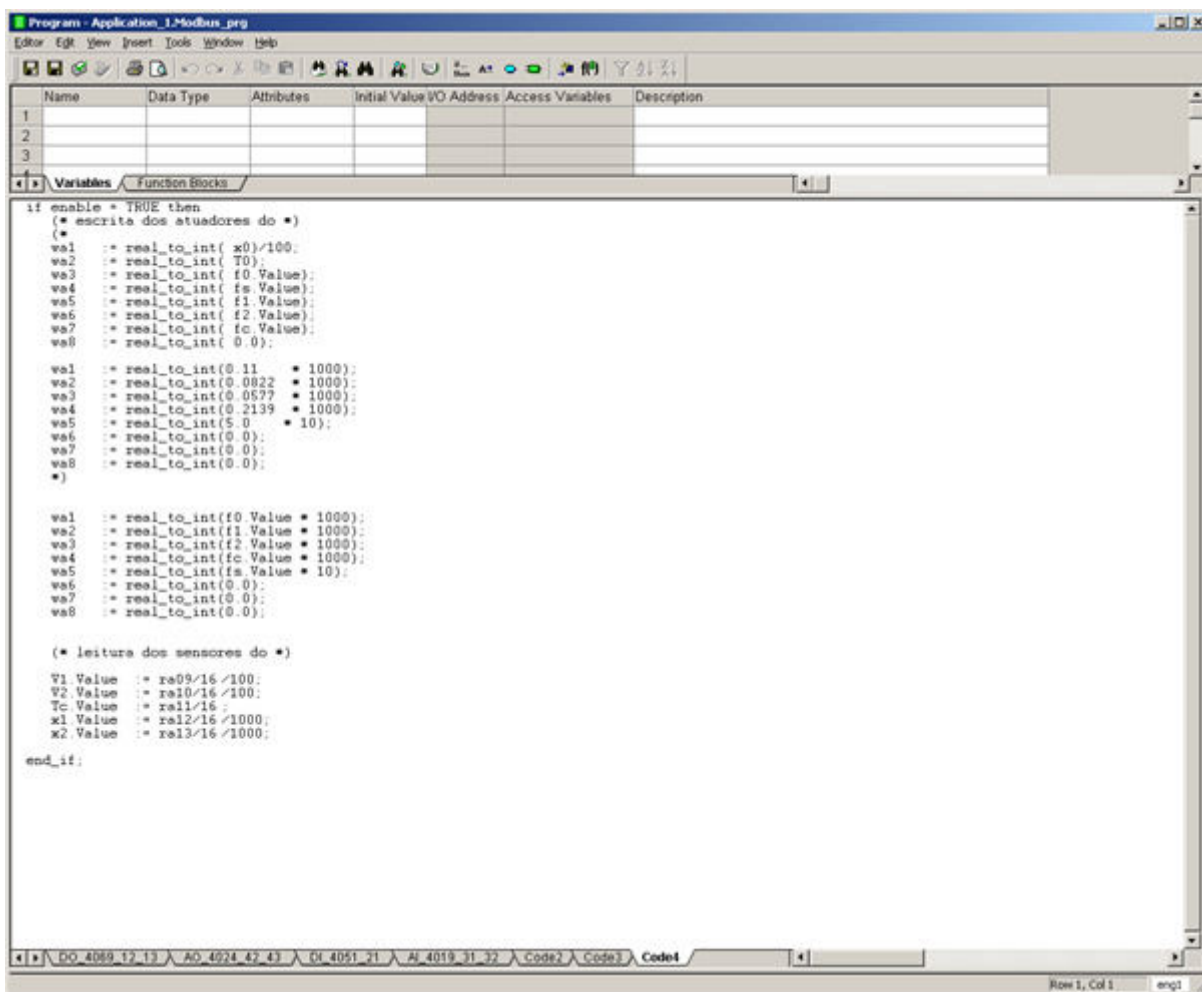
  (* saída analógica endereço 43 *)
  sc_4024_43 := true;
elseif sc_4024_43 = true then
  sc_4024_43 := false;

  sc_4051_21 := true;
else
