

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

GUSTAVO TOPANOTTI MELLER

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE OPERAÇÃO DE
CALDEIRA PARA TREINAMENTO DE OPERADORES**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2014

GUSTAVO TOPANOTTI MELLER

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE OPERAÇÃO DE CALDEIRA PARA TREINAMENTO DE OPERADORES

Monografia de Especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.
Orientador: Prof. M.Sc. Anderson Levati Amoroso.

CURITIBA

2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de viver uma vida plena de realizações e desafios.

Aos meus pais, Volnei e Janice, pelos incansáveis esforços para que pudéssemos ter uma educação de qualidade. Além disso, seus exemplos de dedicação e de comprometimento com o conhecimento, o único bem que levamos desta passagem pela vida, inspiram-me a ser um eterno estudante.

Ao meu orientador Anderson Amoroso, que desde o primeiro encontro se mostrou solícito e disposto a contribuir com o presente trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e aos professores do curso, pela oportunidade de desenvolver uma especialização neste tema tão atual e prático como a automação industrial.

À Radix Engenharia e sua Universidade Corporativa, por acreditar na engenharia nacional e contribuir para o aperfeiçoamento técnico de seus colaboradores.

Aos meus colegas de profissão e amigos, por compartilharem seus conhecimentos motivados exclusivamente pela amizade e pela bondade. Vocês são exemplos de que este é o verdadeiro caminho para construir uma sociedade mais fraterna e solidária.

Em especial à minha companheira e colega de profissão Bianca Cristina Sella, por todo amor e compreensão nesta etapa de ausências. Você é um exemplo de dedicação e de coragem. É uma dádiva poder dividir esta vida com você.

RESUMO

MELLER, Gustavo Topanotti. **Desenvolvimento de um simulador de operação de caldeira para treinamento de operadores**. 2014. 50 f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Devido à crescente preocupação da indústria com a redução dos riscos operacionais em plantas de processo, a realização de treinamentos utilizando simuladores de operação têm se mostrado uma ferramenta eficiente no controle e na gestão destes fatores, visto que capacita o operador para desempenhar suas atividades de maneira segura durante a ocorrência de situações anormais de processo. O presente trabalho desenvolve um simulador de operação de caldeira baseado nos software comerciais *MATLAB®* e *INDUSOFT®*, utilizando para isso um modelo simplificado de operação de um sistema de combustão de uma caldeira industrial aquatubular. A aplicação possui dois perfis de usuários (instrutor e operador) que podem ser utilizados simultaneamente, em rede, permitindo a simulação de diferentes ocorrências operacionais. A comunicação entre os software é realizada através de protocolo *OPC*, tendo o sistema de supervisão atuando como servidor e o software de controle e modelagem como cliente. Os procedimentos de acendimento dos queimadores são simulados e os resultados apresentados são compatíveis com o comportamento real de uma planta.

Palavras chave: Simulador de Operação. Treinamento de Operador. Comunicação *OPC*. Caldeira Aquatubular.

ABSTRACT

MELLER, Gustavo Topanotti. **Development of a boiler operator training simulator.** 2014. 52 p. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Due to the growing concern of industry with the reduction of operational risks in process plants, training using simulators of operation has been shown to be a powerful tool in the control and management of these factors, since it enables the operator to perform their activities in a safe manner during the occurrence of process upsets. The present work develops a simulator of the boiler operation based on commercial software MATLAB® and INDUSOFT®, using a simplified model of operation of a combustion system in an industrial water-tube boiler. The application has two user profiles (instructor and operator) that can be used, in network, at the same time, allowing the simulation of different operational occurrences. The communication between the software is performed through OPC protocol, having the supervisory system acting as a server and the control and modeling software, as customer. The procedures for lighting the burners were simulated and the results presented are consistent with the actual behavior of a plant.

Keywords: Operator Training Simulator. Training Operator. OPC Communication. Watertube Boiler.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Caldeira Flamotubular	15
Figura 2: Modelo Simplificado de Caldeira Aquatubular	16
Figura 3: Caldeira com Economizador e Preaquecedor de Ar	17
Figura 4: Arquitetura Simplificada de Rede de Automação.....	22
Figura 5: Comunicação entre Softwares e Dispositivos Proprietários	24
Figura 6: Comunicação OPC	25
Figura 7: Exemplo de Telas de um Sistema Supervisório.....	26
Figura 8: Arquitetura do Modelo de Simulador de Operação para Treinamento	29
Figura 9: Utilização do <i>OPC Toolbox</i> do <i>Simulink</i>	31
Figura 10: Configuração de Escrita e Leitura OPC no Simulink (<i>OPC Toolbox</i>)	32
Figura 11: Tela de Inicialização do Servidor OPC	33
Figura 12: Fluxograma do Sistema de Gás Combustível.....	35
Figura 13: Sistema de Gás Combustível para Ignitores	36
Figura 14: Tela de Abertura do Simulador	39
Figura 15: Tela do Instrutor	40
Figura 16: Tela Principal de Operação do Simulador.....	41
Figura 17: Tela de Operação com a Visualização dos Gráficos de Tendência.....	42
Figura 18: Fluxograma de Acendimento de um Queimador.....	43
Figura 19: Acendimento do Ignitor	44
Figura 20: Acionamento do Queimador através da Tela do Instrutor.	46
Figura 21: Acendimento do Queimador através da Tela do Operador.	46
Figura 22: Posição de Falha de Chama causada por Falha nas Focélulas.....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	PROBLEMA	10
1.2	OBJETIVOS	11
1.2.1	Objetivo Geral	11
1.2.2	Objetivos Específicos	11
1.3	JUSTIFICATIVA	12
2	CALDEIRAS DE GERAÇÃO DE VAPOR.....	14
2.1	CALDEIRAS FLAMOTUBULARES.....	14
2.2	CALDEIRAS AQUATUBULARES.....	15
2.2.1	Componentes	15
3	ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE CALDEIRA AQUATUBULAR	18
4	SISTEMA DE COMBUSTÃO EM CALDEIRAS AQUATUBULARES	20
4.1	QUEIMADORES À GÁS.....	20
5	SISTEMA DIGITAL DE CONTROLE DISTRIBUÍDO	21
5.1	REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL	22
5.1.1	O Padrão OPC (<i>OLE for Process Control</i>).....	23
5.2	SISTEMAS SUPERVISÓRIOS	25
6	SIMULAÇÃO DE PROCESSOS	27
6.1.1	Simulação de Processos em Treinamento de Operadores	27
7	METODOLOGIA.....	29
7.1	ARQUITETURA DE REDE DO SIMULADOR.....	29
7.2	SOFTWARE DE MODELAGEM MATEMÁTICA – <i>MATLAB/SIMULINK®</i>	30
7.3	SISTEMA SUPERVISÓRIO – <i>INDUSOFT®</i>	32
7.4	DESCRIPTIVO DA LÓGICA DO SIMULADOR	33
7.5	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE COMBUSTÃO.....	35
7.6	PROTEÇÕES E INTERTRAVAMENTOS DO SISTEMA DE COMBUSTÃO.....	36
8	APRESENTAÇÃO DO SIMULADOR	38
8.1	DESCRIPTIVO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO	38
8.1.1	Tela Inicial	38
8.1.2	Tela do Instrutor	39
8.1.3	Tela do Operador	41
8.2	LÓGICA DE OPERAÇÃO	43
8.2.1	Acendimento de um Ignitor	44
8.2.2	Acendimento de um Queimador	45
9	CONCLUSÃO.....	49

1 INTRODUÇÃO

A segurança operacional na indústria tornou-se um grave problema econômico e social para governantes de todo o mundo. Nos últimos anos, métodos e aplicações de diagnóstico de falhas em equipamentos têm sido estudados mediante a utilização de abordagens físicas e matemáticas, porém estudos referentes à prevenção de incidentes que integrem a estes métodos fatores humanos e de gerenciamento ainda são limitados (RAO; WEN, 2003). A complexidade da operação de uma planta industrial exige esta constante integração, visto que a atuação operacional durante a ocorrência de uma emergência precisa ser rápida e efetiva, evitando maiores danos às pessoas e às empresas.

Neste contexto, as caldeiras de geração de vapor são citadas como um dos equipamentos industriais em que esta complexidade operacional, associada aos riscos inerentes às falhas humanas, pode causar consequências catastróficas. Heselton (2005) descreve que o maior acidente industrial já registrado nos Estados Unidos foi a explosão de quatro caldeiras do navio *Sultana*, causada principalmente por falha na operação, no ano de 1863, matando cerca de 1.800 pessoas. Já o acidente de maior prejuízo calculado nos Estados Unidos foi, novamente, a explosão de uma caldeira, desta vez em uma planta de aço em *River Rouge*, no ano de 1999, matando seis pessoas e gerando perdas estimadas em US\$ 1 bilhão.

Para reduzir os impactos causados por incidentes como estes, causados principalmente por falhas humanas, a realização de treinamento é reconhecida como um componente importante de programas de controle e gestão de riscos industriais (GREGERSEN et al., 1996). Segundo Robson et al. (2010), esta abordagem tem sido uma ferramenta eficiente na criação de um comportamento seguro por parte dos trabalhadores, comprovando assim que os esforços e investimentos dispendidos neste sentido são válidos e possuem retorno direto aos profissionais e às organizações.

No âmbito industrial, uma das alternativas adotadas para alcançar este objetivo é a utilização de simuladores de operação. Conforme Dongil e Venkat (1996), a utilização deste método oferece uma excelente oportunidade para o desenvolvimento técnico e pessoal dos operadores, pois enquanto eles operam um sistema simulado idêntico ao real, porém isento dos riscos inerentes à planta, o

instrutor pode testar e avaliar seus desempenhos quando confrontados com condições anormais de operação, possibilitando a correção de comportamentos e ações não seguras.

Dentro deste tema o presente trabalho desenvolve um simulador de operação de caldeira para o treinamento de operadores, utilizando para isso softwares compatíveis com uma aplicação industrial, tendo como base a operação simplificada de um sistema de combustão de uma caldeira aquatubular industrial.

1.1 PROBLEMA

De acordo com Rao, Wen e Zhang (2003), ao observar os processos industriais atuais, inicialmente três conclusões podem ser levantadas: primeiramente, a gestão do conhecimento acerca das condições críticas de operação não é efetiva, o que atinge principalmente os operadores e responsáveis pelas plantas. Além disso, durante a ocorrência de uma situação anormal os sistemas de controle geralmente não enviam mensagens concisas, já que dezenas de alarmes são acionados ao mesmo tempo, ou em um intervalo muito pequeno de tempo, e só operadores experientes conseguem encontrar a causa raiz do problema, e por último, e não menos importante, é que fatores humanos como o pânico, a inexperiência e o cansaço afetam diretamente as ações dos operadores, impedindo que eles atuem de forma calma e correta na direção da solução apropriada.

Segundo Morgan, Sendelbach e Stewart (1994) estudos realizados nos Estados Unidos mostram que dos 170 maiores acidentes em plantas industriais, 28% foram causados por falhas humanas ou por perturbações que não puderam ser controladas a tempo. Além disso, 127 dos 170 acidentes (aproximadamente 75%) ocorreram durante a operação normal da planta, e não em paradas ou manutenções, por exemplo, comprovando assim que equipes de operação bem treinadas tornam a planta mais segura e lucrativa, e que as companhias devem desenvolver metodologias para garantir que seus operadores estejam totalmente familiarizados com as condições normais e anormais de operação.

Neste sentido, Robson et al. (2010) afirma que é possível reduzir o impacto causado por estas falhas realizando um programa de treinamento operacional estruturado, e que o método apresenta-se eficaz contra os problemas acima citados.

A utilização de simuladores de operação é um componente importante neste tipo de treinamento. Em indústrias que não possuem simuladores de operação, os operadores menos experientes recebem este treinamento no dia a dia, porém durante as poucas emergências que ocorrem no processo os operadores mais experientes assumem a responsabilidade pela tomada de decisão e, conseqüentemente, os operadores que precisam aprender sobre a operação da planta são meros expectadores (YANG; YANG; HE, 2001). Ainda, segundo Yang, Yang e He (2001), somente o treinamento de campo não confere segurança ou melhora significativa nas habilidades dos operadores num curto e médio prazo, e a utilização de simuladores complementa estes requisitos, pois combina a teoria e a prática numa única ferramenta.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento de simulador de operação de caldeira para treinamento de operadores.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar os *softwares* comerciais necessários para o desenvolvimento do simulador;
- Integrar estes *softwares* utilizando um protocolo de comunicação de automação industrial;

- Simular a lógica de operação de um sistema combustão de caldeira nos *softwares* selecionados;
- Descrever a resposta da aplicação ao modelo de operação.

1.3 JUSTIFICATIVA

As organizações industriais investem cada vez mais tempo e recursos no desenvolvimento de treinamentos voltados para a segurança operacional de suas plantas. Rivera e Paradise (2006 apud ROBSON et al., 2010) comprovam esta afirmação quando publicam que, somente nos Estados Unidos no ano de 2005, foram gastos cerca de US\$ 100 bilhões de dólares em treinamentos.

Estes investimentos são eficazes na implementação de uma cultura segura dentro das empresas, porém muitas vezes as ferramentas utilizadas para compor programas de controle e gestão de riscos não são as mais adequadas para cada tipo de atividade, tendo em vista a complexidade das plantas e o desenvolvimento pessoal e profissional de cada operador (ROBSON et al., 2010).

