

JULIANA GUTIERREZ

Nota final
8,7 (a todo o custo)
Wamy

**PROCEDIMENTOS PARA O PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE HÍBRIDO
DE CALDEIRAS**

**Monografia apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a conclusão do
curso de Engenharia Mecatrônica**

Orientador: Prof. Dr. Diolino Jose dos Santos Filho

FICHA CATALOGRÁFICA

Gutierrez, Juliana
Procedimentos para o projeto do sistema de controle híbrido
de caldeiras / J. Gutierrez. -- São Paulo, 2005.
24 p.
Trabalho de Conclusão de Curso - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.
1. Caldeiras (Máquinas). 2. Projeto. I. Universidade de São Paulo.
II. Escola Politécnica. III. Departamento de Engenharia Mecânica. IV.

**São Paulo
2005**

Agradecimentos

Ao Dr. Diolino Jose dos Santos Filho, pela sua constante orientação e permanente incentivo para o desenvolvimento deste trabalho.

A Dr. Cristina Toshie Motohashi Matsusaki pelas sugestões e contribuições realizadas durante o desenvolvimento do trabalho.

INDICE

Lista de Figuras	iii
Lista de Símbolos	iv
Lista de Abreviaturas.....	v
1 Introdução.....	8
1.1 Objetivo.....	8
1.2 Motivação.....	8
1.3 Organização do Texto.....	9
2 A caldeira	10
2.1 Funcionamento	12
2.2 Sistema de Controle.....	15
2.2.1 Sistema de Controle de Variáveis Contínuas	15
2.2.2 Sistema de Controle de Variáveis Discretas.....	16
3 Classificação dos Sistemas.....	17
3.1 Sistemas SVC e SED.....	17
3.2 Sistemas Híbridos.....	18
3.2.1 Definições.....	18
3.2.2 Aplicações de Sistemas Híbridos	19
4 Modelagem de Sistemas.....	21
4.1 Modelagem de Sistemas Híbridos.....	21
4.1.1 Modelagem por Autômatos Finitos.....	22
4.1.2 Modelagem por Redes de Petri	23
4.1.2.1 Redes de Petri Híbrida.....	24
4.1.3 Modelagem com Subsistemas Contínuos e Discretos.....	24
5 Procedimentos para o Projeto.....	30
5.1 Simulação	31
5.2 Modelagem e Simulação da Parte Contínua.....	32
5.3 Modelagem da Parte Discreta.....	40
5.3.1 Estudo do Objeto de Controle	41
5.3.2 Levantamento e Análise das Funções de Controle.....	43
5.3.3 Definição do fluxo das funções de controle	49
5.3.4 Modelos.....	53
5.3.4.1 Mark Flow Graph	53
5.3.4.2 Simulação	56
6 Conclusão.....	64
7 Bibliografia.....	66

Lista de Figuras

Figura 1: Caldeira.....	11
Figura 2: Diagrama esquemático do objeto de controle.....	14
Figura 3: Termostato descrito por autômato finito.....	23
Figura 4: Modelo descontínuo.....	25
Figura 5: Sistema em malha fechada para tanque 1	27
Figura 6: Resultado da simulação do tanque 1	27
Figura 7: Sistema em malha fechada para tanque 2	28
Figura 8: Resultado da simulação do tanque 2.....	28
Figura 9: MFG dos controladores	29
Figura 10: Modelagem do sistema para atingir o primeiro set point.....	36
Figura 11: Modelagem do sistema para atingir o segundo set point.....	36
Figura 12: Saída do sistema no primeiro estágio	37
Figura 13: Sistema de Controle Supervisório.....	38
Figura 14: Modelagem completa do sistema.....	39
Figura 15: Saída do segundo estágio	40
Figura 16: Somatório das duas saídas	40
Figura 17: Estruturação da função produção de vapor para o sistema da caldeira	46
Figura 18: Estruturação da função de controle desliga para o sistema caldeira.....	47
Figura 19: Estruturação da função plano de emergência para o sistema caldeira.....	48
Figura 20: Elementos do PFS.....	49
Figura 21: PFS Principal	50
Figura 22: PFS Partida	51
Figura 23 : PFS Fornecimento de Insumos	52
Figura 24: PFS Planos de Emergência	52
Figura 25 : PFS Desliga.....	53
Figura 26: Elementos básicos do MFG	54
Figura 27: Disparo de uma transição.....	55
Figura 28 : Modelo Partida e Fornecimento de Insumos	57
Figura 29: Modelo Purga.....	58
Figura 30: Modelo Verifica Nível d'água do tubulão	59
Figura 31: Modelo Acendimento	60
Figura 32: Modelo Verifica Temperatura do Combustível Principal.....	61
Figura 33: Modelos Planos de Emergência.....	62
Figura 34: Modelo Desligamento.....	63

Lista de Símbolos

F – vazão
 f_i – vazão de entrada
 f_o – vazão de saída
 H – altura do reservatório
 ρ_0 - densidade da água de entrada
 ρ - densidade da água na temperatura de vaporização
 ρ_v - densidade do vapor
 λ_v - relação de calores específicos (C_p e C_v)
 T - temperatura de vaporização
 F_v - vazão de saída de vapor
 F_0 - vazão de entrada de água
 C_p - calor específico a pressão constante
 V_L - volume de líquido no tanque
 Q - taxa de calor que entra no sistema
 F_H - taxa de fluxo de combustível
 H_F - poder calorífico do combustível
 η_F – eficiência da fornalha
 C_v - coeficiente de fluxo de válvula
 ΔP - queda de pressão através da válvula
 τ_v - constante de atraso do atuador
 $M(s)$ - sinal de saída do controlador

Lista de Abreviaturas

SED – sistema a eventos discretos

SVC – Sistema de variáveis contínuas

MFG – Mark flow graph

PFS - Production Flow Schema

Resumo

A interação de um sistema de controle local contínuo com um sistema supervisório a evento discreto, é uma característica que nos permite classificar o sistema como híbrido. O sistema de controle de caldeiras que comanda as funções de partida, fornecimentos de insumo e parada do sistema pode ser modelado por eventos discretos. Além de eventos discretos, a caldeira também é controlada por controladores contínuos locais. O propósito deste trabalho é a modelagem de um sistema de controle para caldeiras, considerando a interação entre as variáveis contínuas e discretas. O modelo do sistema de controle contém além das funções necessárias para o funcionamento do sistema, um sistema supervisório, cujo propósito é o acionamento dos controladores dos queimadores. As funções foram organizadas em grande parte seguindo a metodologia PFS/MFG, o que nos permitiu visualizar a evolução do comportamento dinâmico do sistema

Abstract

A system can be considered as hybrid if there is an interaction between a local continuous system and a supervisory control system ruled by discrete event. The boiler control system, that commands the starting, the resources and the stop, can be shaped by discrete events. Besides the discrete events, the boiler is also controlled by local continuous controllers. The purpose of this essay is the modeling of a boiler control system, considering the interaction between the continuous and discrete variable. The model of the control system contains the necessary functions for the functioning of the system and a supervisory system, whose intention is to drive the controllers of the burners. The functions have been organized following PFS/MFG methodology, it allows to visualise the evolution of the dynamic behavior of the system.

1 Introdução

Para obtermos o comportamento desejado de um sistema, devemos considerar as variáveis de natureza contínua e discreta presentes na planta e determinar qual a melhor forma de controlá-las. Os sistemas de controle de variável contínua trabalham com grandezas físicas que variam no decorrer do tempo, diferentemente dos sistemas de controle de variáveis discretas. Em uma mesma planta podemos encontrar situações em que o estado de uma variável discreta modifica o valor da variável contínua. Surge então a necessidade de analisarmos o sistema considerando-o como híbrido.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é a definição de um conjunto de procedimentos que permitam a elaboração do modelo de sistema de controle de caldeiras, que é composto por variáveis contínuas e discretas. Através destes procedimentos, é possível construir modelos que considerem a interação entre as variáveis contínuas e discretas do sistema.

1.2 Motivação

O controle de instalação geradora de vapor, se feito de forma correta, garante uma operação segura, econômica e confiável do equipamento. Os sistemas de controle empregados vão desde um simples controle manual até o sofisticado controle das caldeiras de grande porte, onde são envolvidas dezenas ou, às vezes centenas de instrumentos. O sistema de controle de uma caldeira deve ser estruturado de forma a mantê-la operando com segurança.

Haja vista a complexidade e a importância do sistema de controle de caldeiras, faz-se necessário a elaboração de procedimentos que permitem facilitar a modelagem do sistema de controle. Os modelos devem contemplar além de aspectos relacionados com a funcionalidade do sistema, aspectos a referente a segurança.

1.3 Organização do texto

O segundo capítulo apresenta uma breve descrição do funcionamento da caldeira e das variáveis que compõem o sistema. No terceiro capítulo revisamos os conceitos de sistemas com variáveis contínuas e sistemas com variáveis discretas, definimos sistemas híbridos e citamos sistemas que podem ser modelados seguindo esta definição. No quarto capítulo abordamos o tema modelagem de sistema e revisamos Redes de Petri, este capítulo também contém uma descrição das possíveis modelagens para sistemas híbridos. O capítulo cinco contém a modelagem contínua e discreta do sistema. No capítulo seis são descritas as principais conclusões.

2 A caldeira

Os sistemas de geração de vapor são utilizados em larga escala, tanto para serviços de aquecimento, quanto para serviços de acionamentos mecânicos. A aplicação do vapor é bastante abrangente, atendendo diversas necessidades nas indústrias de alimentos, bebidas, papel, têxtil, metalúrgica, química, etc. Dependendo de sua aplicação, o vapor pode ser saturado ou superaquecido. De acordo com (Bazzo, 1992), a maioria dos processos industriais envolve o emprego de vapor saturado, com pressões inferiores a 10 bar (1000 kPa). Por outro lado, serviços de acionamento mecânico envolvem o emprego de vapor superaquecido e as pressões de trabalho são normalmente maiores.

O sistema de geração de vapor com seus principais componentes está esquematizado na figura 1.

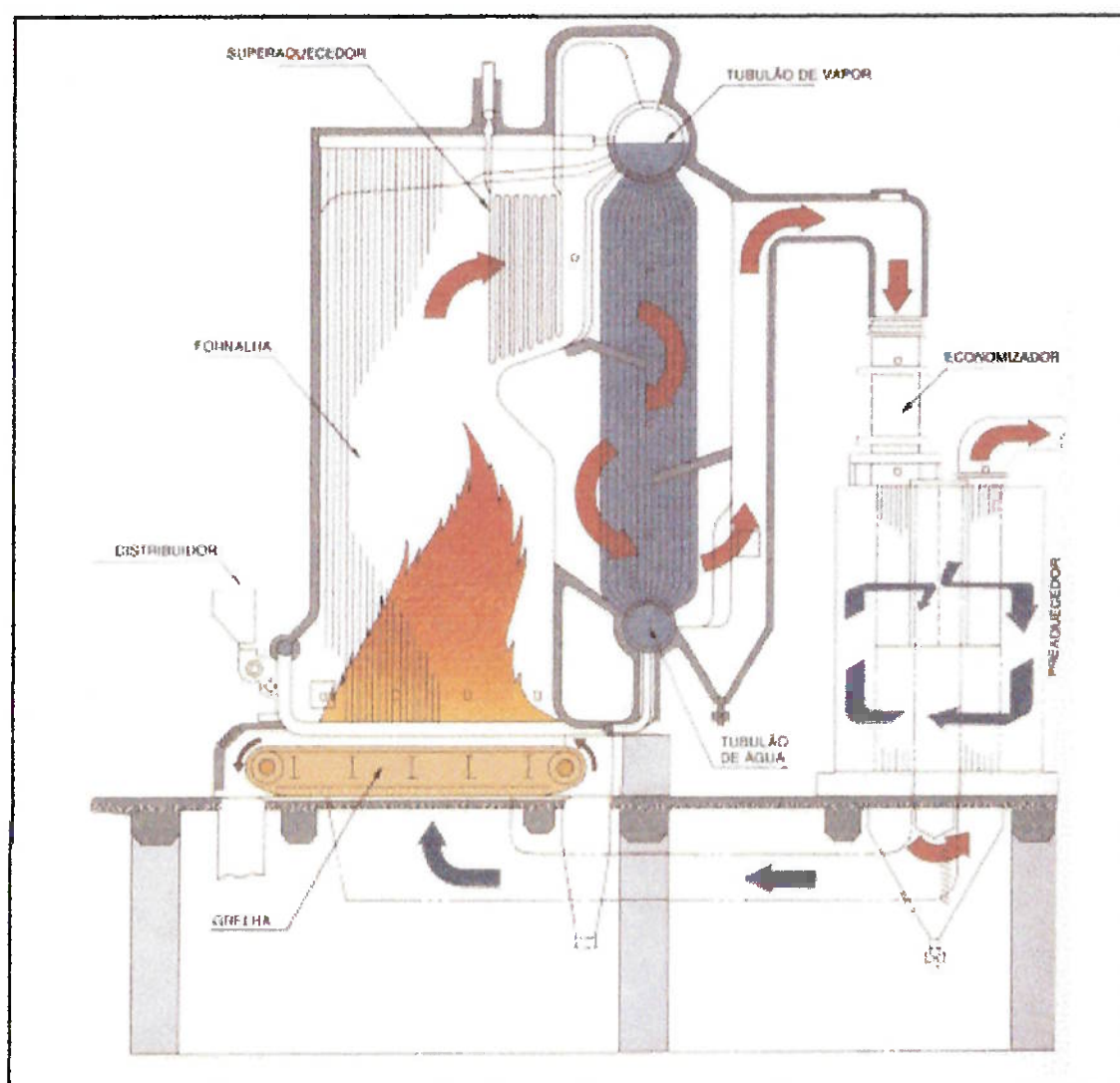


Figura 1: Caldeira

A fornalha compreende o local onde se desenvolve a queima de combustível. Os queimadores sopram uma mistura de ar e gás para o interior da câmara de combustão. Os gases provenientes da queima serão utilizados na caldeira e podem ser utilizados nos superaquecedores, no economizador e no aquecedor.