  sc_4051_21 := true;
end_if;

```

Row 1, Col 1 eng1

**Figura 72-Programação Modbus**  
 Fonte: Autoria própria

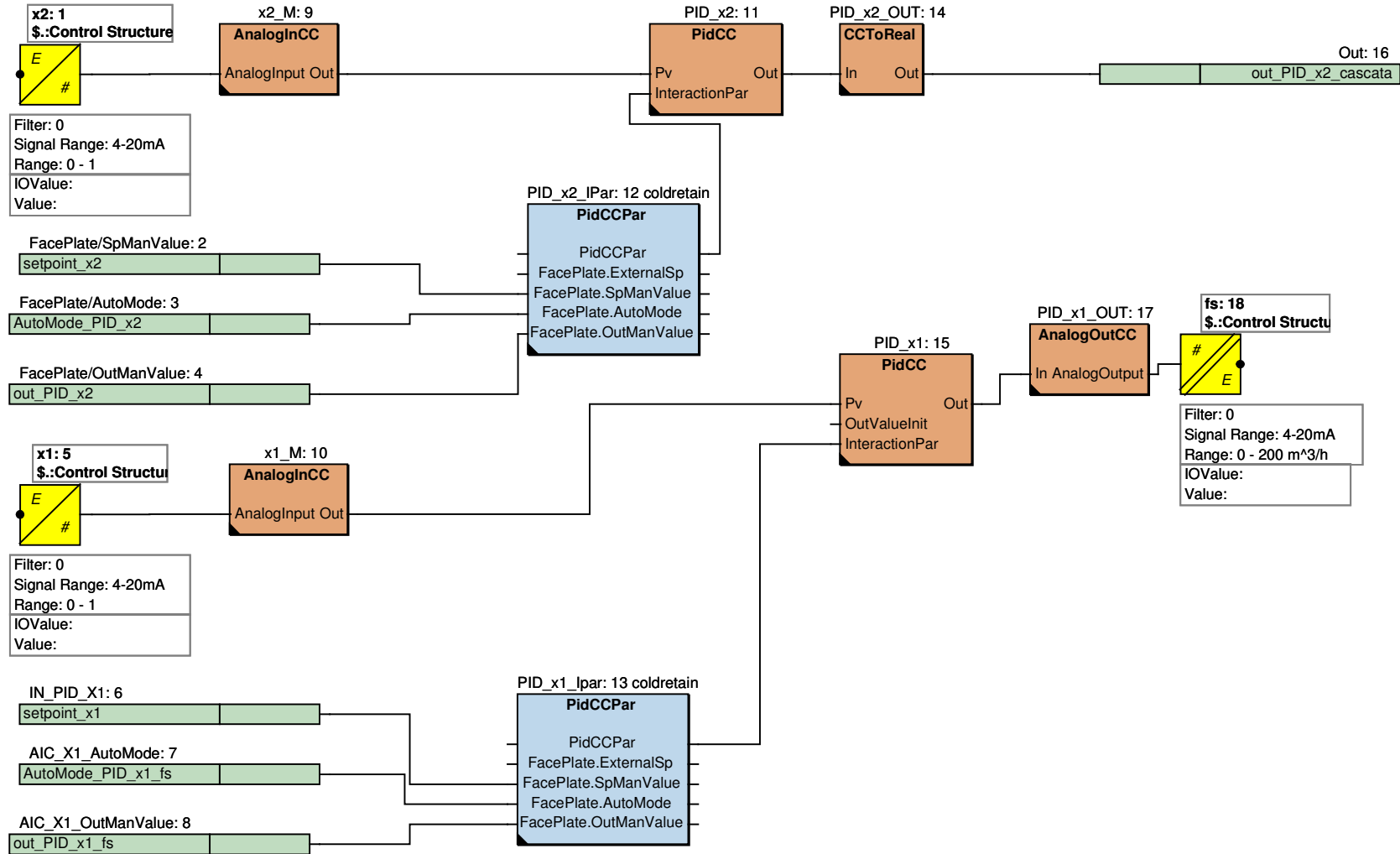


**Figura 73-Programação Módulos de Entradas