Esta abordagem cultural de mudança de comportamento demanda esforços contínuos dos profissionais e das organizações. De acordo com Rao et al. (2003), um operador novo de uma planta de geração de vapor e energia, com ensino médio completo, necessita de cinco anos de treinamento de campo para se tornar um profissional independente. Este perfil é semelhante ao exigido nos concursos públicos para operação de plantas industriais complexas no Brasil, como as refinarias de petróleo, comprovando que esta também é uma realidade operacional encontrada neste país.

O dia a dia de treinamento ao lado de operadores experientes faz com que os novos operadores obtenham um bom domínio das condições normais de operação, porém não os prepara para atuar em condições anormais (RAO; WEN; ZHANG, 2003). Em síntese, segundo Rao et al. (2003), existem dois fatores predominantes que impedem que os novos operadores dominem as habilidades para lidar com situações de emergência: primeiro que tais situações não ocorrem com frequência, por isso não há muitas oportunidades de aprendizagem, e segundo que durante estas ocorrências fatores pessoais (psicológicos e emocionais) afetam o

desempenho do operador não experiente, dificultando seu processo de tomada de decisão.

Em meio a este contexto, os simuladores de operação visam preencher estas lacunas, uma vez que podem simular situações anormais de operação e proporcionar aos operadores as oportunidades para melhorar sua atuação em situações de emergência.

Como descrito anteriormente, o modelo matemático utilizado no simulador é composto somente do processo de combustão em uma caldeira aquatubular industrial, e não o processo de geração de vapor como um todo. Mesmo sendo uma abordagem parcial, esta prática possui grande valia no treinamento de operadores, pois prioriza a atenção nas áreas críticas do equipamento, otimizando os recursos e garantindo a eficiência do processo quando não há tempo e investimentos suficientes para desenvolver um simulador completo, ou quando são identificadas falhas sistêmicas na atuação operacional (INTERNATIONAL..., 1998).

2 CALDEIRAS DE GERAÇÃO DE VAPOR

Caldeiras são equipamentos que, mediante a utilização de calor fornecido pelo processo de combustão, produzem e armazenam vapor a pressões acima da atmosférica, a partir de água em seu estado líquido (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2006). São compostas por dois sistemas básicos separados: o sistema vapor-água, onde o elemento principal (água) recebe o calor através dos tubos de metal que compõem o equipamento para então ser convertido em vapor e seguir para os consumidores, e o sistema combustível-ar, formado pelos componentes essenciais para a produção de chama, que são misturados e queimados controladamente para converter energia química em energia térmica (BEGA, 2003).

Basicamente, as caldeiras industriais podem ser divididas em dois tipos: as flamotubulares, onde os gases quentes passam por dentro dos tubos internos, transferindo o calor para a água depositada na parte externa dos tubos, e as aquatubulares, onde a água passa por dentro dos tubos e os gases quentes da combustão se deslocam externamente as paredes de metal, em contato direto com elas.

2.1 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

As caldeiras flamotubulares, mesmo sendo mais simples que as aquatubulares, por questões econômicas e construtivas são restritas às indústrias que consomem menos de 10 toneladas/hora de vapor saturado, a pressões de trabalho que não ultrapassem 10 kgf/cm² (BEGA, 2003). Os gases provenientes da combustão fluem por dentro dos tubos do equipamento, e são resfriados mediante a transferência deste calor para a água. Quanto maior o resfriamento, maior será a quantidade de energia transferida e, conseqüentemente, maior será a eficiência do equipamento. Sua configuração básica é mostrada na Figura 1.

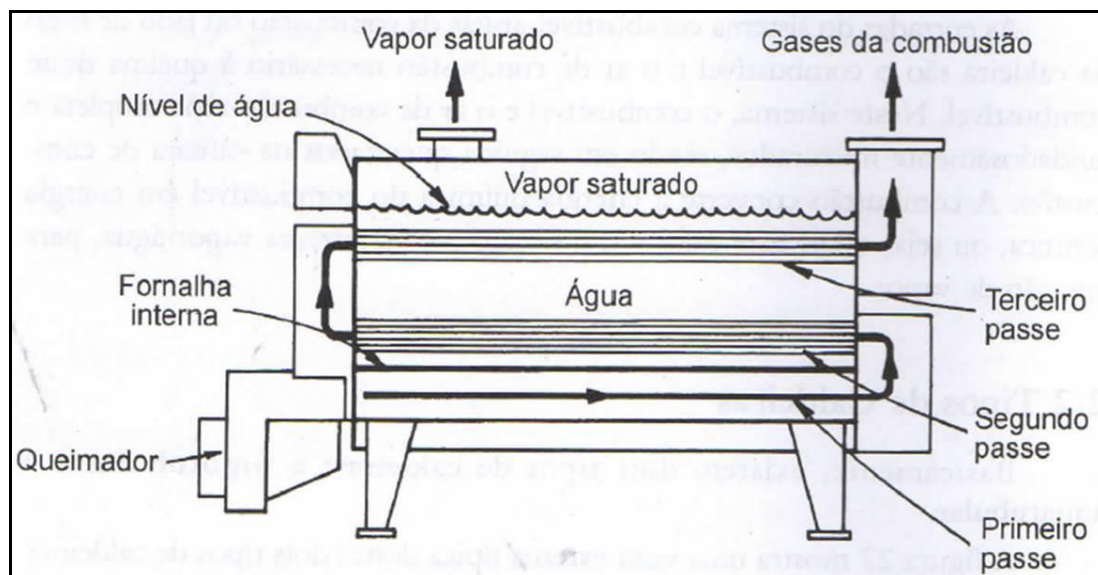


Figura 1: Caldeira Flamotubular

Fonte: Bega (2003).

2.2 CALDEIRAS AQUATUBULARES

As caldeiras aquatubulares possuem um processo de geração de vapor mais complexo que as flamotubulares. Seu funcionamento já foi extensamente detalhado na bibliografia atual, e os descritivos do item 2.2.1 estão baseado nos trabalhos de Bega (2003), Heselton (2005) e Bazzo (1995).

2.2.1 Componentes

As caldeiras aquatubulares são geralmente formadas pelos seguintes componentes: tubulão superior, tubulão inferior, tubos ascendentes (*risers*), tubos decedentes (*downcomers*), fornalha e queimadores, como se pode observar na Figura 2.

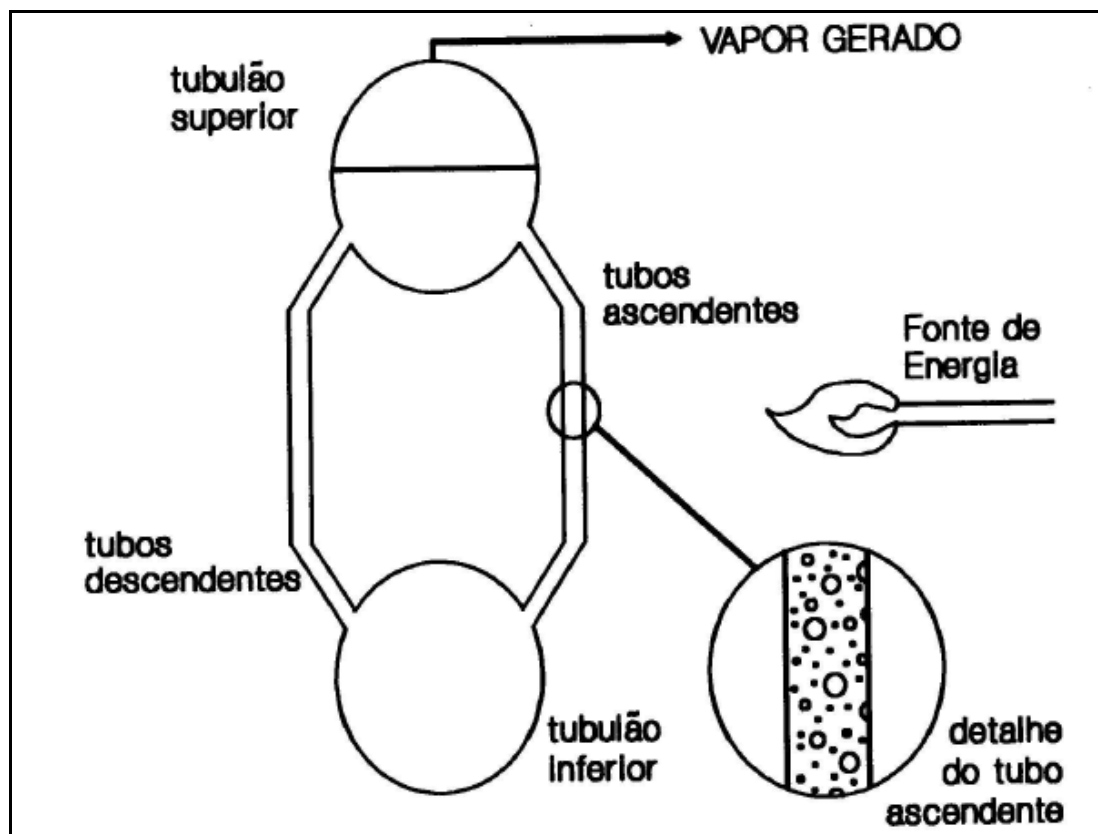


Figura 2: Modelo Simplificado de Caldeira Aquatubular

Fonte: Marques (2005).

Estes componentes fazem parte da estrutura básica de uma caldeira aquatubular que produz vapor saturado, porém os sistemas de geração de vapor podem ser utilizados para a produção de vapor superaquecido. Para isso são acrescentados à caldeira equipamentos como os superaquecedores, os preaquecedores de ar e os economizadores. Uma caldeira completa que produz vapor superaquecido é demonstrada na Figura 3.

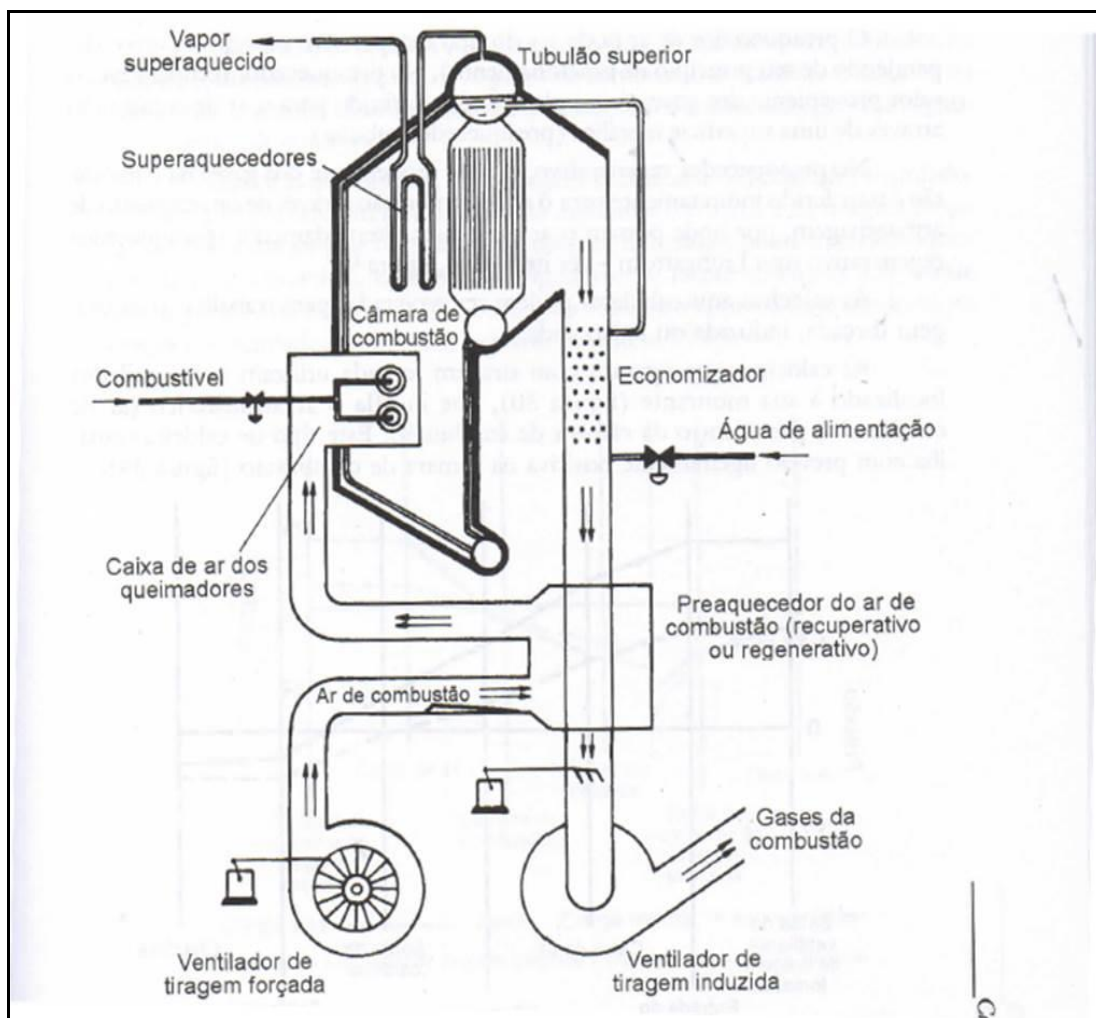


Figura 3: Caldeira com Economizador e Preaquecedor de Ar

Fonte: Bega (2003).