A caldeira compreende as partes onde ocorre mudança de fase da água do estado líquido para o vapor. Fazem parte deste sistema as paredes d'água, o tubulão inferior e superior. As paredes d'água são formadas por diversos tubos dispostos um ao lado do outro, revestindo as paredes da câmara de combustão. A água circula livremente por diferença de

densidade e o vapor formado é acumulado no tubulão superior. O vapor após ser saturado segue para os superaquecedores.

O superaquecedor consiste de um ou mais feixes tubulares e possuem a finalidade de aumentar a temperatura do vapor gerado na caldeira.

Os aquecedores de ar possuem a finalidade de elevar a temperatura do ar utilizado na combustão. O aquecimento do ar permite a redução do consumo de combustível e o aumento da velocidade de combustão.

O economizador é um trocador de calor que pré-aquece a água de alimentação, mediante o aproveitamento da parcela de energia ainda disponível dos gases de combustão.

As caldeiras podem ser classificadas em aquatubulares, flamotubulares e elétricas. A caldeira estudada neste trabalho é a caldeira aquatubular. Nas caldeiras aquatubulares a água circula por dentro de diversos tubos de pequeno diâmetro e dispostos na forma de parede d'água ou de feixes tubulares. As paredes d'água ficam dispostas ao redor da câmara de combustão, onde é predominante a troca de calor por radiação.

2.1 Funcionamento

A água de alimentação é fornecida por bombas e o volume de água no interior da caldeira deve ser controlado por intermédio de indicadores de níveis. Quando a água atingir o nível inferior a bomba é ligada, quando a água atinge o nível superior a bomba é desligada. Uma eventual falta de água provocará o superaquecimento nos tubos e seguido de destruição dos mesmos. A circulação da água é consequência da diferença de peso específico entre o líquido e o vapor, que tende a ser tanto menor, quanto maior for a pressão de operação. A separação do vapor ocorre no tubulão superior. O vapor deve deixá-lo, sempre que possível, com título igual ou próximo de um.

As unidades geradoras de vapor devem estar preparadas para operar em condições de máxima segurança e de modo a garantir pleno funcionamento do processo de combustão e geração de vapor. A instalação de dispositivos auxiliares de operação e de segurança tem o propósito de controlar a alimentação de água, a alimentação de combustível e principalmente de evitar que o nível de pressão se eleve acima dos níveis normais da caldeira.

O sistema de alimentação de combustível é controlado por dispositivos associado à leitura de pressão na caldeira. Pressostatos, sensores de pressão e manômetros são dispositivos utilizados para o controle. Os pressostatos atuam em conjunto com os queimadores ou com alimentadores de combustível para manter a pressão em níveis usuais de operação. Para efeito de proteção e controle da chama, são também utilizados termoelementos e células fotoelétricas. São dispositivos usualmente empregados para assegurar que o procedimento de partida seja obedecido, para prevenir falhas ou, na eventual ausência de chama, cortar o fornecimento de combustível aos queimadores.

As válvulas de segurança são dispositivos auxiliares, previstos para atuarem em caso de falha no sistema de combustão, de modo a evitar eventual aumento na pressão de trabalho da caldeira.

Segue abaixo, na figura 2, um esquema simplificado da caldeira e dos instrumentos.

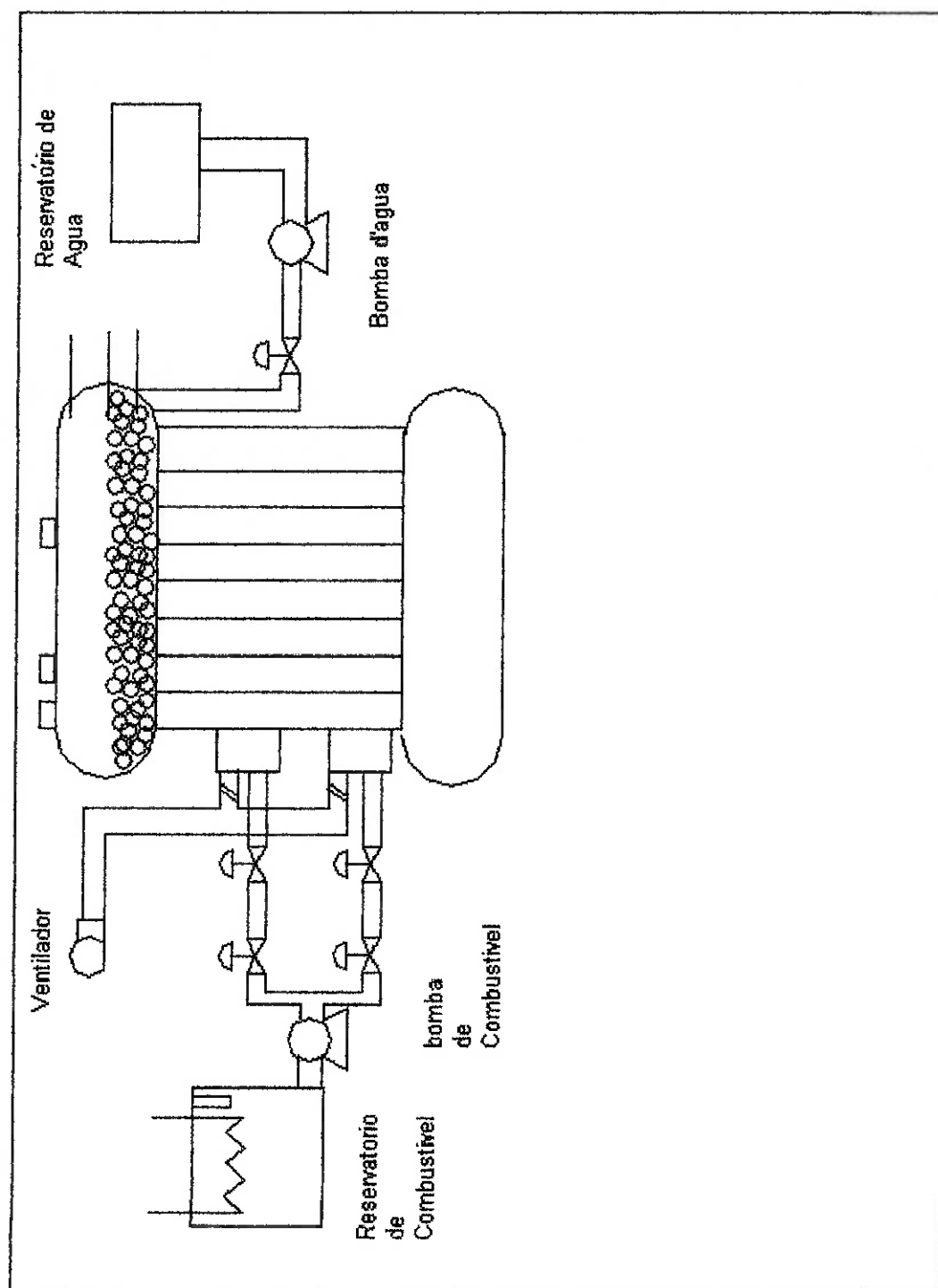


Figura 2: Diagrama esquemático do objeto de controle

2.2 Sistema de Controle

2.2.1 Sistema de Controle de Variáveis Contínuas

O sistema de geração de vapor a ser modelado possui dois queimadores que são acionados até se atingir a pressão de vapor desejada. Os controladores PID dos queimadores recebem como entrada a pressão e envia sinais de controle para o damper e válvula de modulação de combustível. Os queimadores disponíveis no mercado possuem um controlador acoplado.

O fluxo de combustível e o fluxo de ar são as variáveis a serem manipuladas para manter a pressão de vapor produzido em níveis desejados.

Para que a combustão seja completa, a quantidade de ar a ser fornecida deve ser necessária e suficiente para oxidar os elementos constituintes do combustível utilizado. Havendo combustão parcial teremos fuligem, aldeído e monóxido de carbono, além de não ocorrer a liberação total do calor do combustível.

O comburente deve formar com o combustível uma mistura homogênea. O uso de queimadores apropriados, bem como a temperatura correta do óleo são fatores essenciais para uma queima ideal. Estes fatores propiciam a gaseificação do combustível.

O comburente deve estar em quantidade suficiente em relação ao combustível para que a reação química da combustão seja completa. Deve-se trabalhar com o mínimo de excesso de ar .

A combustão é perfeita quando a quantidade de ar utilizada é a necessária e suficiente para a completa combustão. Cada unidade de peso de combustível requer uma quantidade determinada de ar. Dependendo da temperatura ambiente, esta quantidade de ar corresponderá a um dado volume. Este volume de ar precisa entrar na câmara de combustão na proporção

correta ao combustível queimado. Se a proporção de ar e combustível não for mantida haverá insuficiência ou excesso de ar e conseqüentemente perda da eficiência do processo, pois o ar que não participa da combustão tende a retirar calor da chama, sem contribuir para a reação. Ao aquecer um volume de ar desnecessário ocorrerá um aumento da velocidade de circulação dos gases quentes, com conseqüentemente perda de calor pela chaminé.

Portanto, o controle da quantidade de ar a ser introduzida na caldeira é importante para assegurar que o sistema tenha um funcionamento econômico.

2.2.2 Sistema de Controle de Variáveis Discretas

As variáveis discretas, que estão presentes no sistema de controle, controlam o fornecimento de insumos, a partida e a parada da caldeira. O abastecimento de água, conforme dito anteriormente, é feito através do acionamento de uma bomba, conforme os níveis superiores e inferiores. O objetivo é manter o nível d'água em um nível intermediário. O sistema de controle também deverá controlar a temperatura do combustível, conforme a leitura do sensor o sistema irá ligar ou desligar o aquecedor de combustível. Os procedimentos para ligar o sistema envolvem o abastecimento da água, a preparação da fornalha através da ventilação ou purga dos gases e controle do acionamento dos controladores. Nesta parte, mais especificamente, temos um controlador contínuo local monitorado por um sistema supervisório discreto, o que caracteriza o sistema como híbrido. Para finalizar, temos o monitoramento das condições de funcionamento do sistema. Se por ventura a pressão exceder os limites de segurança, ou o nível d'água do tubulão exceder o limite inferior, o sistema de controle devera intervir com o intuito de impedir que o sistema sofra maiores danos.

3 Classificação dos Sistemas

3.1 Sistemas SVC e SED

Uma possível classificação de sistemas é a divisão dos sistemas em sistemas de variáveis contínuas e sistemas a eventos discretos. A principal característica dos SVC é a continuidade no tempo. Esta característica é encontrada principalmente nos sistemas que interagem diretamente com fenômenos da natureza e cuja dinâmica é regida por leis físicas. Uma das principais ferramentas matemáticas utilizadas na modelagem e controle deste tipo de sistema são sistemas de equações diferenciais que vem sendo usados para a solução de diversos problemas.

Os sistemas SED são sistemas concebidos com base em regras e procedimentos definidos por uma certa lógica. A principal característica destes sistemas é que a sua dinâmica ocorre em função de eventos discretos, como o início do funcionamento de uma máquina, a chegada de uma mensagem, etc. Nos sistemas SED a metodologia tradicional de equações diferenciais não é adequada para o seu estudo, pois toda a sua dinâmica é caracterizada por estados discretos e eventos discretos, que por sua vez são definidos por regras estabelecidas pelo homem em função de algum tipo de interação discreta do sistema com a natureza.

A classificação de um sistema em SED ou SVC depende da finalidade para qual ele é definido. A partir de um mesmo processo, pode-se definir diversos modelos de sistemas que poderão ser discretos ou contínuos, dependendo do seu uso, ou seja, das saídas que se deseja obter.

3.2 Sistemas Híbridos

3.2.1 Definições

O termo híbrido, aplicado a sistema, é interpretado como a existência simultânea de características de SVC e de SED. Segundo (Villani, 2000), o termo “sistemas híbridos” possui diversos significados. As definições estão relacionadas à forma com que as partes contínuas e discretas interagem.

Os sistemas híbridos podem ser definidos como aqueles que contém pelo menos uma variável discreta e pelo menos uma variável contínua.

Um sistema híbrido também corresponde a um típico sistema SVC, representado por equações diferenciais onde eventos discretos ocorrem introduzindo modificações não contínuas e que não podem ser representados através de equações diferenciais.

Sistemas híbridos também são definidos como plantas contínuas ou plantas mistas, supervisionada por um sistema de controle que reage a eventos externos, onde existe a necessidade de uma interface híbrida para a comunicação entre a planta e o sistema de controle.

A classificação de um sistema como híbrido também é determinada pela existência da interação de um sistema de controle local basicamente contínuo com um sistema supervisor a evento discreto, ou seja o processo é controlado com técnicas de controle contínuo de acordo com um planejamento discreto. Neste caso o sistema contém dois tipos de componentes que interagem entre si: sub sistemas com variáveis contínuas e subsistemas a eventos discretos.

3.2.2 Aplicações de Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos aparecem em diferentes áreas, manufatura, redes de comunicação, controle de tráfico e processos químicos. Os sinais gerados podem ser contínuos ou discretos. Os sinais dependentes do tempo são sinais contínuos e os sinais discretos são regidos por eventos.

Quando dinâmicas contínuas e discretas coexistem e apresentam um certo grau de interação é importante desenvolver um modelo completo que descrevam o comportamento dinâmico destes sistemas. Apenas desta maneira será possível desenvolver projetos que levam em consideração o relacionamento e a interação entre as partes contínuas e discretas do sistema. Em um processo de manufatura, por exemplo, as peças devem ser processadas em uma determinada máquina, mas apenas a chegada das peças inicia o processo, logo o processo de manufatura é composto por eventos discretos e por dinâmicas de natureza contínuas que modelam o processo de usinagem na máquina determinada.

Existem casos onde eventos discretos e as variáveis contínuas não são totalmente acoplados, entretanto modelos de sistemas híbridos devem ser usados quando existe uma significativa interação entre os dois tipos de variáveis.