e Saída Analógicas- Modbus**  
**Fonte: Autoria própria**

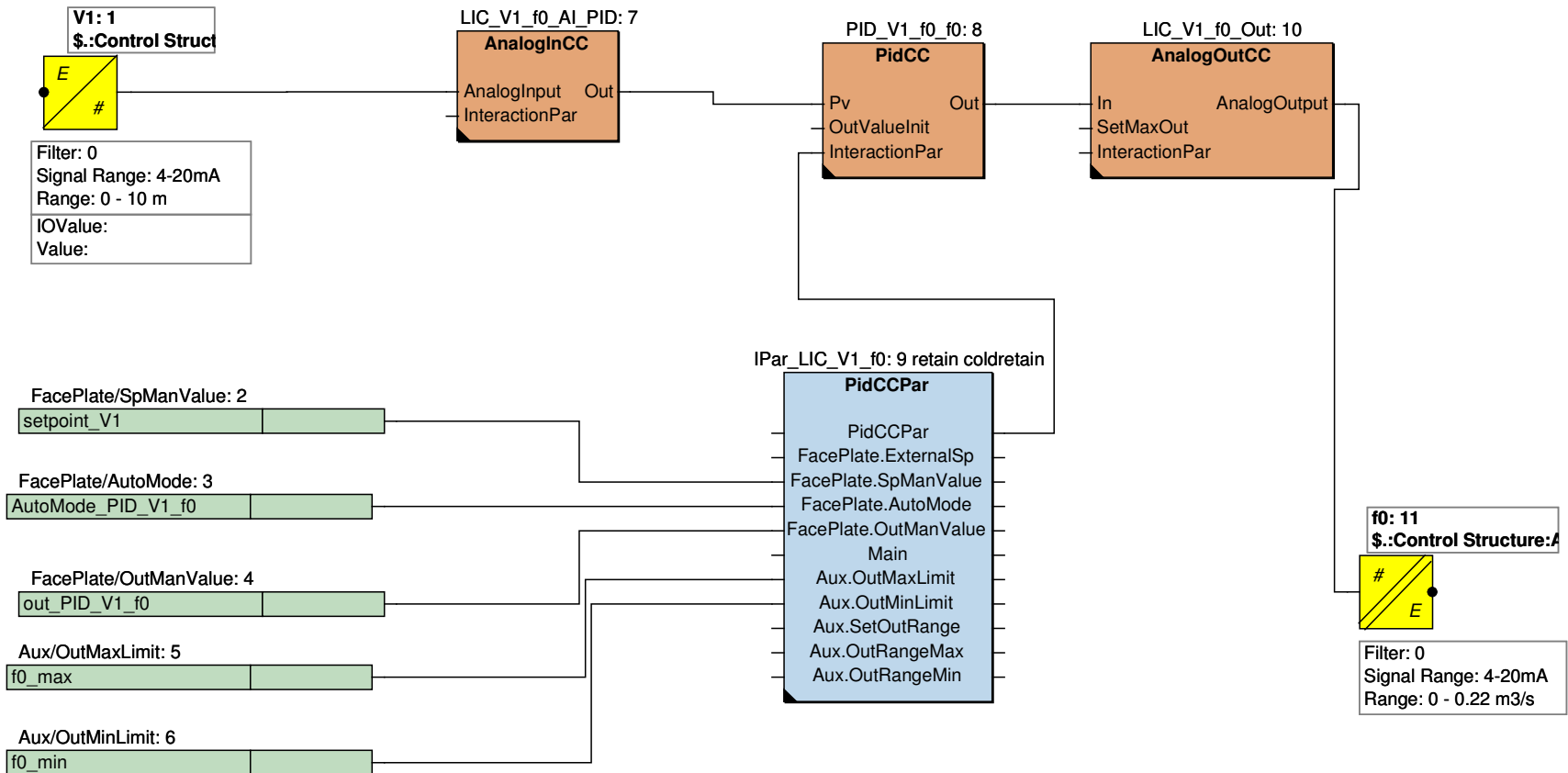
Para leitura dos módulos Modbus através do MATLAB, utiliza-se o arquivo "read\_MD.Modbus".