3 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE CALDEIRA AQUATUBULAR

Em caldeiras aquatubulares onde a dinâmica de geração de vapor é complexa e envolve diversas variáveis, é possível considerar duas como sendo as de maior importância para a composição de uma estratégia de controle eficiente: a pressão de vapor na saída do equipamento e o nível de água no tubulão superior (BEGA, 2003).

O controle de nível é realizado, predominantemente, através da variação da quantidade de água que entra na caldeira, em decorrência da quantidade de vapor que é consumida (HESELTON, 2005). Este tipo de controle é complexo devido à dinâmica de contração e expansão apresentada no tubulão. Esta movimentação cria zonas que apresentam falsos valores de nível mínimo, que podem induzir atuações de controle fora da realidade e são causadas pela presença de bolhas de vapor abaixo da superfície do líquido, que tendem a se deslocar com maior ou menor velocidade de acordo com as variações de pressão no tubulão, causadas pela dinâmica de entrada e saída de calor e massa, fenômeno que provoca este efeito indesejado (ASTROM; BELL, 2000).

A faixa de controle desta variável deve ser estreita o bastante para que o equipamento não sofra com os dois extremos de medição. O nível baixo poderia deixar os tubos internos da caldeira sem água, o que possivelmente causaria a fusão do material devido às altas temperaturas da chama dos queimadores. Já o nível alto poderia promover o arraste de água líquida através da corrente de vapor, reduzindo a qualidade do produto final e a eficiência do equipamento e de seus consumidores.

Já a pressão deve ser controlada, pois normalmente o vapor gerado no equipamento é utilizado para o acionar turbinas de geração de energia, e sua pressão deve ser mantida numa faixa de variação restrita para garantir a estabilidade destes equipamentos (BEGA, 2003). Bega (2003) também pontua que o controle de pressão é realizado atuando diretamente no sistema de combustão, que por sua vez é função das vazões de combustível e de ar que são inseridas na caldeira, já que quanto maior a queima, maior a vaporização.

O controle destas duas variáveis possui interface direta com o domínio da operação dos sistemas de combustão, influenciando diretamente na eficiência, na confiabilidade e na segurança das caldeiras.

4 SISTEMA DE COMBUSTÃO EM CALDEIRAS AQUATUBULARES

A combustão é o processo pelo qual a caldeira recebe o calor necessário para transformar a água líquida em vapor. Esta combustão pode utilizar diversas fontes de energia (como líquidos, gases e sólidos), que são definidas analisando-se fatores como o custo, a disponibilidade, a poluição, o manuseio e o tipo de estrutura da caldeira em que será queimado (PUNTE et al., 2006).

4.1 QUEIMADORES À GÁS

Os sistemas de queima de gás possuem a operação mais prática entre os combustíveis listados, visto que necessitam de condições simplificadas de manuseio e são queimados em queimadores de baixa manutenção e geometria simplificada (PUNTE et al. 2006). Punte et al (2006) descreve também a facilidade de encontrar este tipo de combustível nos grandes centros, já que as redes de distribuição de gás natural nestes locais já são realidade e estão situadas em zonas de alta densidade demográfica e industrial, fornecendo gás tanto para pequenos, como para grandes consumidores.

Para iniciar a chama e tornar o processo de combustão autossustentado, ou seja, somente com a alimentação de combustível a chama é mantida acesa, faz-se necessário que aja uma ignição (ou chama piloto) que produza temperatura suficiente para que o calor gerado seja maior que as perdas para a periferia (LAWN et al., 1987). Segundo Reed (1981) a pressão é uma variável importante na operação de sistemas que utilizam queimadores a gás, já que quando os valores aplicados são muito baixos ou muito altos, pode ocorrer a extinção da chama, colocando em risco a operação e o equipamento se houver acúmulo de combustível no interior da caldeira, podendo provocar explosões de grandes magnitudes.

5 SISTEMA DIGITAL DE CONTROLE DISTRIBUÍDO

Ao longo dos anos, a evolução dos processos produtivos exigiu maior qualidade, eficiência e automação das máquinas utilizadas. Esta exigência requer um constante monitoramento e controle das plantas, em intervalos contínuos de tempo, que permitam a visualização do estado do processo mesmo a distância (SHANKAR, 2008). Esta realidade é possível com a utilização dos sistemas de controle distribuídos, mais conhecidos como *SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)*. Segundo Boyer (2004) o sistema *SCADA* permite que o operador instalado em uma sala central de uma imensa indústria de processo, como uma refinaria ou uma hidrelétrica, realize alterações nos parâmetros operacionais de controle, como a abertura e fechamento de válvulas, monitoramento de alarmes e obtenção de informações sobre medições das variáveis envolvidas, sem a necessidade de se deslocar até a planta, o que poderia invalidar a ação operacional.

Basicamente, um sistema operacional *SCADA* é composto pelos seguintes componentes (GLIGOR; TURC, 2012):

- uma interface homem-máquina (IHM), também conhecida como estação de supervisão, que apresenta dispositivos físicos ou de software pelos quais o operador torna-se capaz de monitorar e controlar a planta;
- um sistema supervisor (*software*) que tem como objetivo principal coletar os dados do campo, mostrar ao operador, e receber seus comandos enviando novamente para o processo;
- dispositivos de campo, como os controladores lógicos programáveis (CLP), que permitem a alteração rápida e segura dos sinais de saída a partir dos dados de entrada provenientes do processo, mediante a leitura de códigos computacionais pré-determinados;
- infraestrutura de comunicação de dados, que permite a navegação da informação de maneira segura e confiável utilizando linguagens (protocolos) específicas;
- unidades terminais remotas, do inglês *remote terminals units (RTU)*, que são equipamentos responsáveis por converter os sinais enviados pelos sensores e enviar para o sistema supervisor (quando necessárias);

- instrumentos de campo, como válvulas de controle, medidores, transmissores entre outros.

Estes componentes, quando reunidos, formam o que se chama de arquitetura de rede, exemplificada na Figura 4.

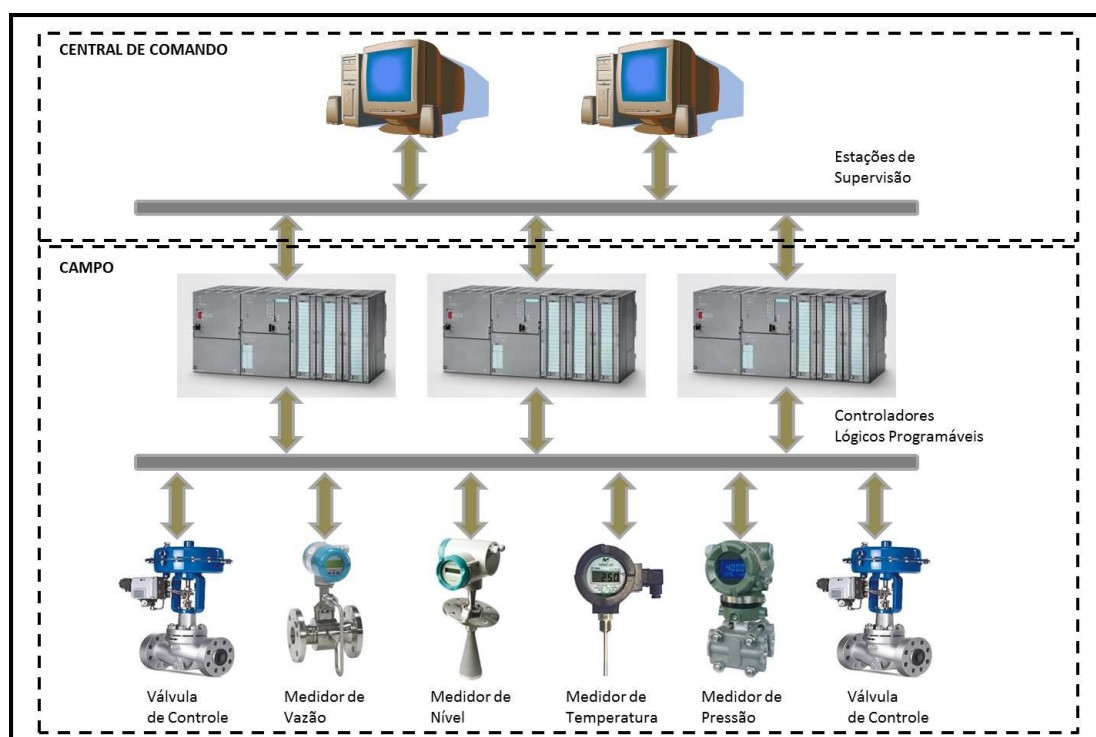


Figura 4: Arquitetura Simplificada de Rede de Automação

Fonte: Autoria própria (2014).

5.1 REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL

Conforme mostrado na Figura 4, entre os equipamentos de campo e as estações de supervisão (central de comando) há uma comunicação (interface dinâmica) que torna possível realizar a supervisão e o controle da planta industrial. De acordo com Boyer (2004), para que essa comunicação ocorra é necessário que o instrumento no final da rede (campo) tenha a capacidade de gerar um dado codificado e inseri-lo apropriadamente em um meio, seja ele um cabo, uma rede *wireless* ou ondas de rádio, por exemplo, que é responsável por levar este sinal até

o receptor final. Este receptor, por sua vez, possui a capacidade de extrair a mensagem que se quer monitorar e, a partir desta mensagem, o operador pode tomar uma ação. Esta ação fará o caminho inverso até o elemento final de controle, responsável por executar a instrução diretamente no processo.

A este conjunto de operações e fluxo de informação dá-se o nome de rede de comunicação industrial.

5.1.1 O Padrão OPC (*OLE for Process Control*)

Para possibilitar a integração dos diferentes equipamentos de campo com os sistemas supervisórios da planta, no início do desenvolvimento das redes de automação ficou a cargo de cada um dos fabricantes o desenvolvimento do conjunto de regras, procedimentos e leis que iriam gerir a transferência de dados entre os equipamentos de automação, mais conhecidos como protocolos de comunicação (ROSÁRIO, 2009). Os protocolos de comunicação industrial, mesmo sendo desenvolvidos por equipes diferentes, possuem algumas características em comum, conforme descreve Galloway e Hancke (2013):

- os dados de processo transmitidos são, geralmente, muito pequenos, especialmente nos níveis mais baixos da arquitetura (instrumentos de campo), quando apenas uma simples medição ou sinal digital deve ser enviada aos sistemas de supervisão, possuindo normalmente o tamanho de alguns *bytes*;
- tanto dados periódicos (monitoramento constante de uma variável) como dados aperiódicos (alarmes ou mensagens de erro) são transmitidos através destes protocolos, e precisam utilizar artifícios de marcação de horário para assegurar sua pontualidade e rastreabilidade;
- diversos requisitos são exigidos, como tempo de amostragem e frequência de transmissão, o que define a confiabilidade da comunicação;
- os equipamentos que utilizam estes protocolos normalmente são instalados em áreas industriais que possuem condições ambientais severas, e necessitam de maior robustez para garantir a qualidade da transmissão.

No início das redes industriais, o desenvolvimento individual de protocolos de comunicação pelos fabricantes dificultou a expansibilidade e a integração das plantas industriais (ROSÁRIO, 2009). Por décadas a indústria precisou desenvolver *drivers* de comunicação, arquivos que faziam a conversão dos comandos enviados pelos diferentes protocolos de comunicação, como mostra a Figura 5.

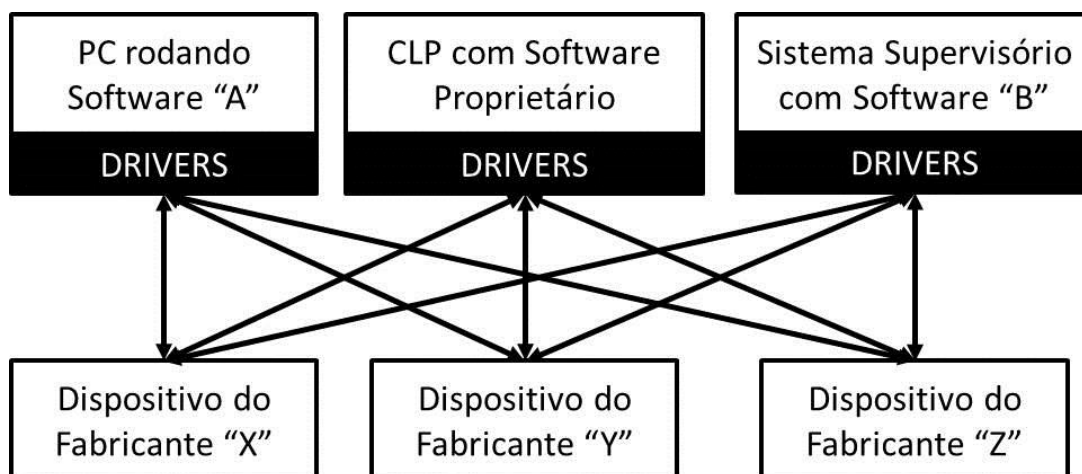


Figura 5: Comunicação entre Softwares e Dispositivos Proprietários

Fonte: Autoria própria (2014).

Até que em 1995 diversas empresas se reuniram para criar um padrão único, baseado na junção de duas tecnologias da Microsoft® já utilizadas pelas indústrias da época, a *OLE (Object Linking and Embedding)* e o *DCOM (Distributed Component Object Model)* (FONSECA, 2002). Para este novo protocolo foi atribuído o nome de *OPC (OLE for Process Control)*. Antes do desenvolvimento de um protocolo como o *OPC*, cerca de 25 a 30% do tempo de desenvolvimento de um software de supervisão típico era gasto na construção dos *drivers* de diferentes fabricantes (OPC TECHNICAL OVERVIEW, 1998).