Modelos híbridos podem ser usados para aprimorar algoritmos de controle de emissão de poluente em automóveis. Note que um modelo preciso da explosão do motor tem uma representação híbrida. Os pistões possuem quatro modos de operação que correspondem à explosão, seu comportamento é representado por eventos discretos. A regulagem do tempo da transição entre duas posições é determinada pela movimentação contínua do trem de engrenagem, que depende do torque produzido por cada pistão. Outros exemplos onde a

modelagem híbrida é necessária são: controle de processos químicos, sistemas de manufatura flexíveis, redes de comunicação, controle de tráfego aéreo, etc.

4 Modelagem de Sistemas

O comportamento dinâmico de um sistema pode ser entendido pelo estudo de suas descrições matemáticas. A evolução no tempo de um sistema de manufatura pode ser previsto através da descrição matemática do comportamento de interesse. Relações matemáticas, que envolvem equações diferenciais ou redes de Petri, são usadas para descrever o comportamento do processo e prever sua resposta quando determinada entrada é aplicada.

O processo matemático de modelagem, a partir de um fenômeno físico, é essencial em ciência e engenharia. A tarefa de capturar e detalhar o fenômeno de interesse precisamente **requer um entendimento completo do processo envolvido. Em casos não triviais, a modelagem é quase uma arte pois a descrição matemática do modelo deve ser detalhada suficientemente para descrever precisamente o fenômeno e ao mesmo tempo ser simples o suficiente para permitir a análise.** Dependendo do caso, a descrição matemática do processo pode ser simplificada antes de ser utilizada em análises.

Deve-se lembrar que a modelagem representa aproximadamente a realidade, pois nem sempre a complexidade de sistemas físicos pode ser reproduzida fielmente em formulações matemáticas. Em alguns casos o grau de precisão deve ser determinado de acordo com as necessidades de análise.

4.1 Modelagem de Sistemas Híbridos

Assim como na definição, existem vários tipos de abordagens, análise e controle para sistemas híbridos. Uma das possibilidades é englobar em uma única modelagem as partes de eventos discretos e de dinâmica contínua.

Outras abordagens consistem na modificação de técnicas de modelagem utilizadas em sistemas a eventos discretos, onde são introduzidos novos elementos que permitem a representação da dinâmica contínua do sistema, o que pode ser feito utilizando redes de Petri Híbrida.

Pode-se também utilizar modelos contínuos e discretos separadamente e definir um modelo para a interface entre as duas partes. As abordagens intermediárias combinam modelos de sistemas contínuos, descritos por equações diferenciais, e de sistemas discretos descritos por autômato finito ou redes de Petri, com a introdução de uma interface para a comunicação entre os dois tipos de modelos.

4.1.1 Modelagem por Autômatos Finitos

Existem sistemas que não podem ser convenientemente descritos por modelos contínuos e equações diferenciais, pois sua evolução no decorrer do tempo depende de uma interação complexa entre os eventos discretos. Podemos citar como exemplo sistemas de linhas de produção em manufatura, sistemas de tráfego, etc. Estes sistemas com dinâmica a eventos discretos cuja representação pode ser feita por modelos discretos, entre os quais autômatos finitos. Uma vez que estes sistemas são regidos por eventos definidos por uma lógica que pode ter relação ou não com leis físicas, os seus modelos tendem a ser mais fáceis de se construir e mais exatos (embora os seus números de estados tendem a crescer) se compararmos com sistemas regidos por leis físicas.

De acordo com (Antsaklis; Koutsoukos, 2003), um autômato híbrido é uma máquina de estados finitos equipada com um conjunto de variáveis de valores reais. O estado do autômato muda instantaneamente como uma transição discreta. Exemplo: O autômato híbrido da figura 3 modela o funcionamento do termostato para controle da temperatura da sala por

intermédio das ações liga e desliga no aquecedor. O valor real da variável x denota a temperatura. O sistema tem dois modos de controle *off* e *on*. Quando o aquecedor está desligado a temperatura da sala cai de acordo com a equação diferencial $\dot{x} = -K(x)$. Quando o aquecedor está ligado (controle modo *on*) a temperatura do sistema sobe de acordo com a equação $\dot{x} = K(h - x)$, onde h é uma constante. Inicialmente, a temperatura é $x = 72$ e o aquecedor está desligado. O aquecedor irá ligar logo que a temperatura cai para 70° de acordo com a condição $x = 70$. Quando o aquecedor está ligado a temperatura sobe até atingir 75° de acordo com a condição $x = 75$. Então o aquecedor será desligado e a temperatura irá começar a cair novamente. Esta política de controle garante que a temperatura da sala irá permanecer entre 70° e 75° .

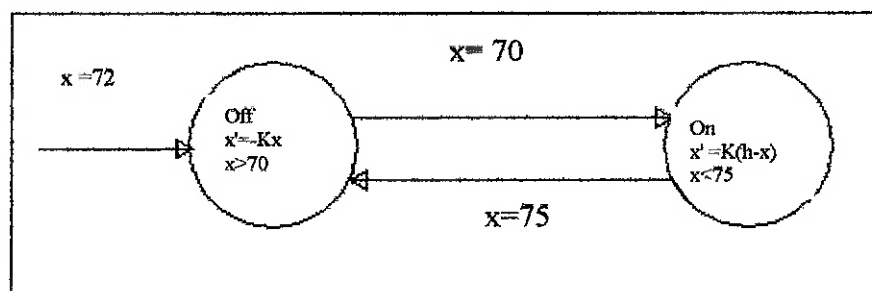


Figura 3: Termostato descrito por autômato finito

4.1.2 Modelagem por Redes de Petri

De acordo com (Miyagi, 1996), as redes de Petri Condição/Evento são utilizadas para modelar a evolução no tempo de um sistema discreto. Estas redes são compostas por eventos e condições. Os pré-requisitos para a ocorrência de um evento são formulados através das condições. Os elementos que compõem a rede e as suas respectivas representações são:

Condições: \square

Eventos: \bigcirc

Arcos Orientados: \rightarrow

Um arco $b \circ \rightarrow e$ indica que b é uma pré-condição de e . As condições satisfeitas em um certo instante são designadas com uma marca dentro da condição (\odot). Se um evento ocorre a suas pré-condições previamente satisfeitas deixam de ficar satisfeitas, e as suas pós-condições (previamente não-satisfeitas) são satisfeitas.

4.1.2.1 Redes de Petri Híbrida

Segundo (Emília, 2000) as redes de Petri híbrida podem ser construídas utilizando a rede de Petri Lugar/Transição, aos lugares e transições discretos são adicionados lugares contínuos, cuja marcação é um número real não negativo, e transições contínuas, as quais são associadas velocidades máximas de disparo que representam um fluxo contínuo de marcas. O objetivo desta rede é adicionar às propriedades da rede de Petri Lugar/Transição a representação de um fluxo contínuo, que pode ser, por exemplo, de material ou energia. Este fluxo é representado através de transições contínuas.

4.1.3 Modelagem com Subsistemas Contínuos e Discretos

O conceito de sistemas híbridos pode ser empregado na modelagem de sistema que apresentam descontinuidades. Observando a figura 4 podemos notar que o sistema se comporta de maneira distinta dependendo da altura do nível. Logo para representá-lo são necessários dois modelos contínuos. Para exemplificar o conceito de modelagem de sistemas híbridos iremos modelar o sistema de controle de nível do tanque da figura 4.

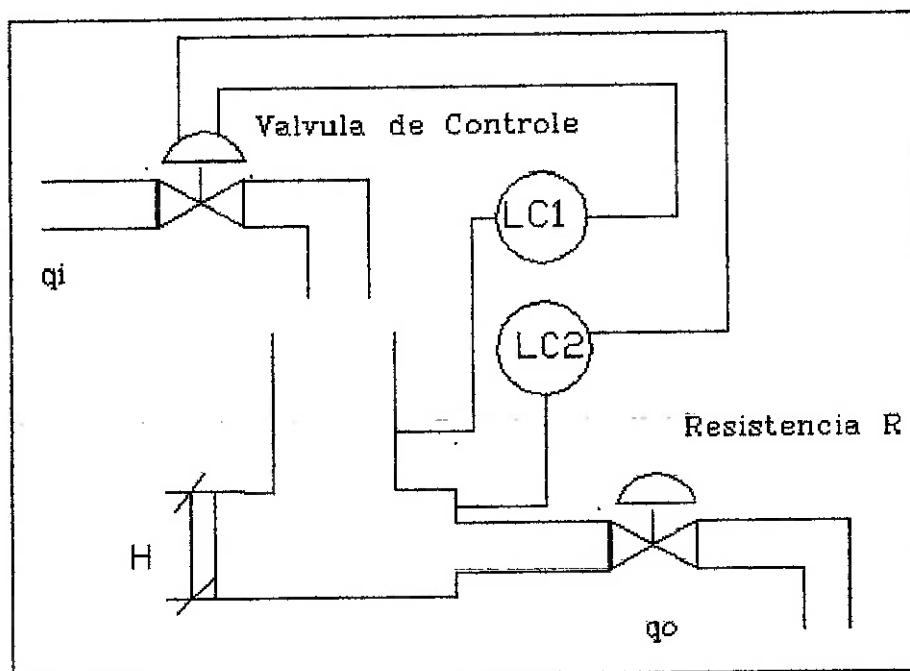


Figura 4: Modelo descontinuo

Processos industriais envolvem, freqüentemente o fluxo de líquidos ao longo de tubos e conexões e de reservatórios. O fluxo nesses processos é geralmente turbulento e não laminar. De acordo com (Ogata, 2000) , os sistemas que envolvem fluxo turbulento são freqüentemente representados por equações diferenciais não-lineares. Entretanto, como a região de operação é limitada, é possível que as equações diferenciais não lineares sejam linearizadas. A taxa de escoamento em regime permanente é dada por:

$$F = K\sqrt{H} \quad (1)$$

O fluxo ao percorrer a válvula encontra uma resistência ou restrição durante o escoamento. A resistência R ao fluxo de líquido é definida como a variação na diferença de nível necessária para causar a variação unitária na taxa de escoamento, isto é,

$$R = \frac{dH}{dF} \quad (2)$$

Derivando a equação 1 em relação ao tempo obtemos:

$$\begin{aligned} dF &= \frac{K}{2\sqrt{H}} dH \\ \frac{dH}{dF} &= \frac{2\sqrt{H}}{K} = \frac{2\sqrt{H}\sqrt{H}}{F} = \frac{2H}{F} \end{aligned}$$

logo a resistência é dada por:

$$R = \frac{2H}{F} \quad (3)$$

A capacitância C de um reservatório é definida como a variação na quantidade de líquido armazenado necessária para causar uma mudança unitária no potencial (altura). (O potencial é a grandeza que indica o nível de energia do sistema.). A capacitância do reservatório é igual à sua secção transversal. Note que o reservatório da figura 4 é composto por dois reservatórios de capacitâncias distintas. Como o fluxo de entrada menos o fluxo de saída durante um pequeno intervalo de tempo dt é igual à quantidade adicional armazenada no reservatório, temos que

$$Cdh = (f_i - f_o)dt \quad (4)$$

A partir da definição de resistência, a relação entre f_o e h é dada por:

$$f_o = \frac{2h}{R} \quad (5)$$

A equação diferencial do sistema para um valor constante de R torna-se:

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rf_i$$

Tomando a transformada de Laplace de ambos os membros da equação acima obtemos:

$$\frac{H(s)}{F_i(s)} = \frac{R}{RCs + 2} \quad (6)$$

Para que o controle do nível do reservatório seja feito é necessário termos dois controladores um para cada região do reservatório, pois o parâmetro C não é constante no reservatório.

Para o primeiro reservatório consideramos $C = 1$ e para o segundo $C = 2$. A constante R é igual para os dois reservatórios e seu valor é igual a 4. Utilizando o método de lugar das raízes projetamos para cada reservatório um controlador. A altura do primeiro reservatório é de 2 metros e do segundo reservatório é de 3 metros. Considerando o tanque inicialmente

vazio deseja-se que a altura do nível seja de 4, para tanto, aplicamos uma entrada degrau de valor 2 no primeiro tanque e no segundo tanque Na figura 5, temos o diagrama de blocos para o reservatório 1 e o resultado da simulação pode ser observado na figura 6:

Reservatório 1:

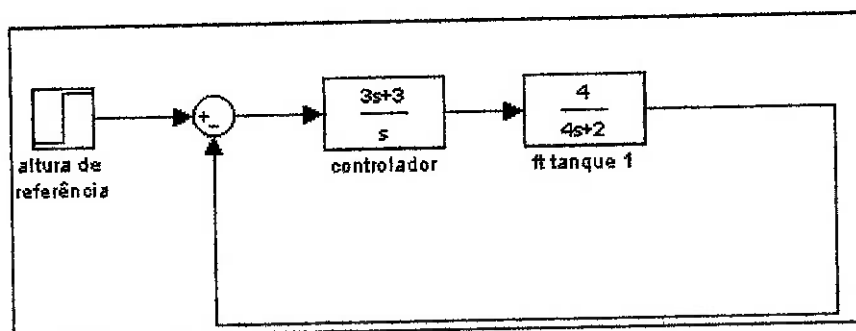


Figura 5: Sistema em malha fechada para tanque 1

Resultado da simulação para o primeiro tanque

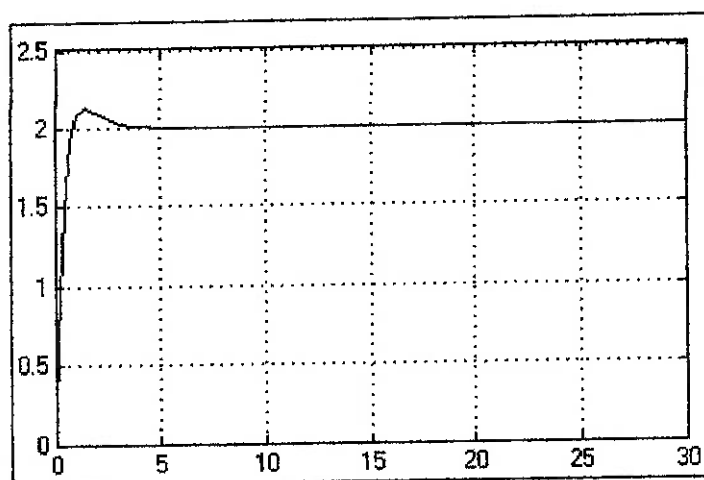


Figura 6: Resultado da simulação do tanque 1

As figuras 7 e 8 mostram, respectivamente, a malha fechada e o resultado da simulação para o reservatório 2.