## **APÊNDICE E**

Estratégias de Controle realizadas no System 800xA



**Figura 74-Controle Concentração x2**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 75-Controle de Volume Evaporador 1 através válvula f0**  
Fonte: Autoria própria



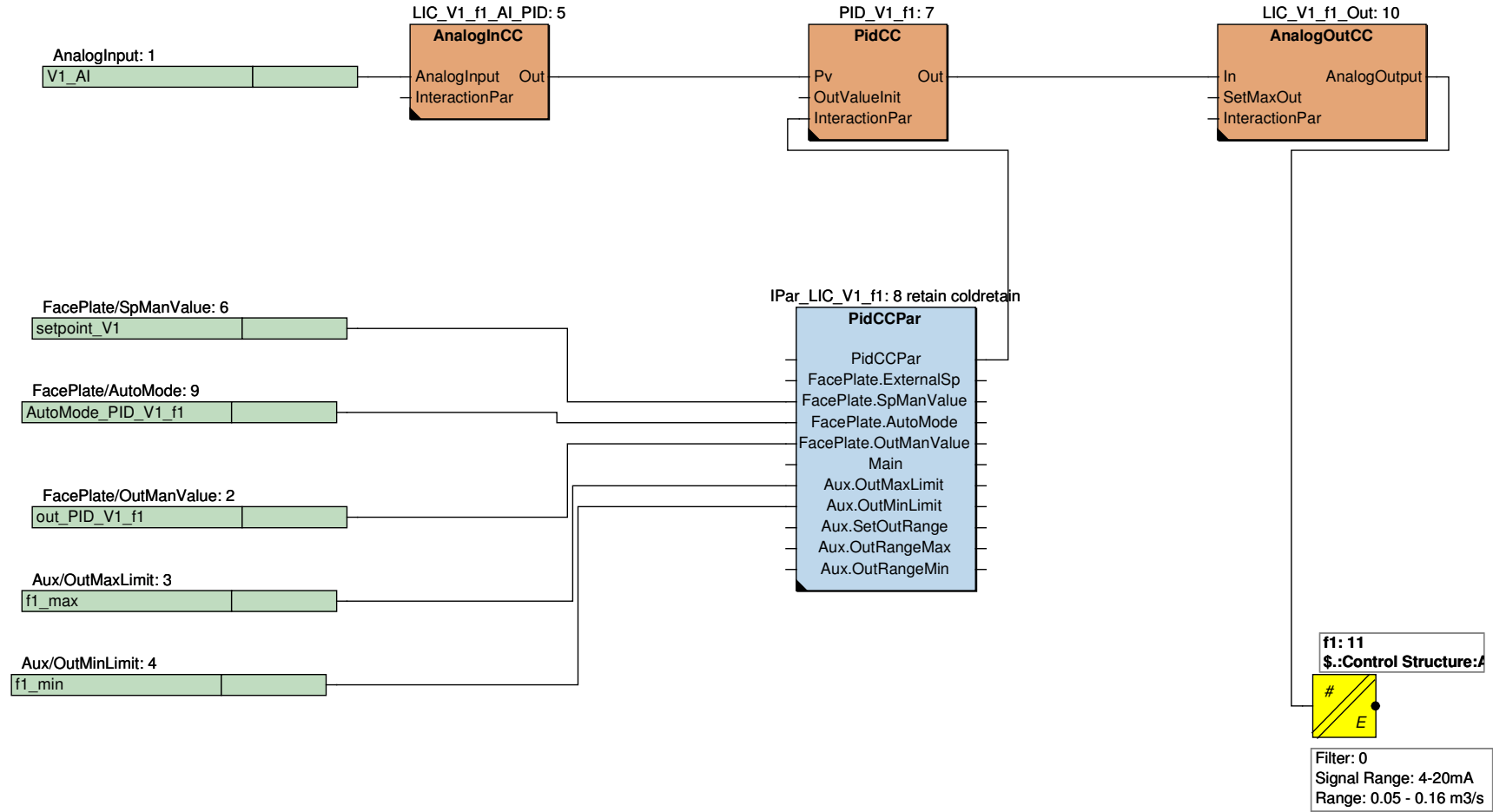
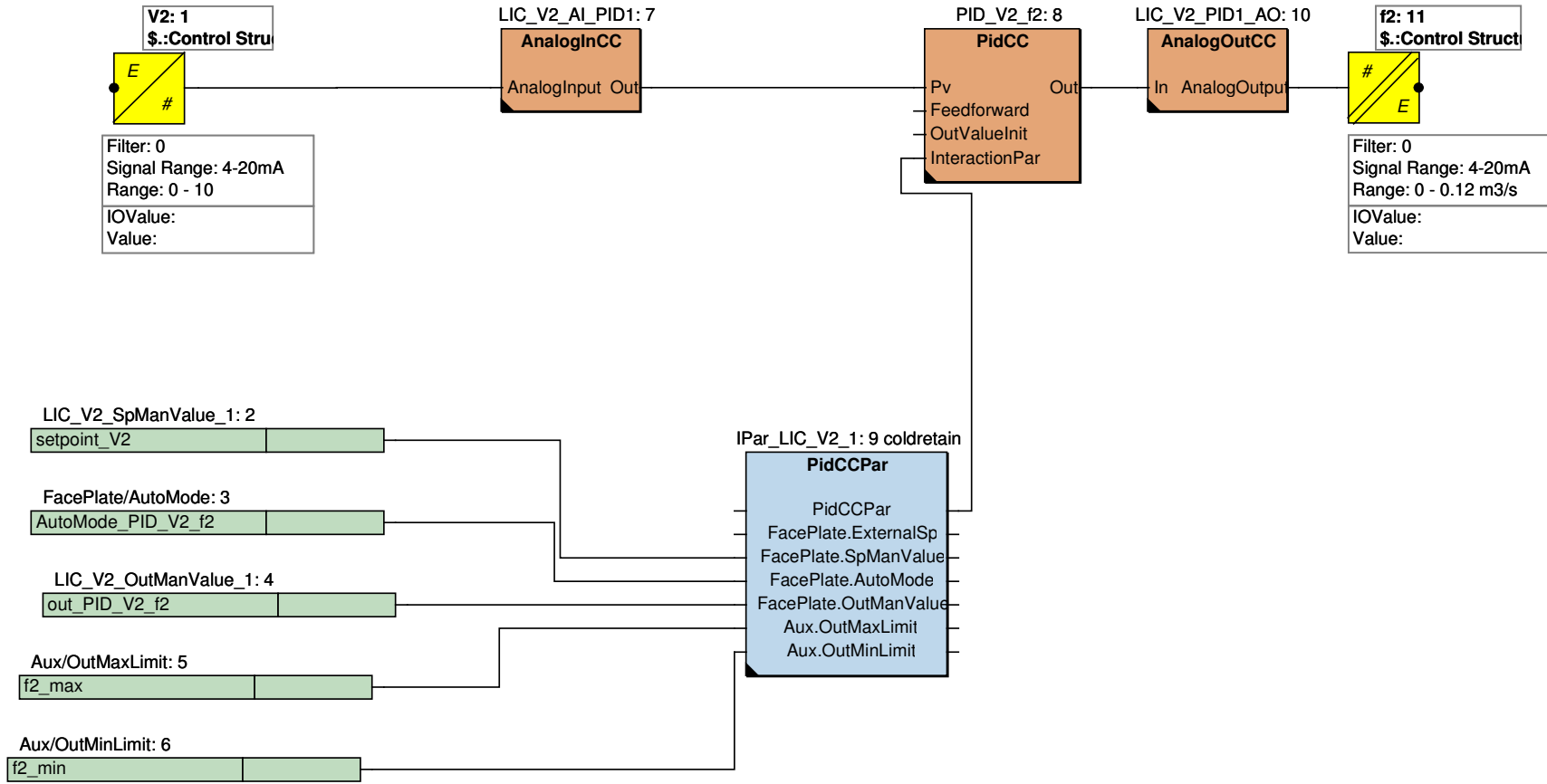


Figura 76-Controle de Volume do Evaporador 1 através da válvula f1  