De acordo com Fonseca (2002), há duas funcionalidades principais do protocolo: a tecnologia *OLE* caracteriza-se por integrar diferentes aplicações de automação a uma plataforma *Windows*, solucionando também os problemas de desempenho e confiabilidade apresentados pelo padrão antecessor, o *DDE (Dynamic Data Exchange)*. Já a tecnologia *DCOM* permite a implementação de aplicações distribuídas em uma rede industrial através da arquitetura cliente-servidor. Fonseca (2002) define esta arquitetura como sendo uma relação dinâmica

e completa entre o cliente, que necessita dos dados e pode buscá-los em diversos servidores (armazenagem), e os servidores que tem a liberdade para distribuir os dados coletados a vários clientes, como mostra a Figura 6.

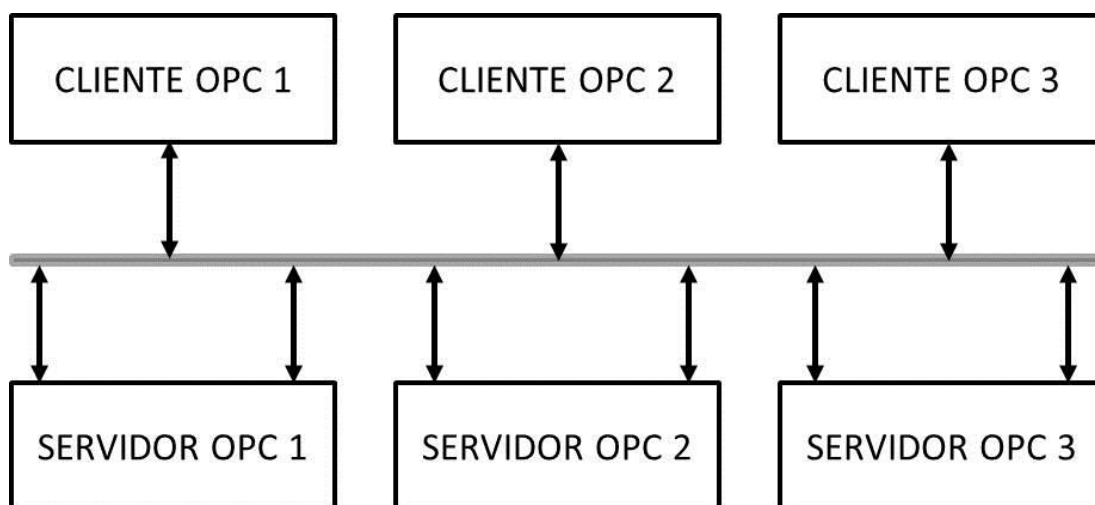


Figura 6: Comunicação OPC

Fonte: Adaptado de OPC Technical Overview (1998).

5.2 SISTEMAS SUPERVISÓRIOS

Os sistemas supervisórios têm por objetivo proporcionar uma interface entre as informações geradas no campo e os operadores, que com base nesses dados podem interpretar e interferir na dinâmica do processo. Trata-se de um conjunto de hardware e software compatível com os diferentes protocolos de comunicação existentes no mercado e seu sucesso está diretamente relacionado com a interoperabilidade do sistema, ou seja, independente do tipo de instrumento ou componente conectado à rede, o software deve se comunicar e atuar, se necessário (STRAUSS, 2003).

Conforme Strauss (2003) existem tipicamente cinco atividades principais dos sistemas supervisórios:

- entrada e saída de dados servindo de interface entre o sistema de controle e monitoramento e a planta industrial;
- gerenciamento de alarmes identificando os sinais digitais e comparando com os limites definidos para cada variável;

- gráficos de tendência, que distribuem os valores recebidos no tempo e informam o operador sobre as condições de operação;
- relatórios que podem ser produzidos utilizando as informações recebidas da planta, de acordo com eventos ocorridos ou sob solicitação do operador;
- exibição, definida como o gerenciamento das informações necessárias para a operação de forma clara, direta e simplificada.

As diferentes funcionalidades do sistema supervisor são ilustradas na Figura 7, como o monitoramento de equipamentos e variáveis e gráficos de acompanhamento.



Figura 7: Exemplo de Telas de um Sistema Supervisor

Fonte: SCADABR (2014).

6 SIMULAÇÃO DE PROCESSOS

O recurso de simulação de processos tem sido largamente aceito pelas indústrias como uma ferramenta importante durante todas as fases do empreendimento, do projeto à operação. Segundo Hertzberg e Moe (1994) a simulação é definida como a reprodução de um processo utilizando modelos matemáticos para a realização dos cálculos, com o objetivo de obter informações úteis e muito próximas das reais para as diferentes áreas de desenvolvimento de uma planta.

Conforme Nauman, Petersen e Wohlin (2014) é possível citar alguns benefícios da realização de simulações de processos na indústria:

- redução de custos do empreendimento;
- melhora na confiabilidade das condições de contorno adotadas no projeto;
- avaliações de riscos mais assertivas;
- possibilidade de realização de avaliações de baixo custo de diferentes tecnologias, obtendo informações sobre seus desempenhos e retorno;
- propicia as ferramentas para a realização de treinamento antes mesmo da planta entrar em operação.

A partir de um modelo matemático já definido e testado experimentalmente, em plantas industriais, piloto ou procedimento de bancada, são conduzidos testes virtuais simulando o comportamento das principais variáveis do processo. Dimian (2003) destaca que é importante ter em mente que as simulações são representações aproximadas da realidade, com certo grau de assertividade, e que o usuário deve sempre avaliar os resultados conforme seu conhecimento do processo.

6.1.1 Simulação de Processos em Treinamento de Operadores

De maneira geral, as simulações utilizadas para a realização de treinamentos operacionais possuem mais modelos do que as simulações de

processos tradicionais, pois devem incorporar as particularidades de segurança e confiabilidade da planta (intertravamentos e proteções), uma vez que a resposta dinâmica deve seguir em tempo real e muito próxima do comportamento real para que se atinja o objetivo principal que é aprimorar as habilidades dos operadores na sala de controle (CAMERON; CLAUSER; MORTON, 2002). De acordo com Cameron, Clauser e Morton (2002) estes simuladores necessitam dos seguintes requisitos:

- modelagem matemática rigorosa, que utilize padrões termodinâmicos apurados ou correlações já verificadas em processos reais;
- métodos de integração numérica que permitam uma resposta rápida e estável;
- simulações robustas das discontinuidades de processo, como as mudanças de fase ou a cavitação em bombas centrífugas, por exemplo;
- Interface gráfica idêntica à utilizada no sistema supervisor, contando também com a possibilidade de atuação por parte de um instrutor;
- apresentação dos resultados em unidades de engenharia, como no software utilizado pelo operador;
- possibilidade de simulação de falhas, posições de válvula, alarmes e atuações de controle;
- tempos de resposta próximos do processo real.

7 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os softwares utilizados para o desenvolvimento do simulador de operação, bem como o modelo de fluxo de processo do sistema de combustão o qual foi baseado o trabalho. São descritos também os intertravamentos e proteções modelados nas aplicações.

7.1 ARQUITETURA DE REDE DO SIMULADOR

A arquitetura de rede proposta para o simulador de operação está mostrada na Figura 8.

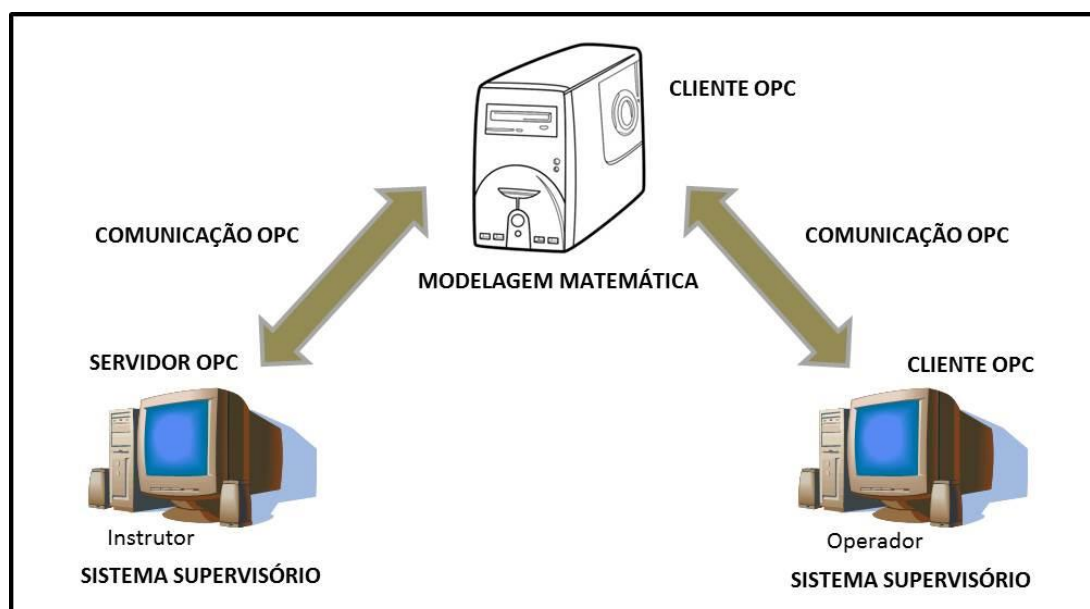


Figura 8: Arquitetura do Modelo de Simulador de Operação para Treinamento
Fonte: Autoria própria (2014).

São utilizadas duas máquinas distintas onde o operador e o instrutor atuam no simulador conforme suas atribuições no treinamento. Cada uma das máquinas executou o sistema supervisório independente e o modelo matemático responsável por simular as respostas do sistema é iniciado no servidor em rede. É possível também, de acordo com a atividade proposta pelo instrutor, e a qualidade da

estação de trabalho e o número de licenças de *software* que ele possui, executar o modelo em sua própria máquina.

O início da execução do modelo matemático só é possível se o servidor *OPC* estiver ativo na lista de tarefas do sistema supervisorio. Esta limitação ocorre porque o *software* atua como cliente e retorna uma mensagem de erro caso não encontre a variável solicitada ao servidor. Durante a simulação este procedimento deve ser respeitado, já que o fechamento do sistema supervisorio durante a comunicação provoca desligamento do *software* que executa o modelo. Esta particularidade não impede a realização do treinamento e pode ser contornada de acordo com os *softwares* escolhidos para o simulador.

7.2 SOFTWARE DE MODELAGEM MATEMÁTICA – *MATLAB/SIMULINK®*

A computação ajuda cada vez mais os profissionais da indústria no que diz respeito ao processamento de dados e simulação de processos, porém linguagens avançadas de programação como *FORTRAN*, *C++* e *PASCAL* são, geralmente, muito complicadas de trabalhar devido ao nível teórico e estrutural complexo, além da difícil aprendizagem (CHENG et al. 2013). Tendo em vista estes argumentos, o presente trabalho adota uma ferramenta comercial capaz de atender aos requisitos de uma simulação confiável de um processo industrial conforme descrito na seção 6. Sendo assim, a ferramenta definida foi o software *MATLAB®*, mais especificamente seu ambiente de simulação e projeto *SIMULINK®*. Esta ferramenta possui blocos com algoritmos de projeto de controle e lógica já formatados, além de ferramentas de comunicação *OPC* que possibilitam a integração com sistemas supervisorios, como mostra a Figura 9.

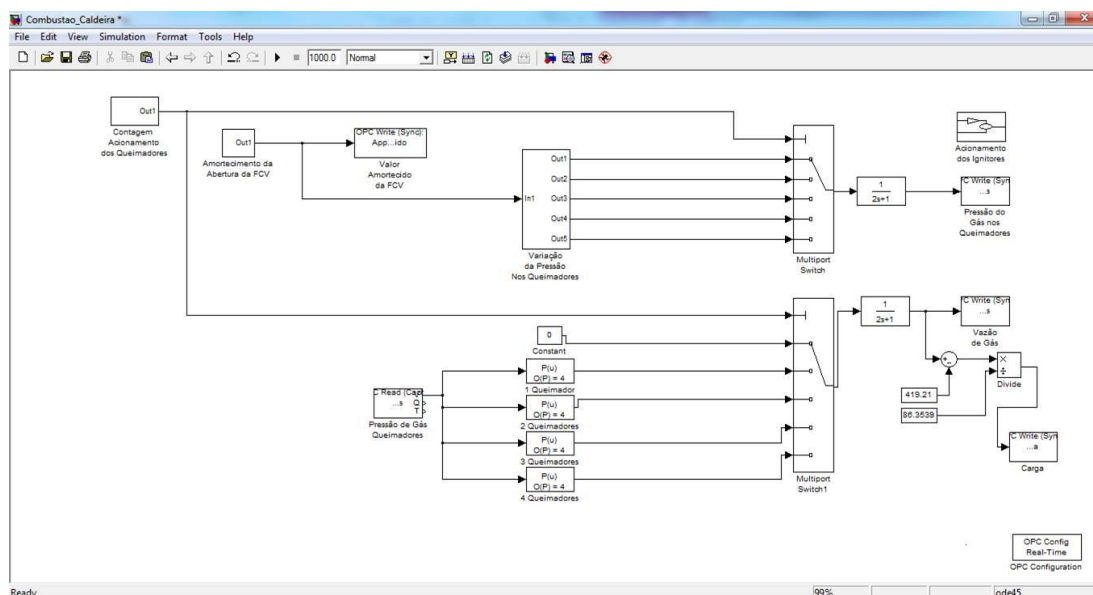


Figura 9: Utilização do OPC Toolbox do Simulink

Fonte: Autoria própria (2014).