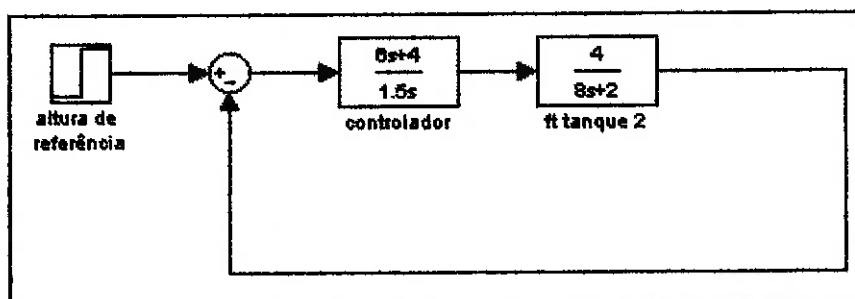


Figura 7: Sistema em malha fechada para tanque 2

Resultado da simulação para o segundo tanque:

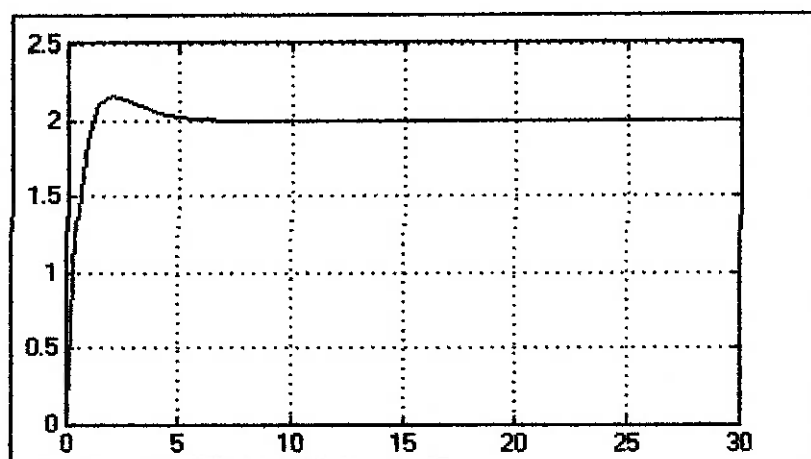


Figura 8: Resultado da simulação do tanque 2

Para que os controladores atuem de maneira correta no sistema é preciso que seja modelada a lógica de acionamento de cada controlador, ou seja, é preciso ligar e desligar os controladores de maneira que cada parte do tanque seja controlada pelo seu respectivo controlador. Esta lógica de acionamento, ilustrada na figura 9, pode ser modelada por MFG, que é uma derivação das redes de Petri, própria para aplicação em diferentes níveis de modelagem, análise e controle de SED.

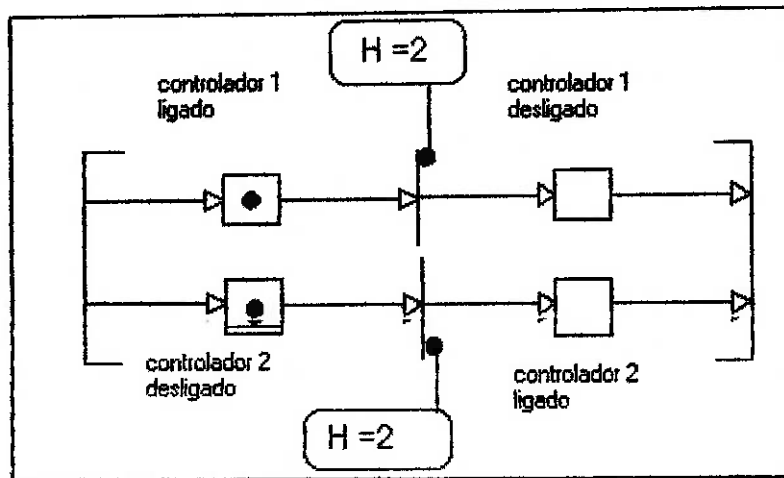


Figura 9: MFG dos controladores

5 Procedimentos para o Projeto

Para elaborar um modelo que represente o sistema de controle precisamos primeiro estudar o sistema de geração de vapor e suas partes. A partir deste estudo é possível identificar quais os principais objetivos do sistema de controle, que neste caso compreende em produzir vapor de forma segura.

O objeto de controle é um conjunto formado por vários elementos. Para que o modelo de sistema de controle seja gerado, é necessário definir e organizar cada elemento do objeto de controle, pois assim identificaremos quais são os dispositivos de atuação e detecção, que são importantes para a construção do modelo.

Após a definição dos componentes do sistema, determinamos as funções de controle, ou seja, quais as atividades que o sistema de controle deve executar para atingir o objetivo previamente definido. Como exemplo de técnica de identificação e análise das funções de controle, existe o diagrama de sistematização das funções derivado das técnicas de análise de valores e de Engenharia de valores.

As funções necessárias, que foram avaliadas através deste diagrama, devem ser desenvolvidas até um nível apropriado, detalhando-se funções até se obter uma descrição completa de sua realização física. A função de nível mais inferior é a função dos elementos que constituem o objeto de controle, ou dos módulos funcionais do software de controle.

Para a realização das operações específicas, deve-se definir os procedimentos que ativam as várias funções de controle anteriormente definidas, isto é, deve-se definir o fluxo das funções de controle.

A metodologia PFS/MFG permite representar os passos em blocos funcionais (atividades) de diferentes níveis conceituais admitindo sem dificuldades uma representação

estruturada, isto é, os passos descritos em nível conceitual mais alto (PFS) podem ser gradativamente detalhados.

Na sistematização do desenvolvimento do sistema de controle, o conceito de modularização é fundamental. Estes módulos são subsistemas componentes de um sistema maior. Este conceito foi aplicado durante a elaboração das macros atividades e das sub atividades que a compõem.

Durante o processo de definição dos subsistemas, notamos a presença de uma sub-atividade responsável pelo acionamento de controladores contínuos. Antes de integrar esta lógica de acionamento às demais funções, precisamos primeiro modelar o processo. Os modelos podem ser obtidos através de duas formas. A primeira consiste em aplicar uma entrada degrau no sistema e por intermédio da sua resposta o modelo é construído. O outro método de se obter o modelo é através de modelagem matemática, gerando funções de transferências. Após a construção do modelo elabora-se a lógica de acionamento dos controladores e a integra às demais funções do sistema.

Os procedimentos acima descritos seguiram a metodologia de projeto de sistema SED juntamente com o conceito de modelagem de sistema contínuos. Para validar os modelos obtidos utilizamos dois ambientes de simulação. O primeiro ambiente é o HPSim, onde foi possível simular os modelos discretos. O software MatLab/Simulink nos permitiu simular além dos modelos contínuos, a lógica de acionamento dos controladores.

5.1 Simulação

Um aspecto importante deste projeto consiste no desenvolvimento de um modelo que trabalhe com sinais de características distintas. Logo, para simular o modelo precisamos levar em consideração esta peculiaridade.

A simulação deve ser feita com base nas características de desenvolvimento do modelo. (Yen-Tsang; Miyagi; Villani, 2002) afirmam que entre as técnicas de modelagem, algumas consistem em extensões de modelos contínuos, com equações diferenciais ordinárias nas quais são incluídas variáveis cujos valores podem ser modificados de forma descontínua no tempo. Uma outra possibilidade consiste em utilizar as técnicas de modelagem de sistemas discretos e acrescentar elementos que permitam representar a dinâmica contínua do sistema.

Para o modelo desenvolvido neste trabalho, consideramos o sistema de controle da caldeira composto de variáveis discretas que interagem com as variáveis contínuas. Para tanto teremos uma modelagem discreta feita com redes de Petri e um modelo contínuo supervisionado pelo controle discreto.

A modelagem discreta representa as funções que o sistema de controle deve exercer para que o sistema entre em funcionamento, também fazem parte desta modelagem as ações referentes ao fornecimento dos insumos, água e combustível, desligamento do sistema e monitoramento das condições de funcionamento

A caldeira modelada neste trabalho é composta por dois queimadores. Durante o acendimento do sistema apenas um queimador é acionado e, após o sistema atingir uma pressão previamente determinada o segundo queimador é ativado para que a pressão do vapor atinja seu valor final.

5.2 Modelagem e Simulação da Parte Contínua

As caldeiras são um dos sistemas mais interessantes e importantes nos processos químicos e está entre os mais difíceis de serem modelados. Após realizar uma pesquisa com os profissionais da área de automação, verificamos que para se obter a função de transferência do sistema, é aplicada uma entrada degrau e de acordo com a saída do sistema a função de

transferência é modelada. Como não dispormos de uma caldeira, o modelo físico do sistema será obtido por intermédio da modelagem matemática. Para descrever este sistema rigorosamente, as equações de conservação devem ser escritas para as fases do vapor e de o líquido. O principal problema é encontrar a taxa de vaporização do material a partir da fase líquida para a fase de vapor. A equação utilizada para descrever a taxa de vaporização deve ser fisicamente razoável e matematicamente conveniente para a solução.

Segundo (Luyben, 1989), para efeito de modelagem, o calor é adicionado a uma taxa Q a fim de manter a pressão desejada no tanque através da vaporização do líquido a uma taxa W_v (massa por tempo).

Um modelo mais realista pode ser obtido se nós assumirmos que o volume da fase vapor é pequeno suficiente para que sua dinâmica seja desprezada. Se apenas poucos moles de líquido devem ser vaporizados para mudar a pressão na fase vapor, nos podemos assumir que esta pressão é sempre igual a pressão de vaporização do líquido a qualquer temperatura ($P = P_v$ e $W_v = \rho_v F_v$). Uma equação de energia para a fase líquida dá a temperatura (em função do tempo) e com o auxílio de tabelas termodinâmicas é possível obter o valor da pressão através da temperatura.

Assumindo que o líquido é incompressível, temos que $C_v = C_p$, e sua energia interna é dada por $C_p T$. A entalpia do vapor pode ser obtida através da fórmula $C_p T + \lambda_v$.

Equação da continuidade:

$$\rho \frac{dV_L}{dt} = \rho_0 F_0 - \rho_v F_v \quad (7)$$

Energia:

$$C_p \rho \frac{d(V_L)}{dt} = \rho_0 C_p F_0 T_0 - \rho_v F_v (C_p T + \lambda_v) + Q \quad (8)$$

Substituindo sete em oito e manipulando a equação resultante obtemos:

$$\frac{C_p \rho (\rho_0 F_0 - \rho_v F_v)}{\rho_v F_v C_p} \frac{dT}{dt} + T = \frac{\rho_0 C_p F_0 T_0 - \rho_v F_v \lambda_v}{\rho_v F_v C_p} + \frac{Q}{\rho_v F_v C_p} \quad (9)$$

A taxa de calor que entra no sistema (Q) pode ser modelada da seguinte maneira:

$$Q = F_H \eta_F H_F \quad (10)$$

O fluxo de combustível é controlado através de válvulas de controle. Através da abertura ou fechamento a restrição ao fluxo é modificada, e conseqüentemente o fluxo é alterado. A válvula pode ser modelada da seguinte maneira:

$$F = C_v \sqrt{\Delta P} \quad (11)$$

De acordo com (Smith; Corripio, 1985), o coeficiente C_v muda de acordo com a posição da válvula (vp). A relação funcional entre C_v e a posição da válvula, para válvulas lineares, é dada por:

$$C_v = (C_v|_{vp=1}) p \quad (12)$$

A posição da válvula é alterada pela ação de um atuador, que pode ser modelado da seguinte maneira:

$$VP(s) = \frac{1/100}{\tau_v s + 1} M(s) \quad (13)$$

Substituindo 11, 12 e 13 em 10 obtemos:

$$Q = \eta_F H_F C_v|_{vp=1} \sqrt{\Delta P} \frac{1/100}{\tau_v s + 1} M(s) \quad (14)$$

A partir da equação 9 obtemos a seguinte função de transferência;

$$T(s) = \frac{\rho_0 C_p F_0 T_0 - \rho_v F_v \lambda_v}{\rho_v F_v C_p} \frac{1}{\left(1 + \frac{C_p \rho (\rho_0 F_0 - \rho_v F_v)}{\rho_v F_v C_p} s\right)} + \frac{Q}{\rho_v F_v C_p} \frac{1}{\left(1 + \frac{C_p \rho (\rho_0 F_0 - \rho_v F_v)}{\rho_v F_v C_p} s\right)} \quad (15)$$

Finalmente substituindo a equação 14 na 15 obtemos a função de transferência final

$$T(s) = \frac{\rho_0 C_p F_0 T_0 - \rho_v F_v \lambda_v}{\rho_v F_v C_p} \frac{1}{\left(1 + \frac{C_p \rho (\rho_0 F_0 - \rho_v F_v)}{\rho_v F_v C_p} s\right)} + \frac{1}{\rho_v F_v C_p} \frac{1}{\left(1 + \frac{C_p \rho (\rho_0 F_0 - \rho_v F_v)}{\rho_v F_v C_p} s\right)} C_v|_{VP=1} \sqrt{\Delta P} \frac{1/100}{\tau_v s + 1} M(s) \quad (16)$$

Embora o controle da entrada de calor na caldeira seja feito através da pressão, a modelagem acima controla a abertura da válvula de combustível por intermédio da temperatura. Contudo, para que o vapor atinja uma determinada pressão, basta colocarmos o valor da temperatura referente à pressão desejada, o que pode ser feito com o auxílio das tabelas termodinâmicas.