Fonte: Autoria própria



**Figura 77-Controle de Volume do Evaporador 2**  
**Fonte: Autoria própria**

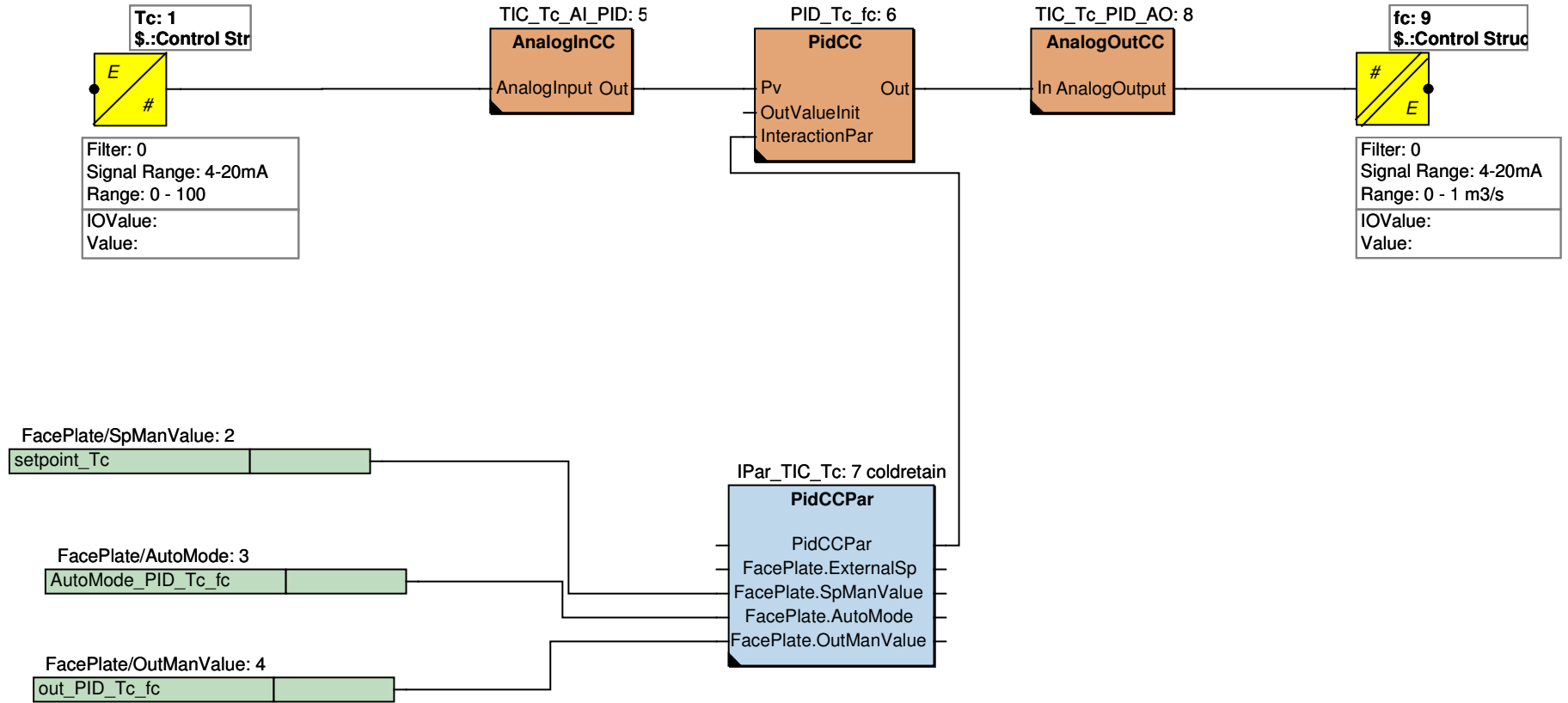


Figura 78-Controle de Temperatura do Condensador  
Fonte: Autoria própria

**APÊNDICE F**  
Controles PID's

Valores utilizados na parametrização dos PID dos 3 ambientes:

<b>PID_x1</b>	Ambiente 1	Ambiente 2	Ambiente 3
P	10	10	10
I	100	1	1
D	0	0	0
<b>PID_X2</b>			
P	4	1000	1000
I	1000	100	100
D	0	0	0
<b>PID_V1_f0</b>			
P	0,10	0,10	0,10
I	10	10	10
D	0	0	0
<b>PID_V1_f1</b>			
P	0,2	0,2	0,2
I	10	10	10
D	0	0	0
<b>PID_V2_f2</b>			
P	0,10	2	2
I	10	10	10
D	0	0	0
<b>PID_TC_fc</b>			
P	0,05	5	5
I	20	20	20
D	0	0	0

**Quadro 5 - Valores de parametrização dos PID**  
**Fonte: Autoria própria**