A ferramenta do *Simulink* utilizada para a comunicação é o *OPC toolbox*, que permite atribuir *tags* de entrada e saída de dados de forma simples e parametrizada, gerando um cliente *OPC* capaz de se comunicar com qualquer dispositivo que atenda aos requisitos desta interface.

O usuário configura os parâmetros de leitura e escrita buscando o servidor *OPC* disponível, como mostra a Figura 10, e dentro de uma lista atribui um ou mais *tags* que serão lidos ou escritos pelos blocos.

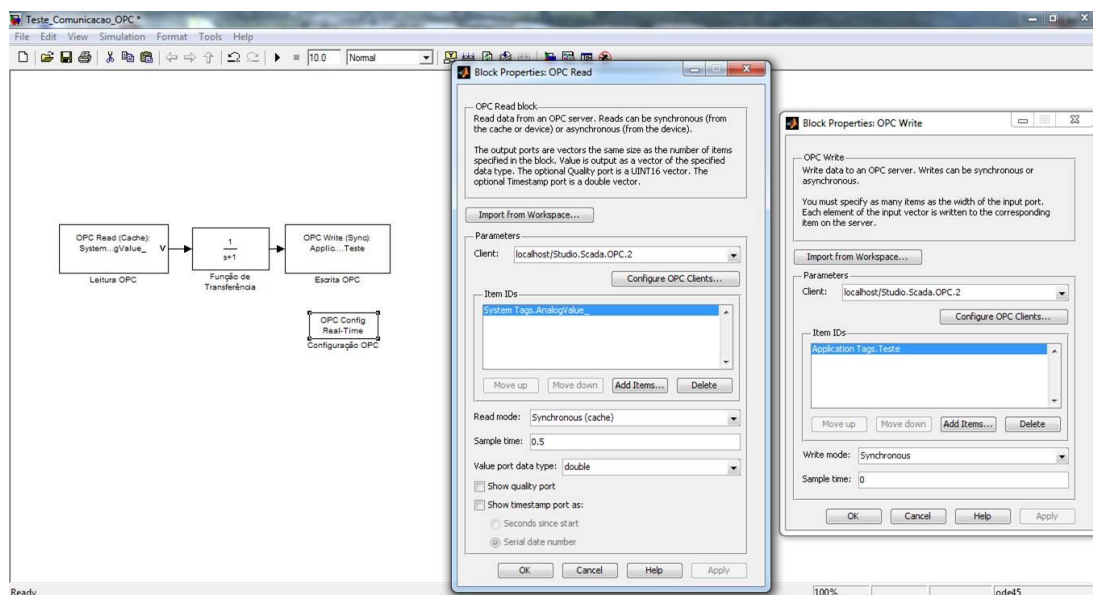


Figura 10: Configuração de Escrita e Leitura OPC no Simulink (OPC Toolbox)

Fonte: Autoria própria (2014).

O tempo de amostragem e o tipo de dado que é fornecido também são configurados, bem como a periodicidade desta coleta e o sincronismo entre os tempos (relógio e tempo de simulação).

O bloco *OPC Read* (bloco de leitura) pode fornecer, a critério do usuário, além do valor do *tag*, a qualidade e a marca temporal (*timestamp*) da coleta, ou seja, em que instante de tempo do intervalo de simulação o último valor foi lido do servidor.

Toda vez que um bloco do *OPC Toolbox* é inserido num projeto, uma caixa de configuração geral é criada automaticamente, onde o usuário pode definir o tempo de resposta do modelo simulado, para que ele forneça dados em sincronia com o tempo real do sistema. Isto significa que há uma simulação tão próxima quanto possível de um processo real, atribuindo ao *SIMULINK®* as propriedades necessárias para compor o modelo de simulador de operação.

7.3 SISTEMA SUPERVISÓRIO – INDUSOFT®

Conforme os requisitos definidos na seção 5.2 deste trabalho, escolheu-se o sistema supervisório *Indusoft®* para o desenvolvimento das interfaces gráficas do

simulador de operação. Além destes atributos, o software pode ser totalmente configurado pelo usuário de forma simples e intuitiva, além de permitir o monitoramento dos resultados gerados no modelo matemático através de comunicação *OPC* gerenciada pelo servidor *HDA OPC SERVER*, iniciado no menu de tarefas *runtime* do software conforme Figura 11.

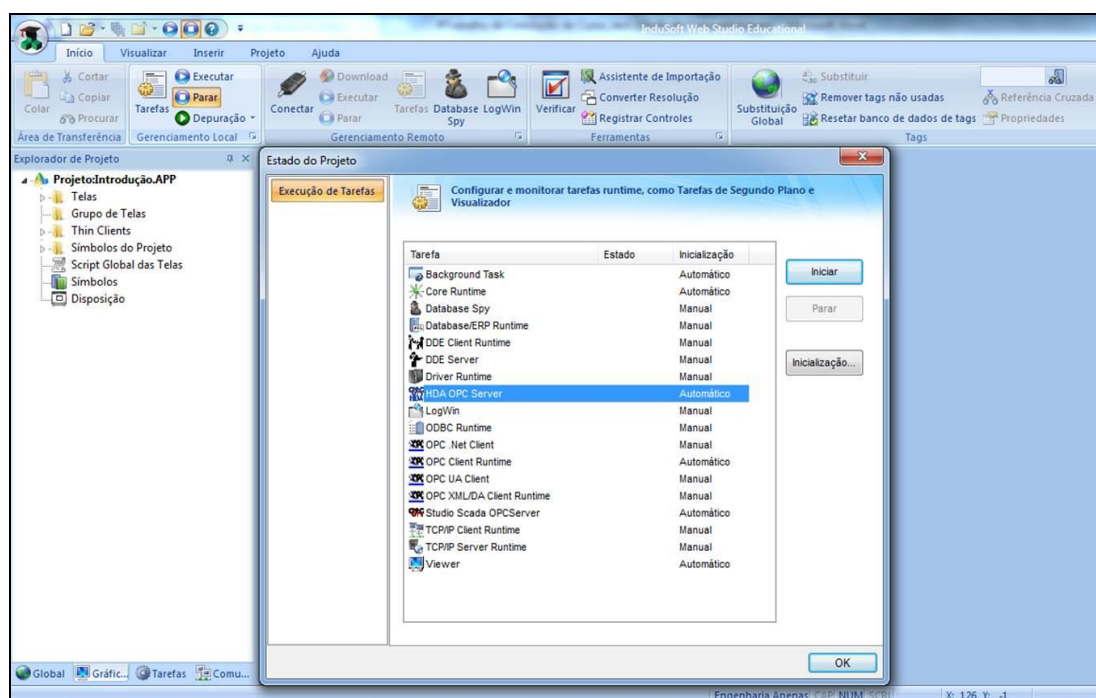


Figura 11: Tela de Inicialização do Servidor OPC

Fonte: Autoria própria (2014).

Após o servidor ser iniciado, todas as variáveis de processo (*tags*) criadas na aplicação são disponibilizadas aos clientes. Ao criar um novo *tag*, a atualização é realizada em tempo real e os clientes acessar os valores disponibilizados instantaneamente.

Além disso, o software possui gerenciador de alarmes e gráficos de tendência customizáveis, além da possibilidade de desenvolver *scripts* em linguagem de programação *VBA®* de acordo com as necessidades do usuário.

7.4 DESCRITIVO DA LÓGICA DO SIMULADOR

O modelo utilizado pelo simulador para obter as respostas de acordo com as ações do operador, do instrutor e as condições das variáveis de processo, além de utilizar a comunicação *OPC* como base para compor a interface entre os dois softwares (*Indusoft®* e *Simulink®*), usa componentes prontos disponíveis em suas bibliotecas, que auxiliam nos cálculos e lógicas do simulador.

As *tags* são os principais elementos fornecidos pelo sistema supervisório. O simulador utiliza dois tipos de lógica para obter os resultados esperados: a maioria das *tags* são do tipo booleana, onde a resposta às ações possui somente dois valores possíveis (0 e 1), e servem principalmente para indicar ações de abertura e fechamento de válvulas e permissões ou negações do processo, como o acendimento dos ignitores e dos queimadores. Também são utilizados *tags* do tipo real, que aceitam valores decimais dentro de uma faixa predeterminada, normalmente de 0 a 100%, e são utilizadas pela válvula de controle e pelas variáveis de processo (pressão, vazão, nível e temperatura).

Já no *Simulink®* a maioria dos recursos utilizados são operadores lógicos de comparação e adição, como os blocos relacionais que comparam o valor das *tags* com valores constantes, enviando sinal 1 caso a afirmação seja verdadeira e 0 se for falsa. Além disso blocos lógicos “E”, que enviam sinal 1 caso todos os sinais de entrada também sejam 1, ou zero em caso contrário, bem como blocos de soma, subtração, multiplicação e divisão também são utilizados.

Algumas variáveis como a movimentação da válvula de controle, variação da pressão nos queimadores e a vazão de gás que está sendo consumida apresentam, na prática, respostas amortecidas à um degrau de entrada. Isso quer dizer que para sair de um patamar e atingir o valor desejado pelo operador, a curva deve ser suavizada. Para simular esse comportamento foram adicionados à saída dos blocos de leitura *OPC* destas variáveis funções de transferência estimadas, que conferem o comportamento exigido, porém não foram levantadas do processo real, funcionando apenas para diferenciar os tipos de resposta.

7.5 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE COMBUSTÃO

O processo de combustão modelado no simulador de operação está detalhado na Figura 12.

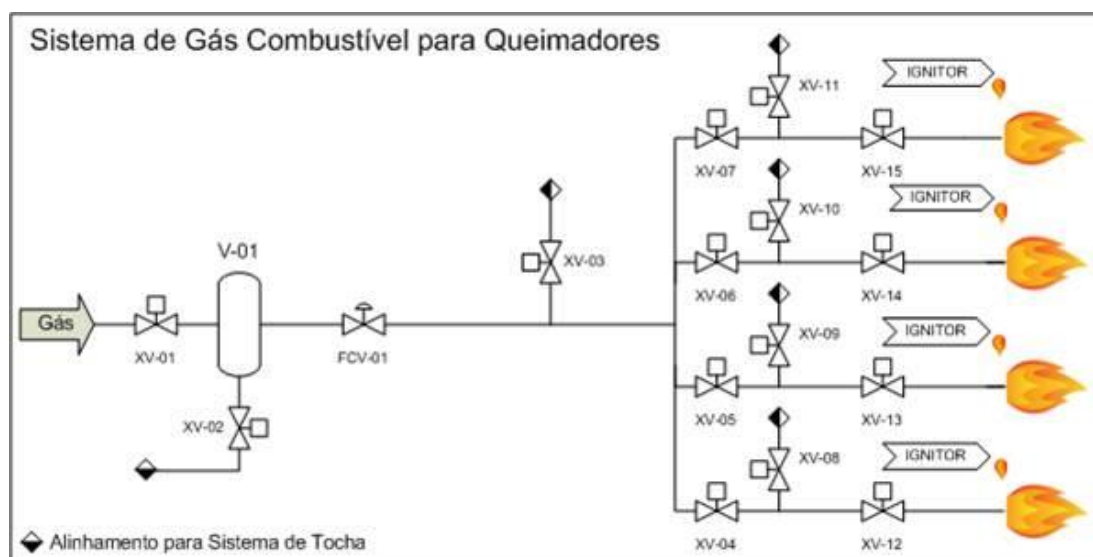


Figura 12: Fluxograma do Sistema de Gás Combustível

Fonte: Autoria própria (2014).

O sistema simulado conta com quatro queimadores de gás combustível, alimentados individualmente. Logo depois do limite de bateria da unidade, onde inicia a derivação que alimenta a caldeira, o gás passa por uma válvula de bloqueio remoto XV-01 e entra no vaso de separação de condensado V-01, responsável por reter partículas de líquido que podem ser carregadas pelo fluxo. A drenagem do vaso pode ser realizada remotamente, através da abertura da XV-02.

Após a passagem pelo vaso o gás segue para a válvula de controle FCV-01, que modula sua abertura para variar a vazão de gás alimentado nos queimadores que estão operando. O controle de vazão está relacionada diretamente com a pressão de gás a jusante da FCV-01, que deve ser controlada pra garantir a integridade da chama. A partir da FCV-01 tem-se uma série de válvulas de bloqueio remoto utilizadas para permitir a passagem do gás, individualmente, para cada um dos queimadores, além de válvulas utilizadas para a despressurização dos trechos, mais conhecidas como *vents*, alinhadas para um sistema de tocha, onde o excesso de gás é queimado garantindo a segurança do processo.

Para iniciar a combustão tem-se um sistema de gás separado para os queimadores pilotos ou ignitores, conforme Figura 13.