O sistema terá dois “sets point”. No primeiro momento através do controle da válvula de combustível a temperatura alcançará o primeiro “set point” e depois da estabilização, o segundo queimador é acionado, o que equivale a dizer que o fluxo de combustível será duplicado para que o sistema alcance o segundo estágio. Em outras palavras, primeiro temos um controlador, controlando apenas uma válvula de entrada de combustível para o queimador-1, e posteriormente temos outro controlador que manipula as duas válvulas de entrada de combustível para o queimador-1 e para o queimador-2.

Como o sistema irá operar em dois estágios, podemos dizer que o segundo termo do lado direito da equação 16, terá seu valor alterado para que o segundo “set point” seja alcançado. Porém, a segunda função de transferência receberá como “set point” a diferença entre o segundo “set point” e o valor da variável. Neste caso iremos trabalhar com o primeiro “set point” igual a 1 MPa e o segundo 1.5 MPa, o que equivale a uma temperatura de 180°C e 200°C respectivamente.

Através da modelagem do sistema notamos que temos um sistema local com controle contínuo supervisionado por um controle discreto, o que caracteriza o sistema como híbrido.

Para que a simulação desta modelagem seja feita, levando em consideração esta peculiaridade, utilizamos o programa MatLab/Simulink, pois nele é possível modelar a parte contínua e controlar o acionamento dos controladores.

Após a construção dos modelos que representam o sistema, determinamos os parâmetros dos controladores 1 e 2 necessários para estabilizar os sistemas. Os modelos do primeiro e do segundo estágios, estão representadas nas figura 10 e 11, respectivamente.

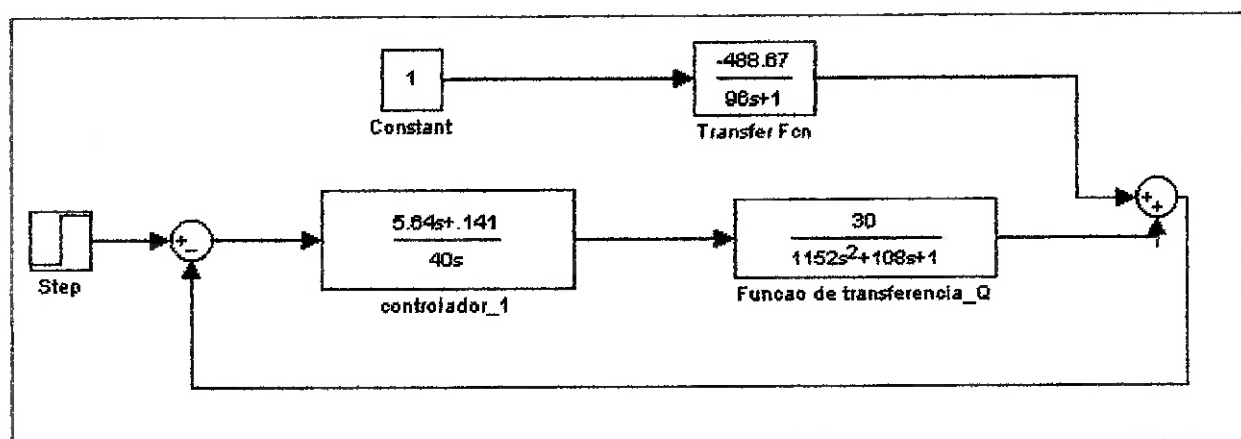


Figura10: Modelagem do sistema para atingir o primeiro set point

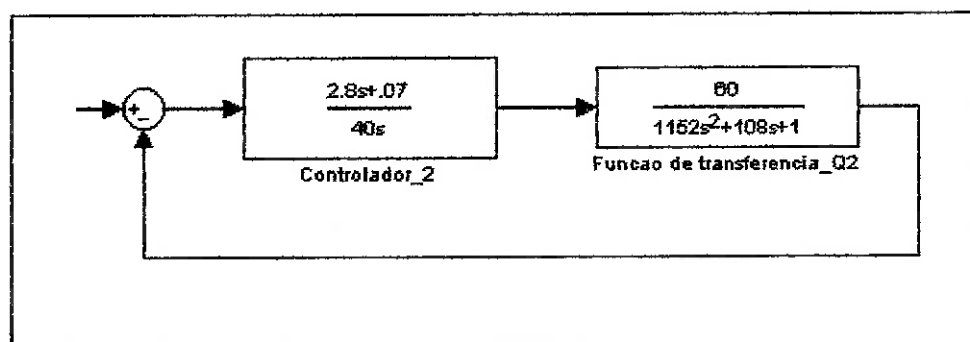


Figura 11: Modelagem do sistema para atingir o segundo set point

Na figura 12, podemos observar o resultado da simulação do primeiro sistema.

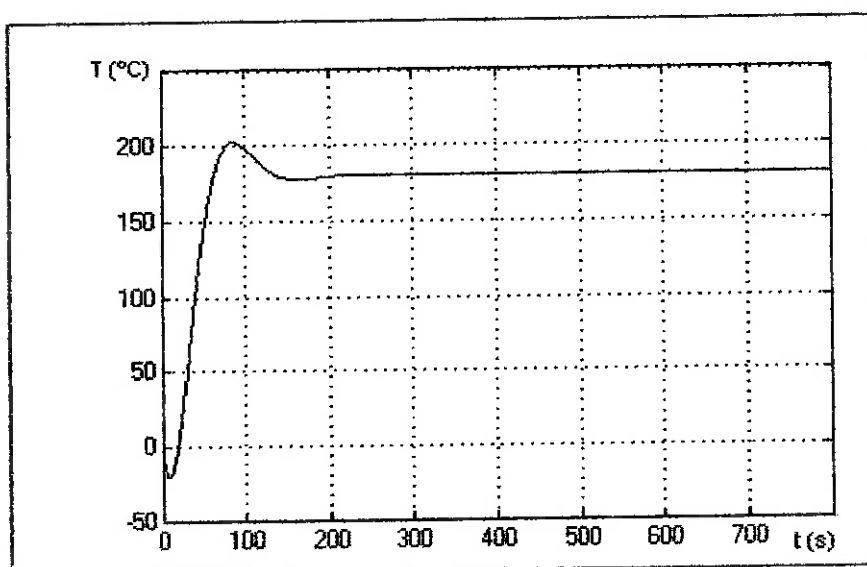


Figura 12: Saída do sistema no primeiro estágio

Ao observar o gráfico, notamos que o sistema se estabiliza após 300s. Para que o segundo controlador seja acionado somente após este tempo, utilizamos a biblioteca Stateflow do Simulink que nos permite simular uma máquina de estado finito. Esta parte da modelagem compreende ao modelo do sistema supervisor que possui a função de controlar o acionamento dos controladores contínuos. Este controlador, que pode ser observado na figura 13, funciona da seguinte maneira, no primeiro momento o estado *Off* está ativado e o valor da variável *contr_2* permanece igual a zero; após 300s o estado *Off* fica desativado e o estado *On* é ativado e o valor da variável *contr_2* passa ser igual a 1. A saída deste controlador é a entrada da porta de controle do *Switch*. Este bloco possui três entradas, sendo que a de controle, a segunda porta, está conectada a saída do controlador, a primeira entrada é igual a zero e a outra é a diferença entre o segundo set point e a saída do primeiro sistema. Enquanto a entrada de controle for igual a zero, o valor da saída deste bloco é igual ao valor que esta na primeira porta, ou seja, igual a zero, a partir do momento que o valor da entrada da porta de controle muda para 1, a saída do *Switch* passa a ser o valor da terceira porta, ou seja, a diferença entre o valor do segundo set point e a variável da saída do primeiro sistema.

Mantendo o valor da entrada do segundo sistema igual a zero, o sistema fica inativo e quando e após 300 segundos o sistema é excitado com uma entrada degrau e é estabilizado.

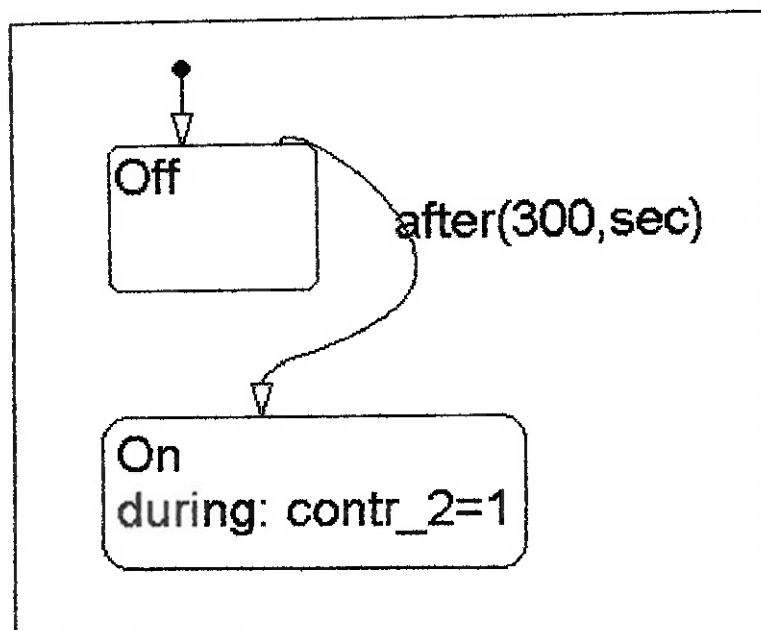


Figura 13: Sistema de Controle Supervisório

Segue , na figura 14, a modelagem completa do sistema:

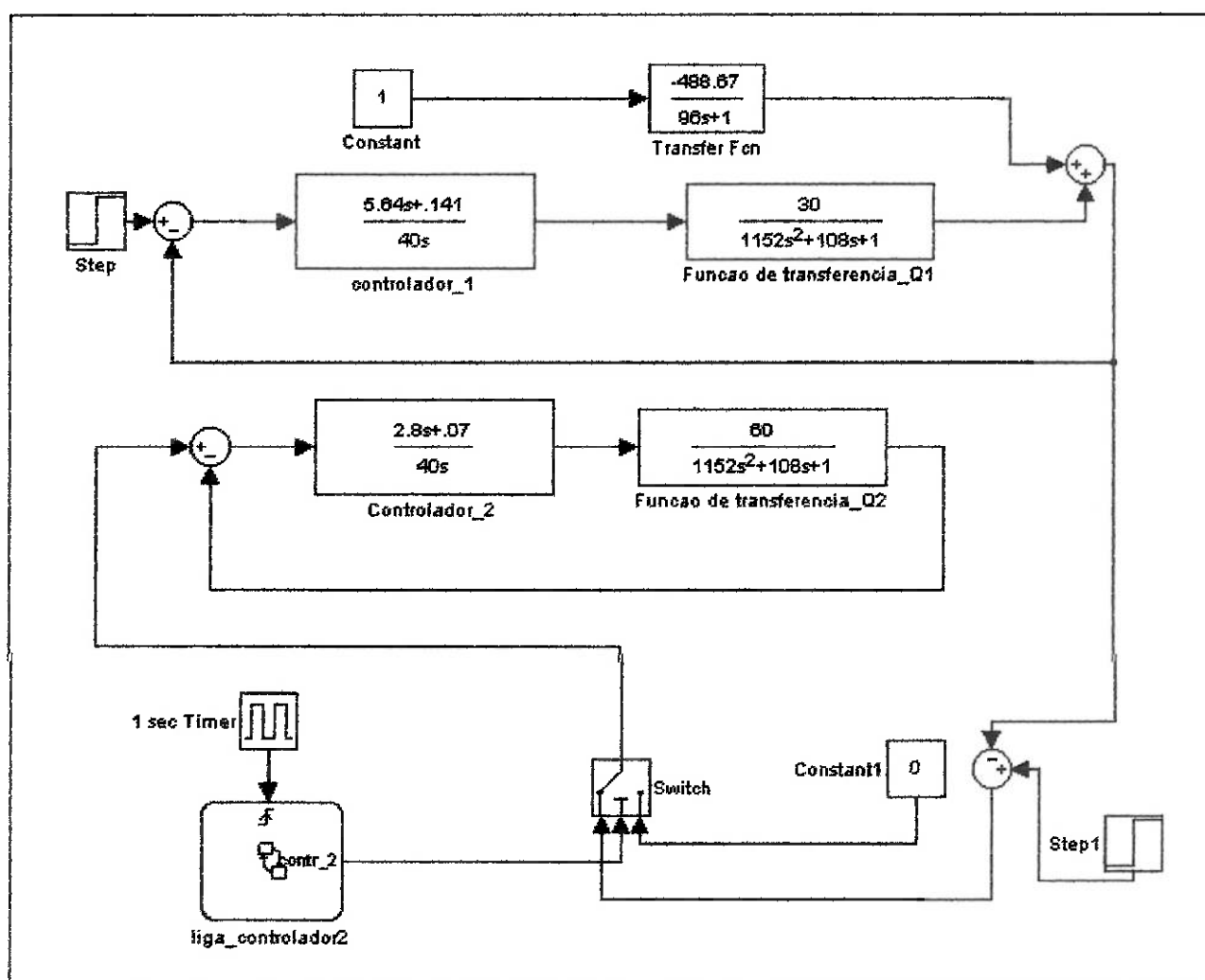


Figura 14: Modelagem completa do sistema

A saída do segundo sistema pode ser observada na figura 15.

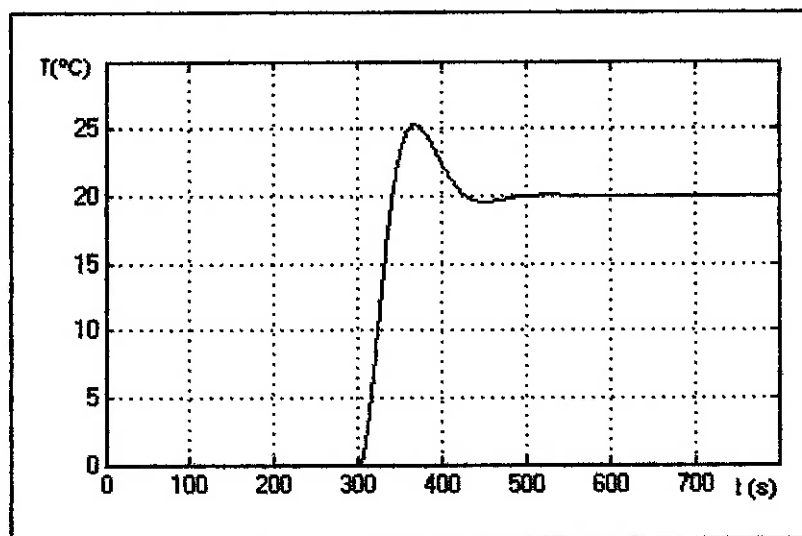


Figura 15: Saída do segundo estágio

O resultado das duas simulações pode ser melhor observado na figura 16, onde é possível observar no primeiro momento a atuação de um queimador e posteriormente a atuação de dois queimadores.

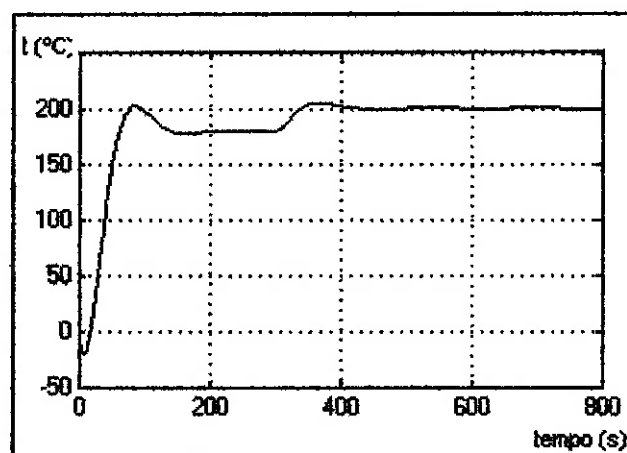


figura 16: Somatório das duas saídas

5.3 Modelagem da Parte Discreta

Seguindo a metodologia de projeto sistema de controle proposta por (Miyagi, 1996) , elaboramos, primeiro a lista dos principais componentes do sistema, e em seguida construímos as funções de controle.

5.3.1 Estudo do Objeto de Controle

O objeto de controle é um conjunto formado por vários elementos. Portanto, para compreender o objeto de controle, é necessário estudar as funções e as características de cada elemento, assim como identificar claramente as inter-relações entre estes elementos. Para cada um dos elementos do objeto de controle existem funções que devem ser pré-definidas. Existem ainda ações e operações que ativam a realização de funções e, como resultados destes comandos, têm-se transições de um estado para outro.

Neste trabalho iremos considerar a caldeira como objeto de controle. A produção de vapor é feita por intermédio do controle de fornecimento de água, acionamento de queimadores e monitoramento das condições de funcionamento. Segue a seguir a lista dos principais componentes do objeto de controle

A - Dispositivos de Atuação

Estes dispositivos são responsáveis pela modificação do estado do objeto a partir do sinal recebido pelo dispositivo de realização do controle.

- Bomba de fornecimento d'água – BAI
- Bomba de fornecimento de combustível principal – BC1
- Válvula de bloqueio do combustível piloto – VCP
- Acendedor de chama – AC
- Válvula de bloqueio do combustível principal do primeiro queimador – VBC1

- Válvula de bloqueio do combustível principal do segundo queimador – VBC2
- Válvula de modulação de combustível do primeiro queimador – VC1
- Válvula de modulação de combustível do segundo queimador – VC2
- Damper do primeiro queimador – D1
- Damper do segundo queimador – D2
- Ventilador de entrada de ar – V1
- Aquecedor de combustível – AQ
- Válvula de saída do vapor – VV

B - Dispositivos de controle

- Controlador PID número 1
- Controlador PID número2

C - Dispositivos de Detecção

Os dispositivos responsáveis pela detecção do estado do sistema são os sensores. Os principais sensores são:

- Sensor de nível superior de água
- Sensor de nível inferior de água
- Sensor de nível de segurança inferior de água
- Sensor de chama do combustível piloto
- Sensor de chama do combustível principal
- Pressostato de pressão máxima
- Presostato de modulação de chama do queimador 1

- Presostato de modulação de chama do queimador 2
- Sensores de fluxo de vapor
- Sensores de temperatura do combustível

D – Dispositivos de Comando e Monitoração

A função destes dispositivos é permitir que haja uma interação entre o usuário e o sistema.

- Botão de Partida
- Botão de Desliga
- Alarme

5.3.2 Levantamento e Análise das Funções de Controle

Nesta fase , é importante considerar não somente a operação em condições normais, mas também as medidas a serem tomadas em caso de falha. Como exemplo de técnica de identificação e análise das funções de controle, existe o diagrama de sistematização das funções. Primeiro, a função necessária é identificada e para facilitar sua avaliação, representa-se a função por um par “substantivo - verbo” . A seguir, para avaliar se as funções , classifica-se as mesmas em funções básicas e funções secundárias

- Funções básicas:

São funções que, se retiradas do sistema ou do elemento estrutural, o sistema em si ou o elemento deixa de ter sentido (funções de nível mais elevado)

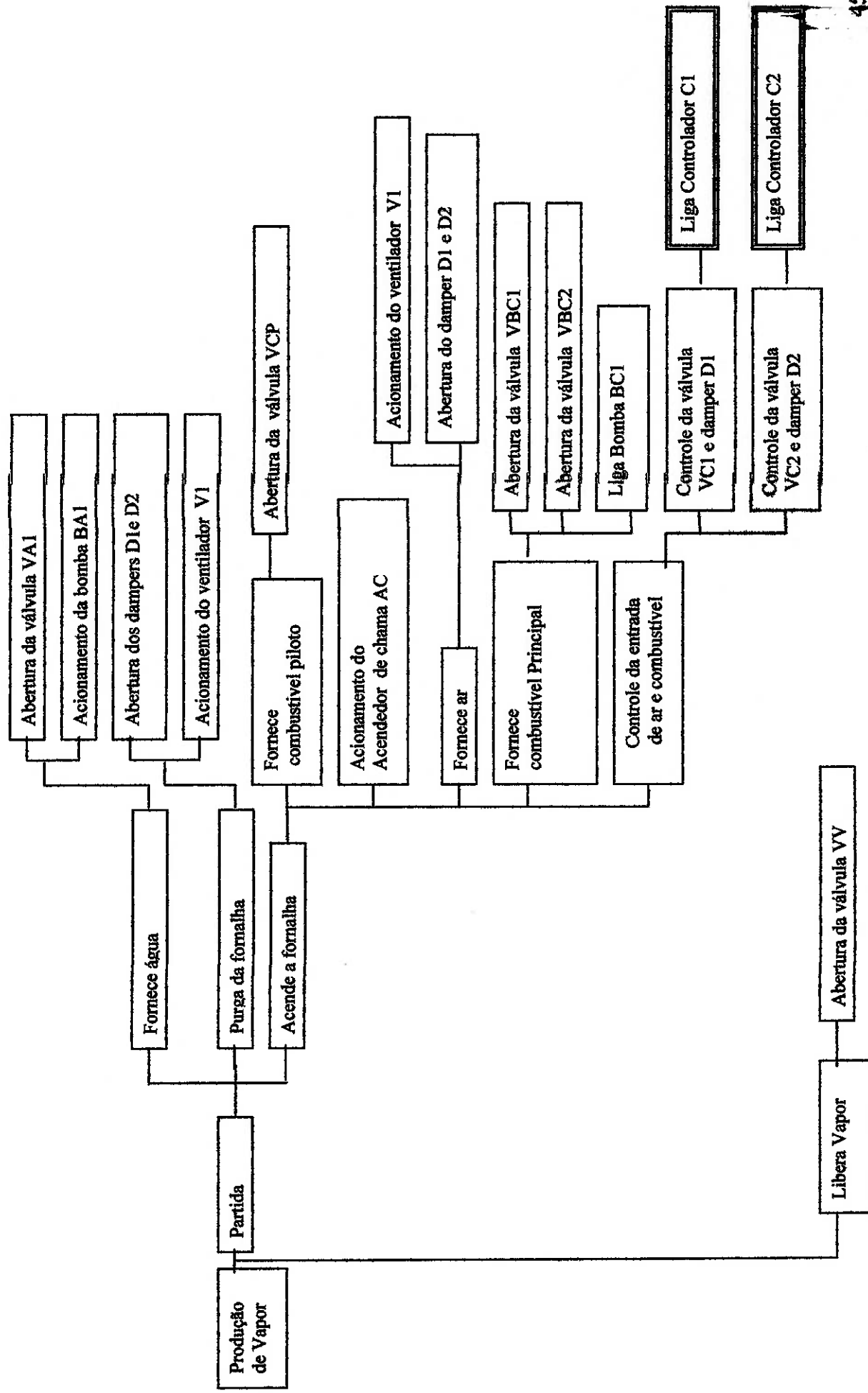
- Funções secundárias:

São as funções que auxiliam a realização das funções básicas ou que se tornam necessárias devido a uma decisão particular de projeto

Para sistematizar hierarquicamente o inter-relacionamento entre as funções são elaboradas as seguintes perguntas:

- Para funções de nível superior: por que esta função é necessária ?
- Para funções de nível inferior: como esta função será realizada ?

De acordo com o funcionamento do sistema e com base nas informações presentes na apostila elaborada por (Cete) construímos as funções de produção de vapor, desligamento e plano de emergência , que podem ser visualizadas na figuras 17, 18 e 19, respectivamente.