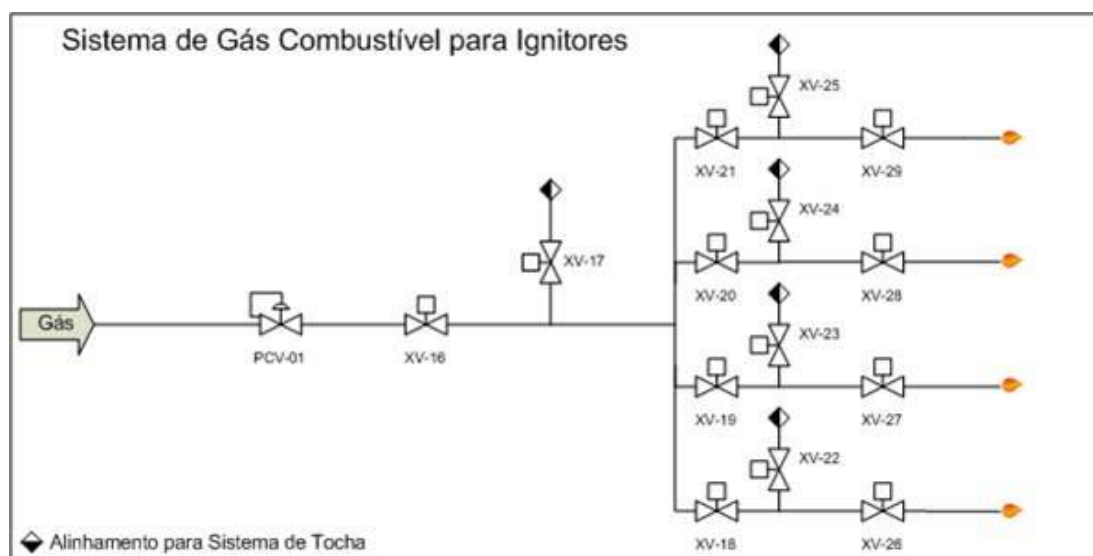


Figura 13: Sistema de Gás Combustível para Ignitores

Fonte: Autoria própria (2014).

Através de uma derivação secundária, o mesmo gás combustível que alimenta a caldeira é utilizado para acender a chama piloto individual dos queimadores. Ao passar o limite de bateria da caldeira, a pressão do ignitor é regulada por uma válvula auto-operada, ou seja, seu valor de saída é ajustado manualmente e a válvula regula-se automaticamente para absorver as variações de entrada.

Conforme observado também no sistema de gás combustível para os queimadores, após o controle estão instaladas diversas válvulas de bloqueio remoto para permitir a passagem do gás, além de *vents* alinhados para um sistema de tocha.

7.6 PROTEÇÕES E INTERTRAVAMENTOS DO SISTEMA DE COMBUSTÃO

A operação do sistema de combustão de uma caldeira possui particularidades que, se não forem devidamente observadas e controladas, podem

promover situações que colocam em risco a segurança operacional da planta e de seu entorno.

Uma destas particularidades é o controle da pressão de gás nos queimadores e na chama piloto, que deve ser mantida dentro de uma faixa (*range*) segura, uma vez que valores muito baixos podem provocar uma falha na ignição, ao passo que valores muito altos provocam a extinção da chama. Estas faixas variam de acordo com o projeto do queimador, sendo que sua capacidade, arranjo e estrutura são alguns dos fatores que o determinam. Para ignitores de caldeiras de grande porte, por exemplo, com capacidade acima de 150 ton/h de vapor superaquecido a pressões acima de 80 kgf/cm², valores abaixo de 0,05 kgf/cm² devem ser evitados. Por salvaguarda, ao ocorrer um incidente deste tipo durante a operação o sistema deve ser levado para seu estado mais seguro, onde a alimentação de combustível é bloqueada e as linhas purgadas pelos *vents*, eliminando o gás contido na tubulação e apagando a chama.

Outra particularidade está relacionada às falhas durante o acendimento do queimador. Neste caso são utilizados detectores de chama, que podem ser acionados de duas formas: através da sensibilização de fotocélulas com a emissão de raios ultravioletas ou pela variação da resistência do metal quando aquecido (*flame rod*).

Com o objetivo de evitar a falha espúria, caracterizada como a falha que leva o equipamento à parada sob uma condição onde inexistente perigo, os sistemas de controle modernos utilizam três fotocélulas para cada queimador, e só indicam chama no supervisão quando dois ou mais deles enviarem sinais positivos para sua sensibilização, no procedimento conhecido como votação dois de três. Se esta condição não for atendida, o queimador também é levado a seu estado mais seguro, com o apagamento da chama e bloqueio da alimentação, além da purga das linhas.

É indispensável que o ignitor seja ligado primeiro e apenas após esta confirmação seja permitido o alinhamento de gás para os queimadores. A falha de chama com as válvulas automáticas ou as válvulas de *by-pass* no campo abertas permitem que o gás seja insuflado para dentro da caldeira, podendo acumular e vir a explodir se houver ignição.

8 APRESENTAÇÃO DO SIMULADOR

A apresentação do simulador foi dividida em três seções. Na seção 8.1 são descritos os detalhes que compõem as telas do sistema supervisório. Já na seção 7.4 são descritos os artifícios utilizados no modelo matemático e lógico para aproximar as respostas obtidas no simulador com o processo real. E finalmente, na seção 8.2 o comportamento do simulador é descrito, relacionando não só as respostas de processo, mas como o modelo reproduz estes valores.

8.1 DESCRITIVO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO

O sistema supervisório do modelo de simulador para treinamento de operadores foi dividido em três telas principais: tela inicial ou de abertura, tela de instrutor e tela de operador.

8.1.1 Tela Inicial

Na tela inicial ou de abertura, o profissional irá selecionar qual dos dois perfis é mais adequado à sua função no treinamento. No perfil de instrutor (botão “Acesso de Instrutor”), o profissional possui à sua disposição as ferramentas para simular condições normais e anormais de processo, gerando sinais que devem ser interpretados e controlados pelos operadores. No perfil de operador (botão “Acesso de Operador”), o processo é simulado completamente, seguindo a modelagem e as lógicas definidas no *Simulink*®, e os resultados das intervenções do instrutor, bem como suas próprias atuações, são mostradas nos elementos de monitoramento distribuídos pela tela. A configuração é mostrada na Figura 14.



Figura 14: Tela de Abertura do Simulador

Fonte: Autoria própria (2014).

O acesso é realizado por uma tela de *login* onde o operador ou instrutor, após digitar seu nome de usuário e senha definidos pelo desenvolvedor da aplicação, é direcionado à sua tela correspondente. É possível sair da aplicação clicando no botão localizado no canto superior direito da tela, sendo que este procedimento não cancela a simulação, apenas desliga a aplicação.

8.1.2 Tela do Instrutor

O instrutor é o responsável por realizar as alterações nas variáveis de processo de modo a observar e avaliar o comportamento de cada operador quando confrontado com situações normais e anormais de operação. No simulador, este perfil de profissional possui uma tela exclusiva, como mostra a Figura 15.

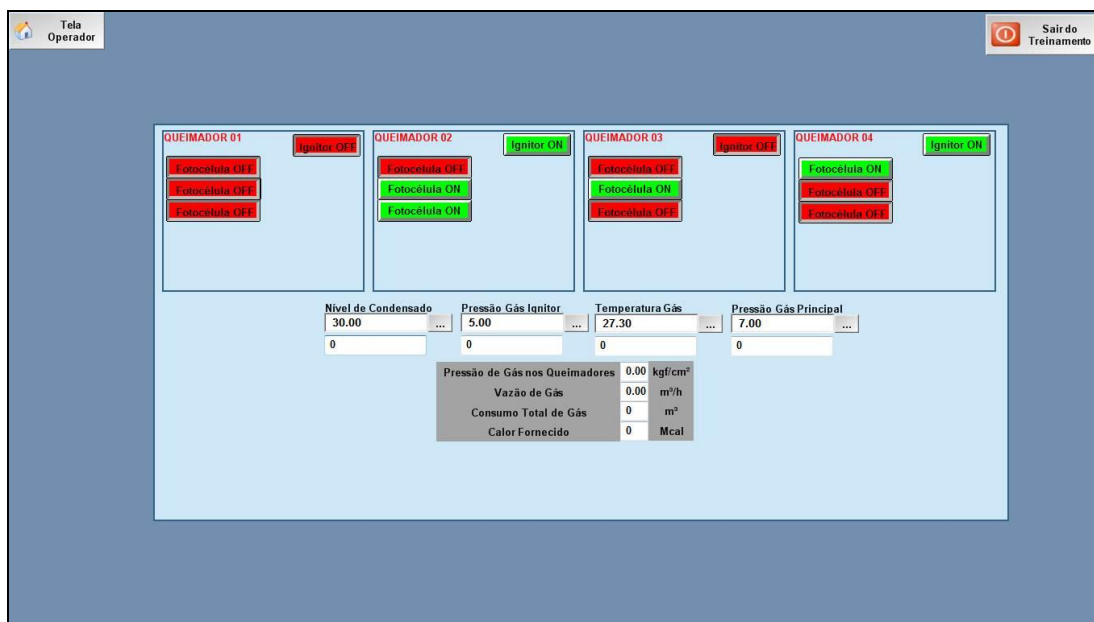


Figura 15: Tela do Instrutor

Fonte: Autoria própria (2014).

A tomada de decisão do operador durante o desenvolvimento do treinamento deve ser baseada nas condições de processo inseridas pelo instrutor. A partir desta tela, o instrutor liga e desliga as fotocélulas e o ignitor e controla manualmente os valores do nível de condensado do vaso de detecção V-01, a pressão de gás na linha do ignitor, bem como a pressão e a temperatura de entrada do gás principal. Além disso acompanha a pressão de gás nos queimadores (a jusante da válvula de controle FCV-01) e a vazão e consumo de gás durante a simulação, variáveis que estão relacionadas diretamente com às ações do operador que está sendo treinado, e pode servir de critério para a avaliação final do instrutor.

O instrutor também pode acessar a tela do operador para observar seu comportamento em tempo real. Para isso deve selecionar o botão localizado no canto superior esquerdo da tela. Caso queira sair do simulador, deve selecionar a opção que aparece no canto superior direito.

8.1.3 Tela do Operador

O operador é o profissional chave na composição do treinamento utilizando o simulador. Seu objetivo é observar o comportamento do sistema durante suas diversas etapas de operação e, com base nessas informações, agir de forma segura e assertiva para controlar e extrair a máxima eficiência do processo.

Na tela principal do sistema é possível visualizar todas as válvulas e variáveis de processo do sistema, inclusive a válvula de controle de gás, como mostra a Figura 16.

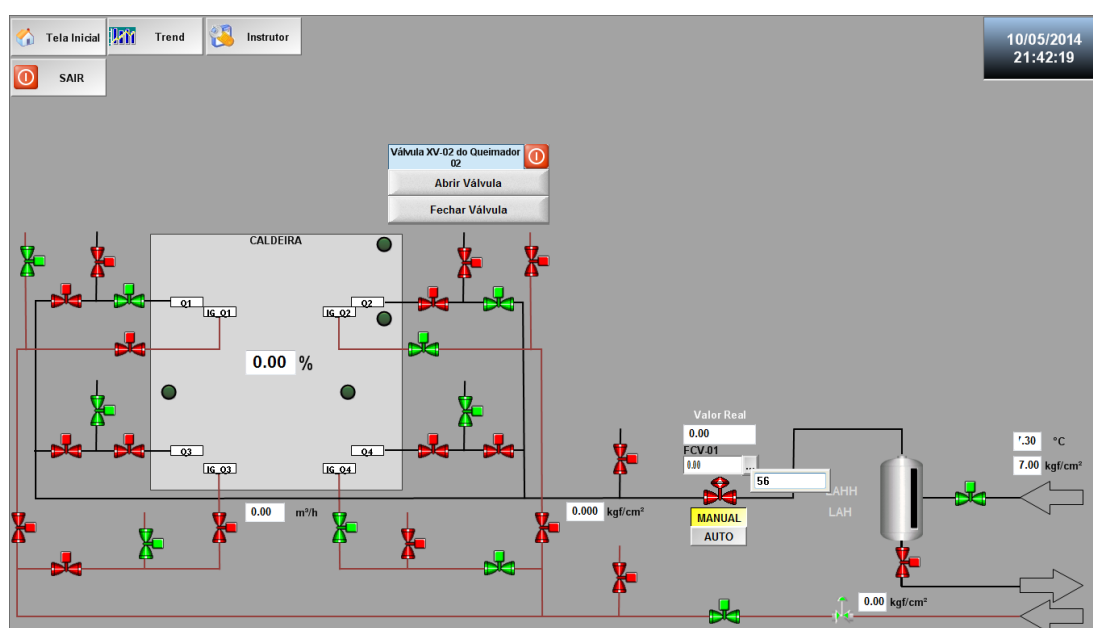


Figura 16: Tela Principal de Operação do Simulador

Fonte: Autoria própria (2014).

Cada uma das válvulas de bloqueio remoto possui uma janela de atuação associada (*faceplate*) onde estão configurados os botões de comando para sua abertura e fechamento. Conforme a opção escolhida pelo operador, a válvula muda de cor (verde a válvula está aberta e vermelha está fechada), sendo possível fechar a janela utilizando o botão de *shutdown* localizado do lado direito. Estas válvulas só possuem duas posições, ou totalmente abertas ou totalmente fechadas, e são chamadas de válvulas *ON/OFF*.