continuação

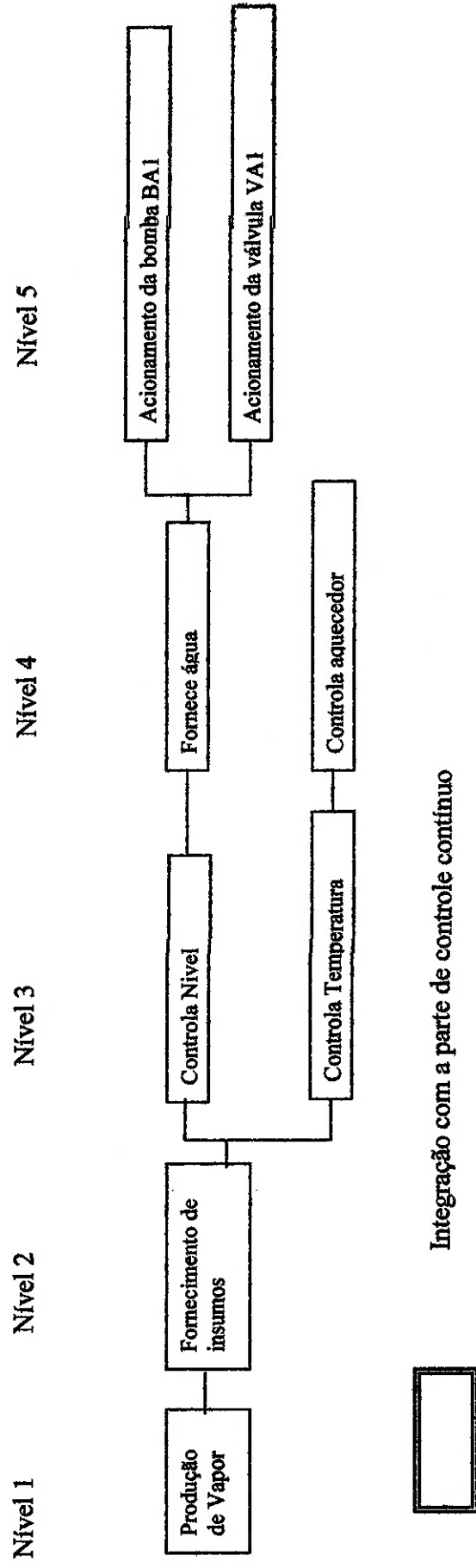


Figura 17: Estruturação da função produção de vapor para o sistema da caldeira

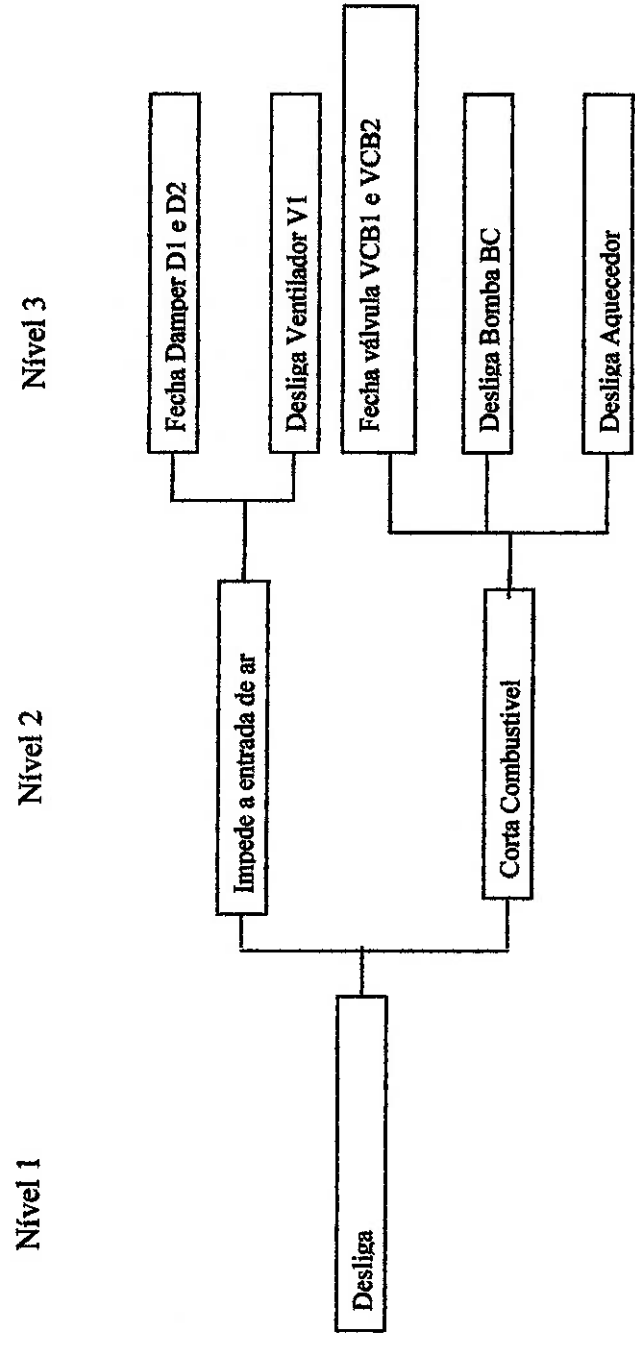


Figura 18: Estruturação da função de controle desliga para o sistema caldeira

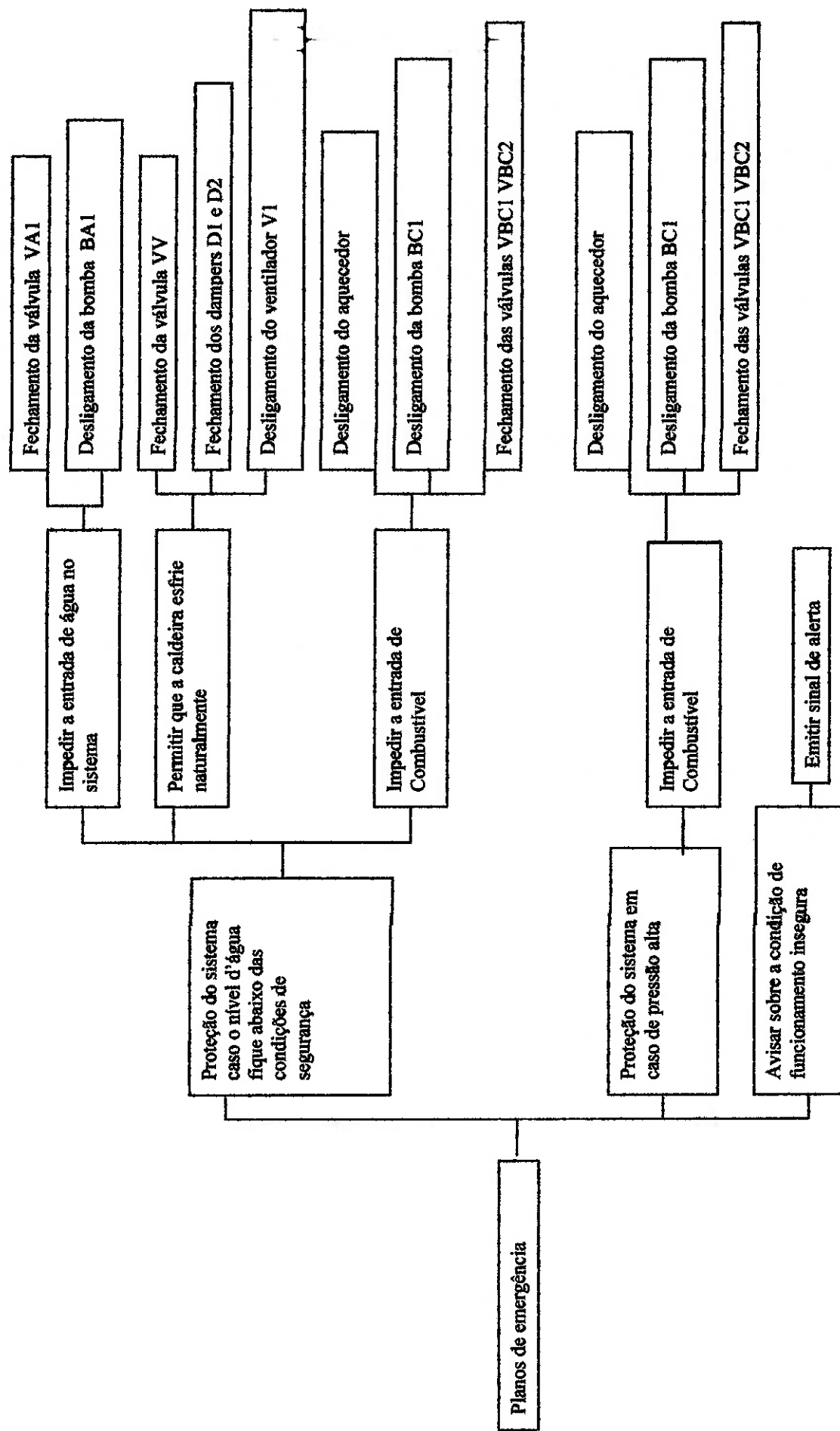


Figura 19: Estruturação da função plano de emergência para o sistema caldeira

5.3.3 Definição do fluxo das funções de controle

Para a realização das operações especificadas, deve-se definir os procedimentos que ativam as varias funções de controle anteriormente definidas, isto é, deve-se definir o fluxo das funções de controle. O PFS (Production Flow Schema) permite uma representação estruturada. Na sistematização do desenvolvimento de sistema de controle, o conceito de modularização é fundamental.

O PFS é utilizado para organizar a modelagem por redes. Esta rede permite que as atividades sejam agrupadas em macro-eventos . O PFS consiste de nós de *elementos-atividades*, nós de elementos distribuidores e arcos de fluxo, que conectam sequencialmente um tipo de nó ao outro.

O PFS, representado na figura 20, é composto por três elementos básicos,

- *Elementos (ativos) correspondentes à atividade*
- *Elementos (passivos) correspondentes à distribuição*
- *Arcos*, que representam as relações entre os elementos anteriores

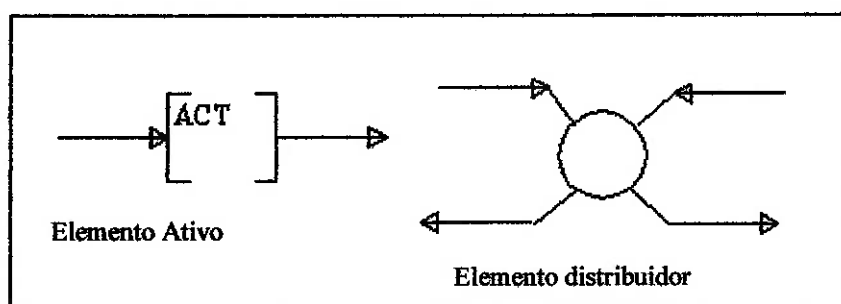


Figura 20: Elementos do PFS

O modelo criado em PFS permite uma visualização mais abrangente das atividades a serem realizadas no processo de controle.

No desenvolvimento das estratégias de controle de SED os eventos que englobam vários outros eventos e estados organizados hierarquicamente são tratados como macro-eventos. Desta forma é possível utilizar uma abordagem top-down, ou seja, primeiro são definidos os macro eventos e posteriormente são detalhados as funções de nível hierárquico mais baixo.

O PFS é a técnica que facilita a modelagem por redes, utilizando esta técnica é possível converter, após a modelagem, o conteúdo do modelo PFS em MFG interpretado.

A seguir, o PFS da figura 21, que contém as principais funções do sistema.

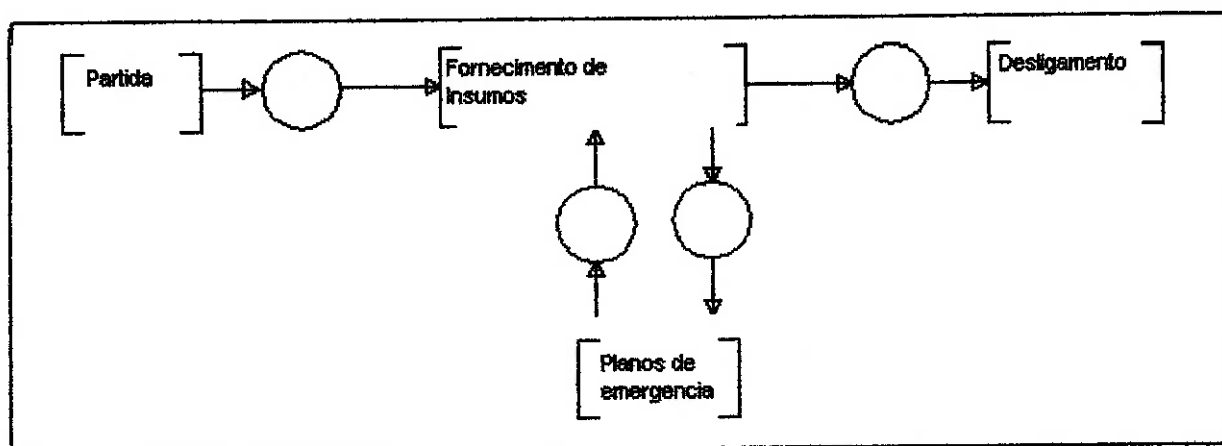


Figura 21: PFS Principal

A atividade da partida é composta por 3 atividades, duas que são concomitantes e outro que ocorre após o termino das duas primeiras. Antes de acender a fornalha é necessário abastecer a caldeira com água e realizar a purga dos gases para que então possamos acende-la. Estas atividades estão representadas na figura 22.

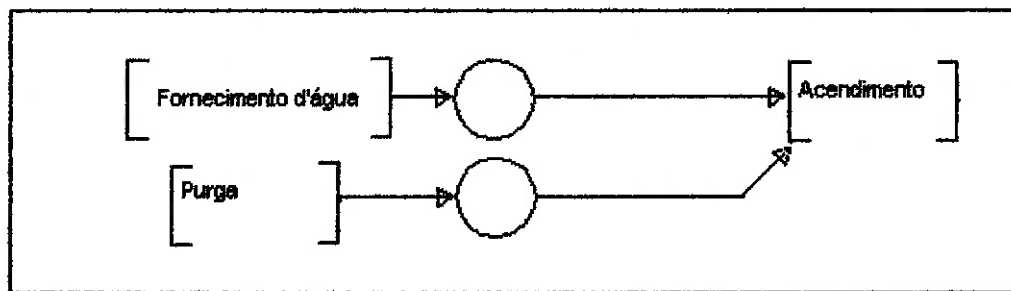


Figura 22: PFS Partida

Através das válvulas controladoras e dos dampers, os controladores ajustam a quantidade de combustível e ar que entram na fornalha a fim de controlar a pressão do vapor gerado. No decorrer do funcionamento do sistema gerador de vapor, as atividades de controle se concentram no fornecimento d'água, que ocorre conforme a demanda, e na manutenção da temperatura do combustível em uma certa faixa de temperatura. O fornecimento de insumos está condicionado não só a demanda, mas também às condições de segurança. Se durante o funcionamento da caldeira ocorrer o aumento inesperado da pressão do vapor, nível baixo d'água, o sistema de controle deve estar habilitado a cortar o fornecimento de insumos. Portanto, os dois macros eventos representados na primeira figura estão inter-relacionados entre si. Os suprimentos são controlados por intermédios de sensores e válvulas atuadoras, a cada instante, o sistema de controle lê as informações dos sensores e toma ações no sentido de abastecer o sistema. Caso ocorra alguma das condições anteriormente relacionada, o sistema de controle deve interromper o ciclo de fornecimento d'água e combustível anteriormente descrito e iniciar as atividades necessárias para impedir que danos maiores ocorram no sistema. O PFS, que representa o fornecimento de insumos, está ilustrado na figura 23.

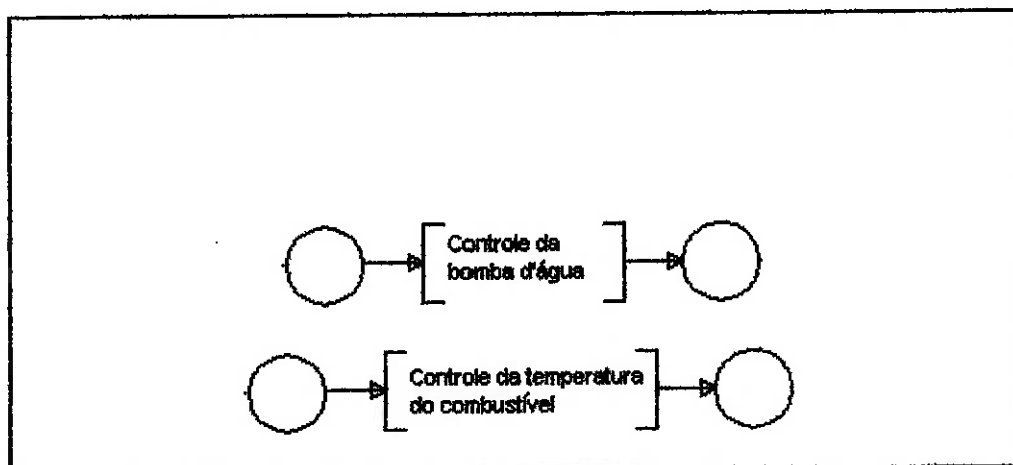


Figura 23 : PFS Fornecimento de Insumos

As atividades integrantes da macro atividade plano de emergência, figura 24, serão executadas quando ocorrer alguma situação que comprometa a segurança do sistema.