Já a válvula de controle FCV-01 possui abertura segmentada, partindo da posição mais restritiva (100% fechada) até a mais permissiva (100% aberta). Dentro

desta faixa ela aceita quaisquer valores entre 0 e 100, inclusive decimais, que são inseridos pelo operador após clicar no botão contendo reticências (“...”) localizado em cima da válvula. Sua cor também altera de acordo com a posição, sendo verde quando está aberta e vermelha quando está fechada, porém uma dinâmica de variação de tonalidade quando atinge valores próximos de zero diferencia seu comportamento das outras válvulas. As variáveis de processo monitoradas são expressas em unidades de engenharia. O operador atua na abertura e fechamento das válvulas e na seleção do valor de abertura da válvula de controle. A indicação do nível do vaso V-01 é realizada por uma barra de indicação (*bargraph*) que varia sua posição conforme os valores apresentados. Neste equipamento também é possível observar duas indicações de alarme, sendo uma para nível alto (LAH, do inglês, *level alarm high*) e outra para nível muito alto (LAHH, do inglês *level alarm high-high*). O operador também pode acompanhar os gráficos de tendência das principais variáveis a partir da seleção do botão “Trend” no canto superior esquerdo. Os gráficos aparecem no meio da tela como mostra a Figura 17.

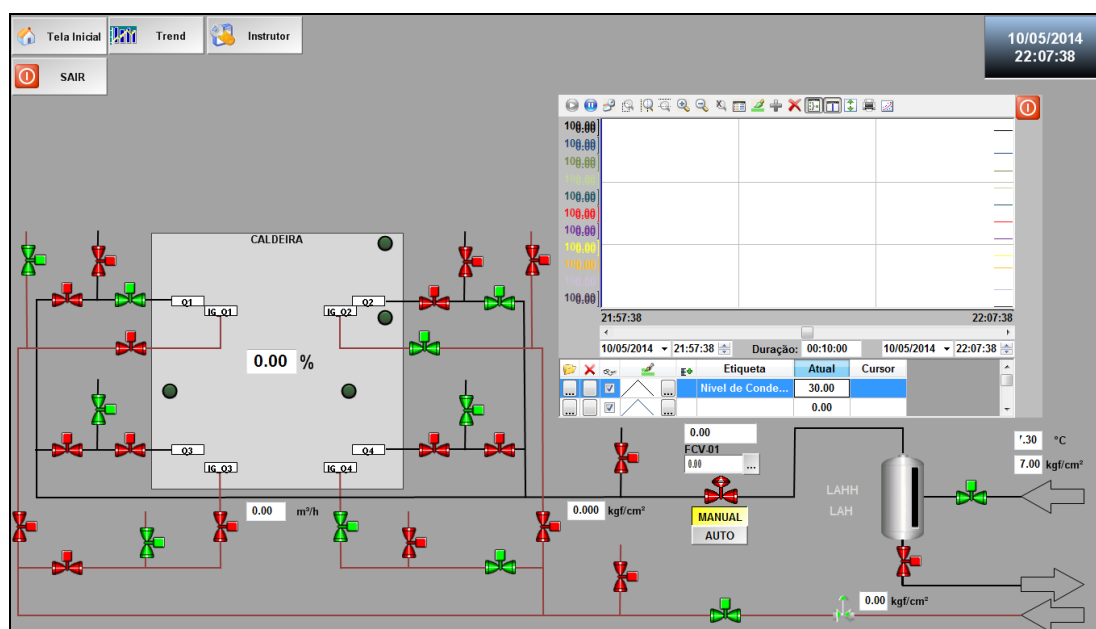


Figura 17: Tela de Operação com a Visualização dos Gráficos de Tendência.

Fonte: Autoria própria (2014).

8.2 LÓGICA DE OPERAÇÃO

Esta seção apresenta, de forma sequencial, os principais procedimentos operacionais simulados, e descreve como é a resposta do modelo em suas diferentes configurações.

A XXXXXX mostra um fluxograma geral da aplicação.

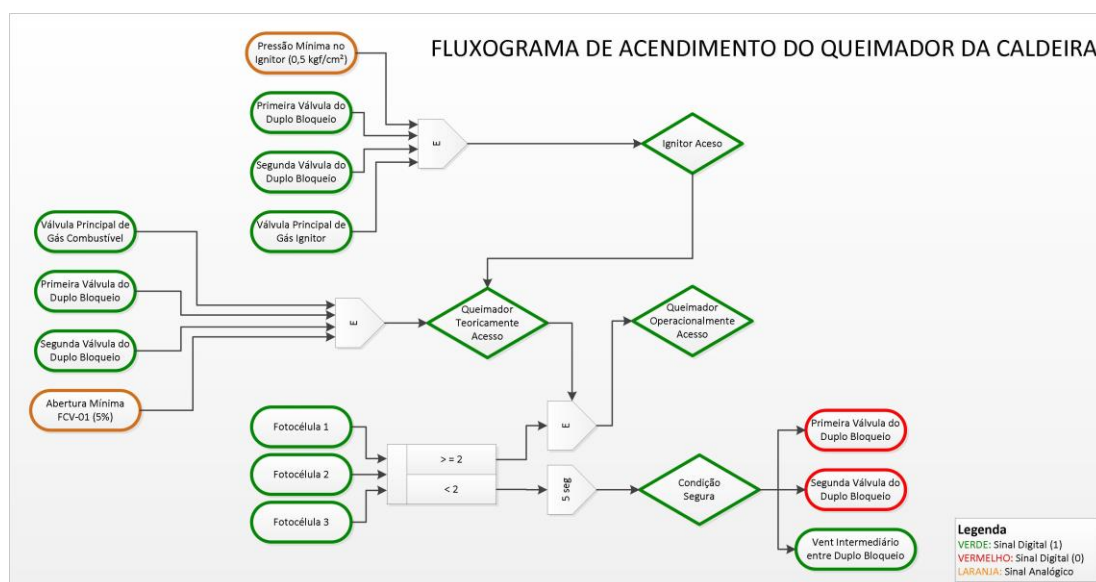


Figura 18: Fluxograma de Acendimento de um Queimador

Fonte: Autoria própria (2014).

O modelo matemático desenvolvido no *Simulink*® utilizando o *OPC Toolbox* para realizar a comunicação entre o modelo e o sistema supervisório descrito na seção 8.1 é desenvolvido com base no funcionamento real, porém simplificado, de um sistema de combustão de caldeira industrial. Esta seção descreve a resposta do modelo de acordo com os diferentes procedimentos que podem ser simulados na ferramenta.

8.2.1 Acendimento de um Ignitor

Ao iniciar a simulação, os blocos de leitura e escrita *OPC* estão comunicando com o sistema supervisor, visto que o servidor é iniciado automaticamente quando o *Indusoft®* é aberto. Desta forma, ao acessar a respectiva tela, os valores das variáveis de processo do sistema são disponibilizados instantaneamente, tanto para o instrutor e quanto para o operador.

Inicialmente todas as válvulas detalhadas na tela do operador estão fechadas, inclusive a de controle, e somente as variáveis de processo associadas às condições do gás na linha de alimentação que segue para os queimadores e ignitores (pressão e temperatura) possuem valor diferente de zero e devem ser especificadas manualmente pelo instrutor.

Os queimadores devem ser partidos em sequência, começando do queimador 01 até o queimador 04. Para partir o primeiro queimador, o operador deve abrir a válvula da linha principal do ignitor e, em seguida, abrir as duas válvulas de bloqueio da derivação do ignitor correspondente. As ações devem ser realizadas ordenadamente, e apenas quando o modelo identificar a abertura das três válvulas é que o sinal para acender a chama do ignitor será liberado, conforme mostrado na Figura 19.

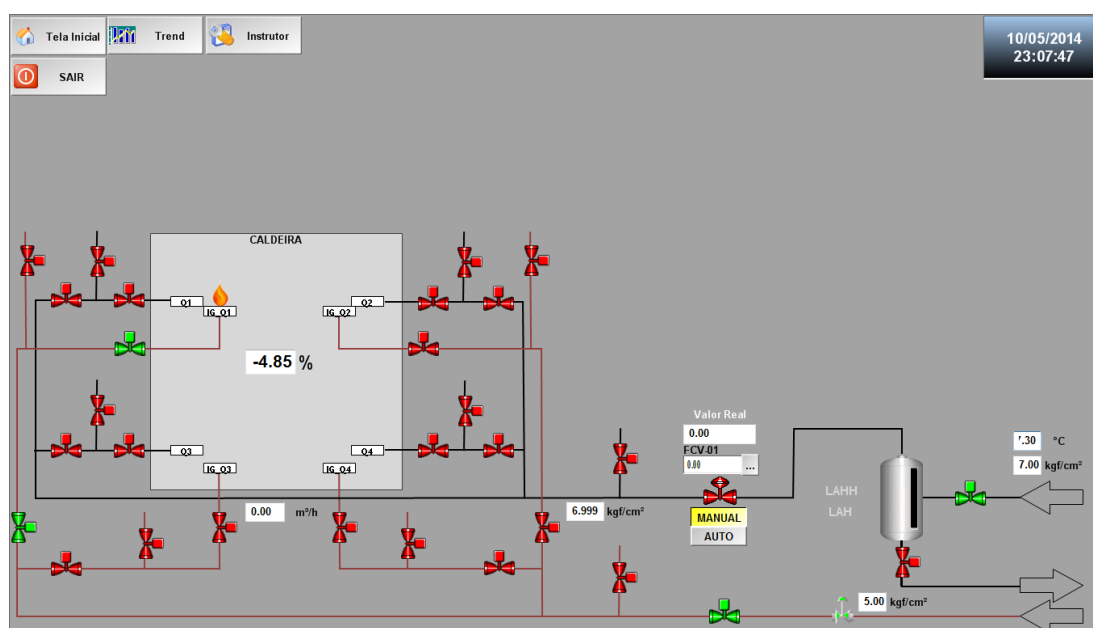


Figura 19: Acendimento do Ignitor

Fonte: Autoria própria (2014).

Na tela do instrutor aparece a indicação de que o ignitor foi acionado com êxito. Cada abertura de válvula envia o valor um através de um bloco *OPC* de leitura para um operador lógico “E” no modelo matemático, que por sua vez envia o valor um na saída somente se todas as condições de entrada forem atendidas. Caso negativo, a resposta será sempre zero. Este sinal é enviado novamente para o sistema supervisor através de um bloco de escrita *OPC*, independente de seu valor, permitindo ou não que a chama fique visível para o operador se o procedimento foi realizado corretamente.

8.2.2 Acendimento de um Queimador

Com o ignitor aceso o operador inicia o alinhamento do gás para os queimadores, abrindo a válvula a montante do vaso V-01 e observando se não há formação de condensado dentro do vaso, através da barra de nível e dos alarmes visuais ao lado do equipamento. Esta variável é manipulada pelo instrutor, que pode avaliar o operador para o caso de chegada de condensado pela linha, fator de alto risco já que, se a corrente gasosa carregar grandes quantidades de líquido para o queimador, poderá causar a explosão da caldeira devido à expansão do volume do combustível quando queimado. Para retirar este líquido o operador deve abrir a válvula automática de drenagem e observar a redução do nível do condensado até um valor próximo de zero.

Seguindo o procedimento de acendimento dos queimadores, o próximo passo é abrir a válvula de controle FCV-01. Seu valor não deve ser menor que 5% para a partida do queimador 01, valor este que corresponde à pressão de 0,08 kgf/cm² no queimador. Se este valor mínimo não for atingido, por questões de segurança não haverá chama no queimador, já que é possível que a chama piloto não consiga fornecer calor suficiente para a ignição, e o gás seja insuflado para dentro da caldeira.

Com a válvula de controle em sua posição mínima (condição base), o operador pode iniciar a abertura dos bloqueios da linha de alimentação do queimador 01. Quando todos estiverem abertos o instrutor receberá a indicação de

chama, que informa que o operador realizou todos os procedimentos corretamente. Neste instante, o instrutor pode acionar as fotocélulas, como mostra a Figura 20, e este procedimento indica ao operador que a chama do queimador está ativa conforme Figura 21.

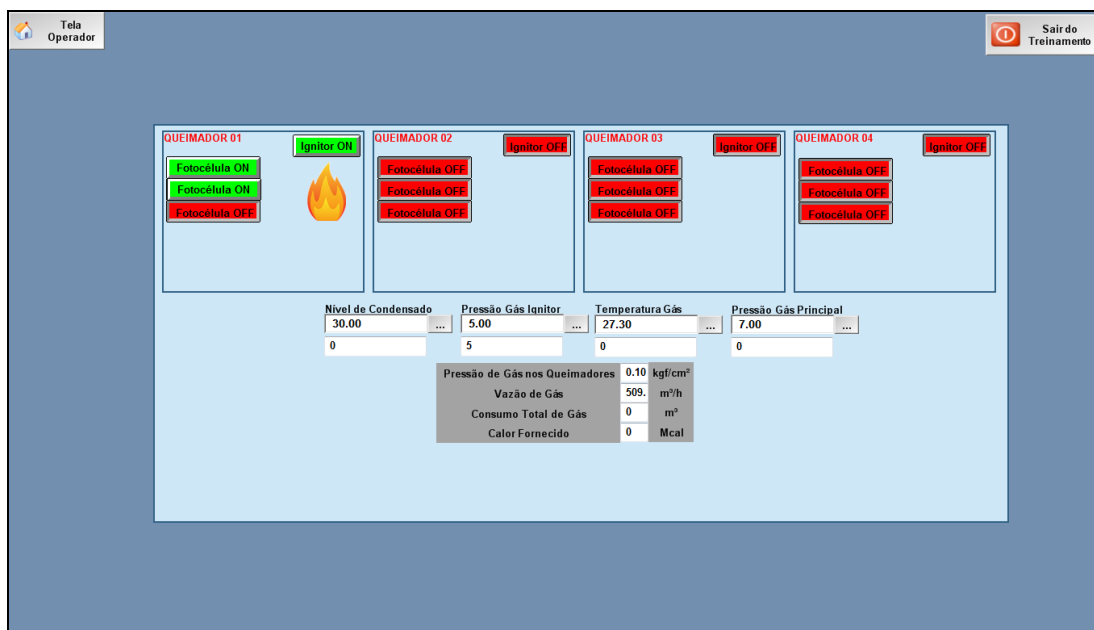


Figura 20: Acionamento do Queimador através da Tela do Instrutor.

Fonte: Autoria própria (2014).

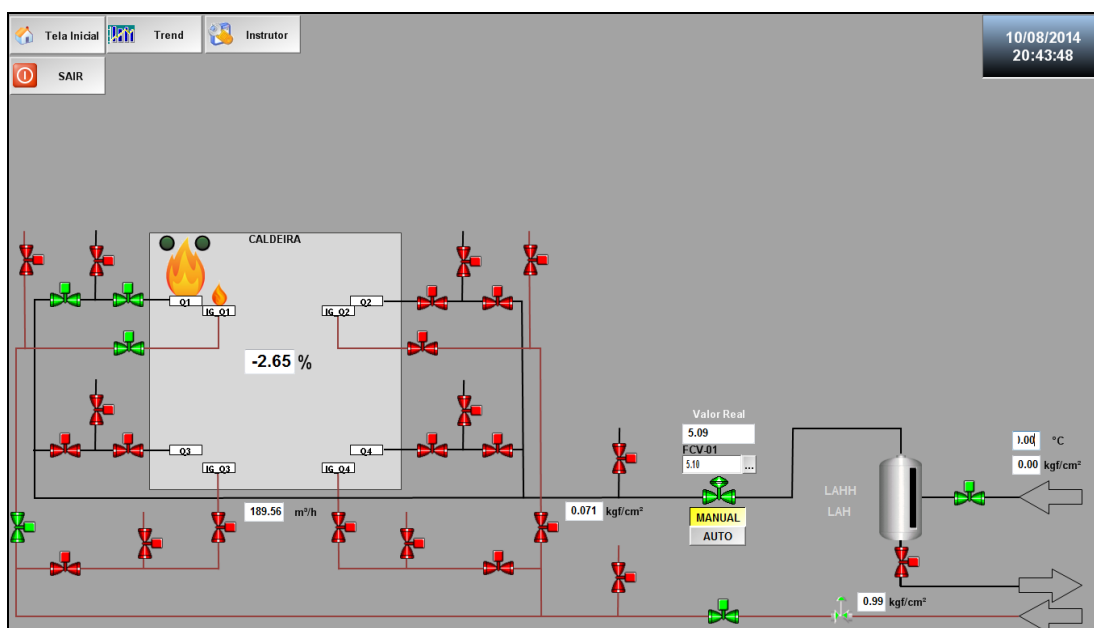


Figura 21: Acendimento do Queimador através da Tela do Operador.

Fonte: Autoria própria (2014).

A Figura 22 mostra o estado da caldeira quando entra em modo seguro por falha nas fotocélulas.

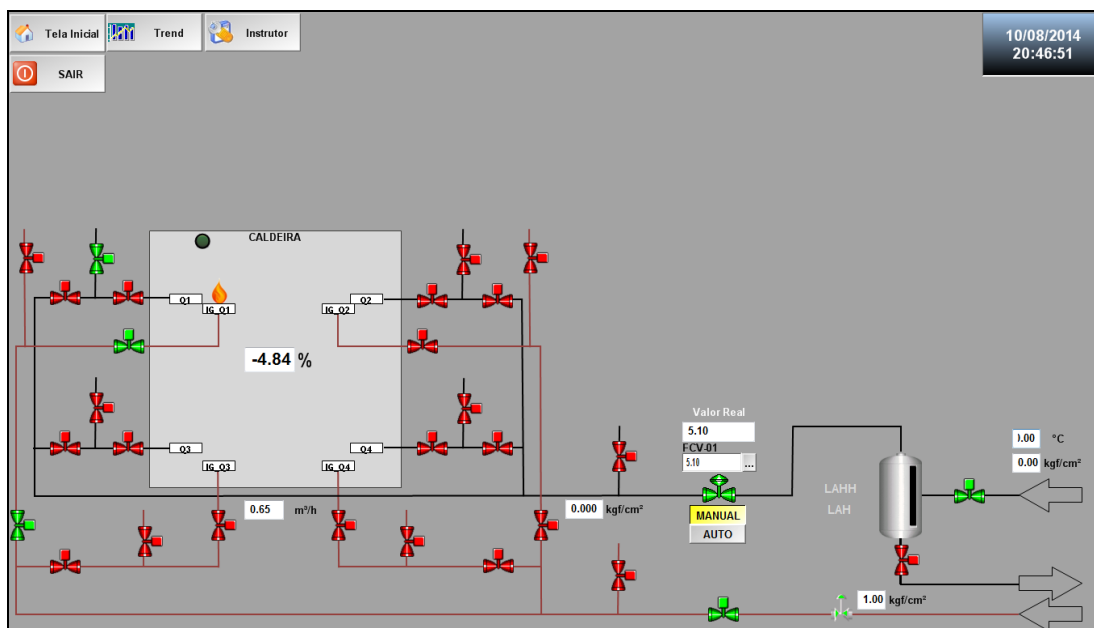


Figura 22: Posição de Falha de Chama causada por Falha nas Fotocélulas

Fonte 1: Autoria própria (2014).

São três as fotocélulas por queimador (*tags* padrão do tipo booleana), representadas por círculos verdes acima da chama, sendo necessário o envio do valor um de, pelo menos, duas delas para que o modelo confirme o acendimento da chama. Se o instrutor não realizar este procedimento dentro do intervalo de cinco segundos após o operador alinhar completamente o gás para o queimador, o mesmo entra em falha e segue para seu estado seguro, com o fechamento dos bloqueios e abertura do *vent*,

O procedimento de partida dos queimadores 02, 03 e 04 segue o mesmo padrão, porém é importante o operador monitorar a pressão do coletor à jusante da válvula de controle. Os queimadores simulados possuem a faixa segura de operação entre 0,08 kgf/cm² e 0,74 kgf/cm². A forma mais segura de partir um novo queimador é elevar a pressão até seu valor máximo através da abertura da válvula de controle, e só quando atingir o patamar é que o operador deve partir o próximo queimador. Esta prática garante que não haverá queda brusca na pressão do coletor, o que poderia causar a extinção da chama.

Em sua carga máxima a caldeira opera com vazão de 9054,6 m³/h e sua carga mínima é de 419,21 m³/h.

9 CONCLUSÃO

Cada vez mais as indústrias estão focando seus esforços no aprimoramento da segurança operacional, buscando através do investimento nos profissionais tornar os processos mais efetivos e confiáveis. No caso das caldeiras industriais, onde sua operação ocorre sob condições críticas de pressão e temperatura, o aprimoramento dos profissionais envolvidos em sua operação pode evitar que situações de grande risco aconteçam.

A simulação de operação coloca o operador frente a frente com condições anormais de processo. A oportunidade de realizar este tipo de treinamento confere a eles as ferramentas para contornar estas situações de forma assertiva, garantindo a integridade da equipe, da indústria e de seu entorno.

Neste contexto, o desenvolvimento de um modelo de simulador de operação utilizando *softwares* comerciais, e de domínio da maioria dos profissionais de engenharia de processo e automação, contribui para o aperfeiçoamento das equipes que trabalham na indústria, pois a aplicação mostrou-se efetiva na reprodução de condições operacionais reais.

A utilização do protocolo de comunicação *OPC*, largamente utilizada na automação industrial, mostrou-se também eficaz para promover a interface entre as diferentes aplicações e envolvidas.

As simulações do acendimento da chama piloto e do queimador responderam satisfatoriamente às condições de processo modeladas.

REFERÊNCIAS

- ASTROM, Karl J.; BELL, Rod D. Drum-Boiler Dynamics. **Automatica**. San Francisco, EUA. ed. 36. p. 363-378. 2000.
- BAZZO, Edson. Geração de Vapor. 2ª ed. Florianópolis. Editora da UFSC. 1995.
- BEGA, Egídio A. Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003.
- BOYER, Stuart A. SCADA Supervisory Control and Data Acquisition. 3ª ed. Durham, USA. ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society. 2004.
- CAMERON, D.; CLAUSER, C.; MORTON, W. Dynamic Simulators for Operator Training (chapter 5.3). **Software Architectures and Tools for Computer Aided Process Engineering**. v. 11. p. 393 – 431. 2002.
- CHENG, Fuxiang et al. MATLAB simulation of preparation of Sm-loaded extractant directly from HEH(EHP). **Journal of Rare Earths**. v. 31. n. 3. p. 302 – 307. 2013.
- DIMIAN, Alexandre C. Integrated Design and Simulation of Chemical Processes. 1ª ed. Amsterdam. Elsevier. 2003.
- DONGIL, Shin; VENKAT, Venkatasubramania. Intelligent tutoring system framework for operator training for diagnostic problem solving. **Computers & Chemical Engineering**. Inglaterra, v. 20, sup. 2, p. S1365 – S1370, 1996.
- FONSECA, Marcos. Comunicação OPC – Uma abordagem prática. **VI Process Automation Seminar**. 2002. Disponível em: <http://www.cpdee.ufmg.br/~seixas/PaginaSDA/Download/DownloadFiles/OPCMarcosFonseca.PDF> . Acesso em: 14 set. 2014.
- GALLOWAY, Brendan; HANCKE, Gerhard P. Introduction to Industrial Control Networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**. v. 15. p. 860 – 880. 2013.
- GLIGOR, Adrian; TURC, Traian. Development of a service oriented SCADA system. **Procedia Economics and Finance**. v. 3. p. 256 – 261. 2012.
- GREGERSEN, Nils Petter; BREHMER, Berndt; MORÉN, Bertil. Road safety improvement in large companies. An experimental comparison of different measures. **Accident Analysis & Prevention**. Inglaterra, v. 28, ed. 3, p. 297 – 306, maio. 1996.
- HERTZBERG, Terje; MOE, Storker. Advanced computer architectures applied in dynamic process simulation: a review. **Computers & Chemical Engineering**. v. 18. s. 1. p. S375 – S384. 1994.
- HESELTON, Kenneth. Boiler Operator's Handbook. 1. ed. Lilburn, USA. The Fairmont Press, 2005.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Selection, specification, design and use of various nuclear power plant training simulators**. Austria, 1998. 64 p.
LAWN, Christopher J. *Principles of Combustion Engineering for Boilers*. 1ª Ed. Nova Iorque. Academic Press. 1987.

MARQUES, Francisco de A. P. *Modelagem e Controle de Nível do Tubulão de uma Caldeira de Vapor Aquatubular de uma Refinaria de Petróleo*. 2005. 130 f.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR-13: Manual Técnico de Caldeiras e Vasos de Pressão**. Brasília, 2006.

MORGAN, Stephen, SENDELBACH, Susan; STEWART, Willian. Improve process training with dynamic simulation. **Hydrocarbon Processing**. ed. 73. p. 51-60. 1994.

NAUMAN, Bin Ali; PETERSEN, Kai; WOHLIN, Claes. A systematic literature review on the industrial use of software process simulation. **The Journal of Systems and Softwares**. *Article in Press*. 2014.

OPC FOUNDATION. Disponível em: <https://opcfoundation.org/>. Acesso em: 14 set. 2014.

OPC TECHNICAL OVERVIEW. Start Magazine, Itália. Jan/fev 1998.

PUNTE, Sophie et al. Energy Efficiency Guide for Industry in Asia - Thermal Equipment: Fuels and Combustion. **United Nations Environment Programme (UNEP)**. Tailândia. 2006.

RAO, Ming; WEN, Jun. Human, machine and management integration through in-time knowledge processing to ensure process operation safety. **Process Systems Engineering**. China, v. 15, p. 1382–1387, 2003.

RAO, Ming; WEN, Jun; ZHANG, Yan. Incident Prevention Training Simulator. **Process Systems Engineering**. China, v. 15, p. 1472–1477, 2003.

REED, Robert D. *Furnace Operations*. 3 ed. Houston, USA: Gulf Publishing Co. 1981.

RIVERA, Ray; PARADISE, Andrew. State of the industry report. **American Society for Training and Development**. Estados Unidos, 2006.

ROBSON, Linda et al. A systematic review of the effectiveness of training & education for the protection of workers. **The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)**. Estados Unidos, 2010.

ROSÁRIO, João Maurício. *Automação Industrial*. 1ª ed. São Paulo. Editora Baraúnas. 2009.

SCADABR. Disponível em: www.scadabr.com.br. Acesso em: 18 set. 2014.

SHANKAR, K. Gowri. Control of Boiler Operation using PLC – SCADA. **International MultiConference of Engineers and Computer Scientists**. v. 2. 2008.

STRAUSS, Cobus. SCADA Systems. **Practical Electrical Network Automation and Communication Systems**. p. 108 – 118. 2003.

YANG, Shuang-hua; YANG, Lili; HE, Chao-hong. Improve Safety of Industrial Processes Using Dynamic Operator Training Simulators. **Process Safety and Environmental Protection**. ed. 6. v. 79. p. 329 – 338. 2001.