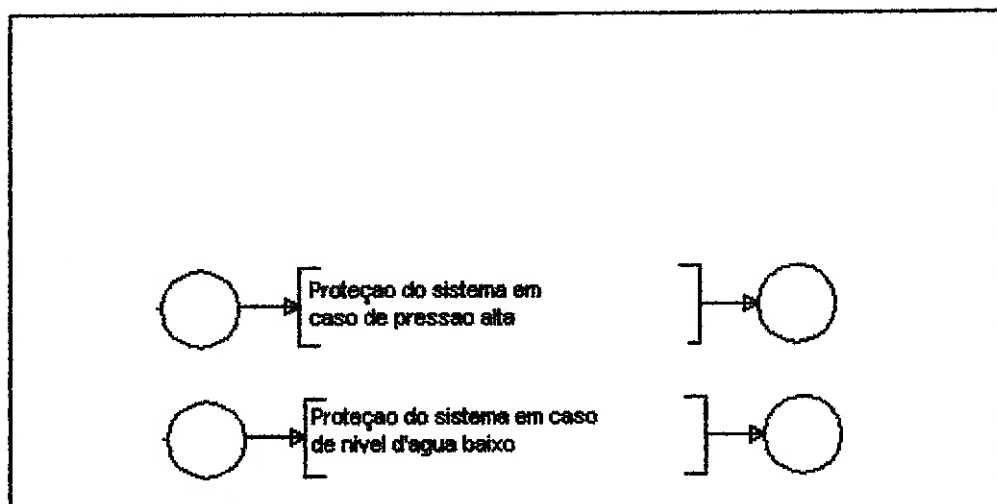


Figura 24: PFS Planos de Emergência

Para finalizar o detalhamento dos macros eventos, temos os procedimentos necessários para “apagar” a caldeira, representados pela figura 25.

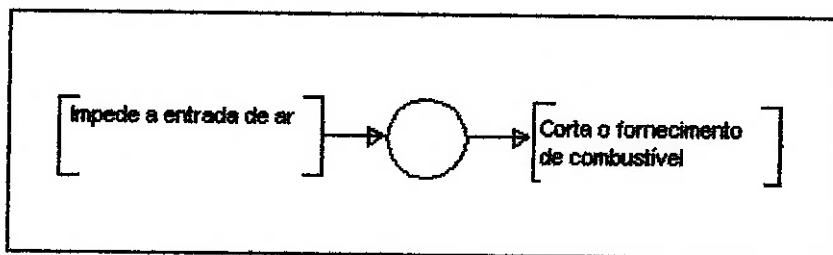


Figura 25 : PFS Desliga

5.3.4 Modelos

5.3.4.1 Mark Flow Graph

As redes MFG (Mark Flow Graph) são redes Condição/Eventos e derivadas das redes de Petri, o que a torna adequada para o controle de sistemas SED. No nível de implementação dos comandos num sistema de controle de SED um certo estágio de controle que está em execução indica uma “condição” que é interrompida por “eventos”, que são os delimitadores destes estágios. O MFG é composto pelos seguintes elementos estruturais, ilustrados na figura 26:

- Box: indica uma condição e é representado por um bloco quadrado (\square)
- Transição: indica um evento e é representado por uma barra vertical: ($|$)
- Arco orientado: conecta boxes e transições e estabelece uma relação causal entre os eventos e sua representação é dada por uma seta (\rightarrow)
- Marca: indica a permanência de uma condição, sendo representada por um ponto negro no interior do box correspondente (\blacksquare).
- Porta: permite ou inibe a ocorrência de eventos. A porta habilitadora ($\text{---}\bullet|$) compõe um AND lógico com as outras condições que possibilitam a ocorrência do evento correspondente. A porta inibidora ($\text{---}\circ|$) compõe um OR lógico com as outras condições, enquanto o sinal de origem for “1” a porta inibe a transição em que está

conectada. O valor do sinal é determinado pela existência de marca no box que a porta está conectada, ou seja, quando o box estiver com marca, o sinal é “1”; quando não existir marcas é “0”. As portas ainda podem ser classificadas em porta externa ou porta interna ou externa dependendo de acordo com a origem do sinal.

- Arco de sinal de saída: este arco envia um sinal binário do box para os dispositivos externos do grafo e é representado por uma linha que conecta estes dois elementos. Quando houver uma marca neste box, o sinal é “1”; quando não houver, é “0”.

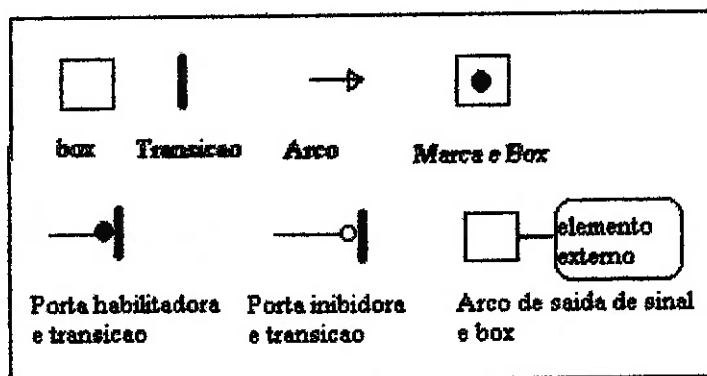


Figura 26: Elementos básicos do MFG

Marcação

O arranjo das marcas no grafo representa o estado do sistema que é alterado de acordo com a ocorrência de eventos. Para que o evento, ou disparo, possa ocorrer é necessário que as condições abaixo sejam satisfeitas:

- Box no lado de saída sem marcas
- Box no lado de entrada com marcas
- Arco habilitador no estado de habilitação
- Arco inibidor desativado

Ao ocorrer o disparo, as marcas dos boxes do lado de entrada das transições são transferidas para os boxes no lado da saída, conforme a figura 27 ilustra.

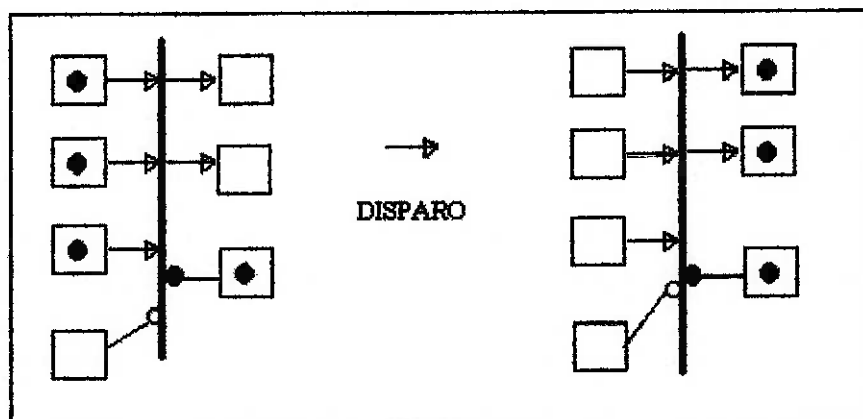


Figura 27: Disparo de uma transição

O MFG além de “herdar” a capacidade de análise e modelagem que as redes de Petri possuem, ele possui as seguintes características:

- ♦ No MFG temos no máximo apenas uma marca no interior de cada box, e com isto o modelo pode ser tratado por uma lógica binária, permitindo assim que a lógica montada no MFG seja transferida para CP's (Controladores Programáveis).
- ♦ O controle de SED evolui conforme a troca de sinais entre o controlador e o objeto de controle, isto é, o controlador envia sinais para os dispositivos que fazem com que a tarefa seja realizada e, ao receber o sinal de confirmação do término da tarefa gerado pelos dispositivos, passa para a etapa seguinte de controle.

Esta ultima característica permite que o MFG represente adequadamente não só o sistema de controle de SED mas também as interconexões entre o controlador e o objeto de controle.

5.3.4.2 Simulação

De uma forma geral, o sistema de controle proposto executa seqüência de atividades e monitora as condições de funcionamento da caldeira. Dada a natureza do modelo, optamos por simular o sistema no HPSim, uma vez que, esta simulação visa estudar o comportamento das variáveis discretas do sistema. A representação de arcos habilitadores e inibidores foi acrescentada nos modelos.

Partida e Fornecimento de Insumos (figura 28): O primeiro modelo consiste na seqüência principal, durante a sua execução ele envia e recebe sinais de outros modelos. Após o sinal de partida ser acionado dá-se início as atividades referentes à partida do sistema, e em seguida temos a ativação de dois estados “Verifica Nível do Tubulão” e “Verifica Temperatura do Combustível Principal”, que consiste no abastecimento d’água e controle da temperatura do combustível principal. Temos a retirada das marcas destes estados quando o sistema apresenta situações inseguras de funcionamento ou se o botão de desliga é acionado.

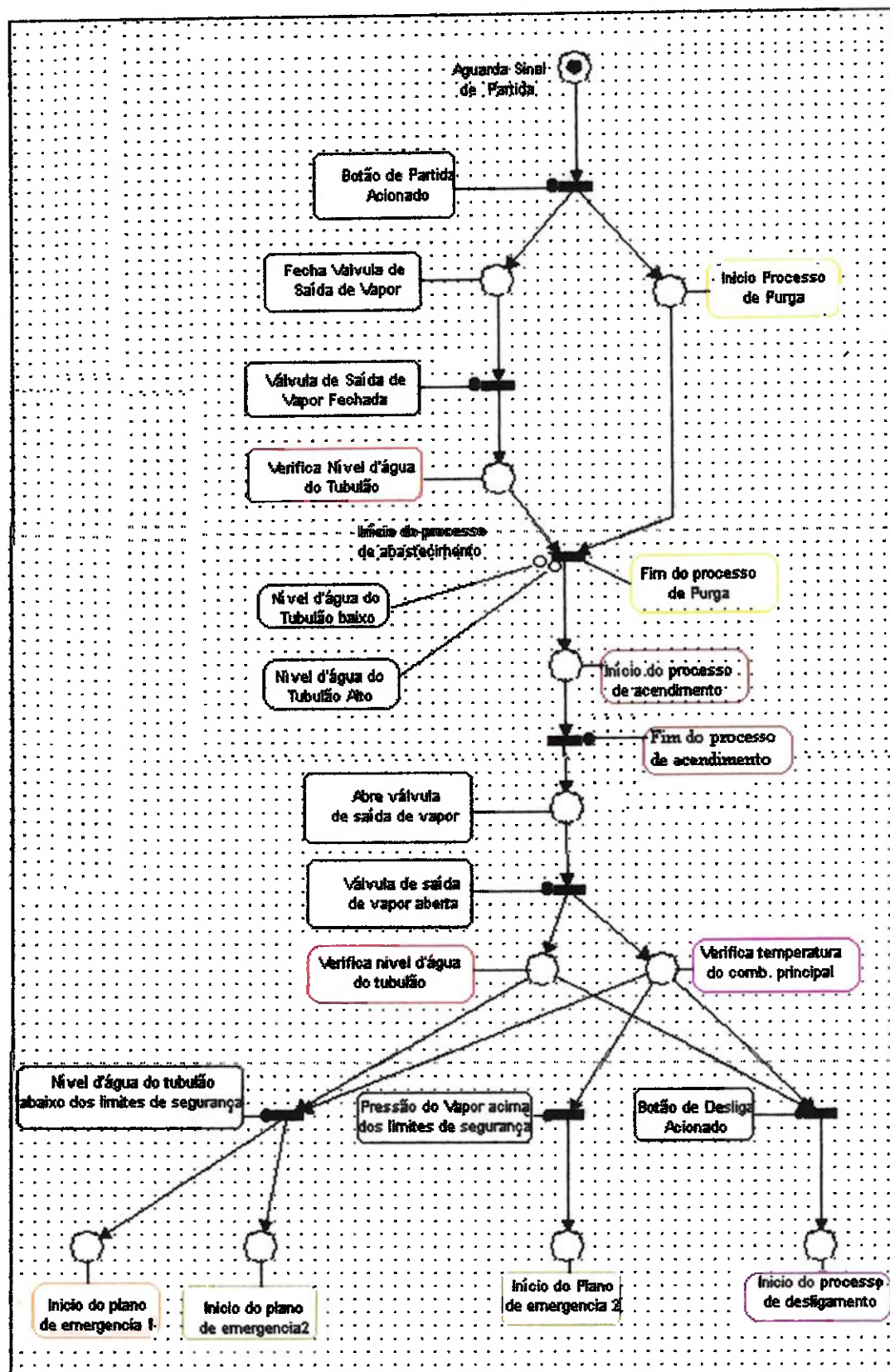


Figura 28 : Modelo Partida e Fornecimento de Insumos

Purga (figura 29): Este modelo possui a função de representar a purga da fornalha, que possui o objetivo de preparar a fornalha para o acendimento.

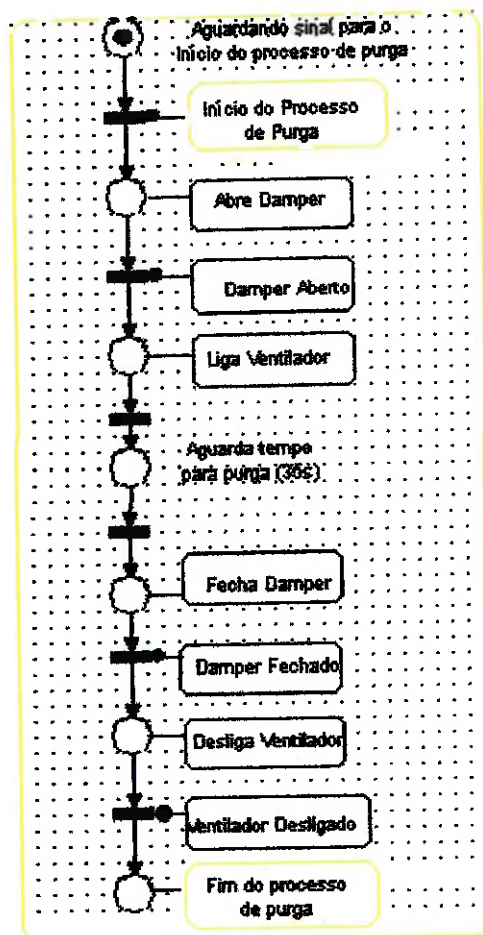


Figura 29: Modelo Purga

Verifica Nível do Tubulão (figura 30): O Modelo pode ser dividido em duas partes, a modelagem do sistema de controle e do objeto a ser controlado. A modelagem do objeto é representada por três estágios, que são “Baixo”, “Nível Intermediário” e “Alto”. As transições possuem um tempo de atraso para simular o tempo em que o Nível d’água do Tubulão permanece nos estados. De acordo com o nível d’água o sistema de controle toma ações com o intuito de manter a água em um nível intermediário.

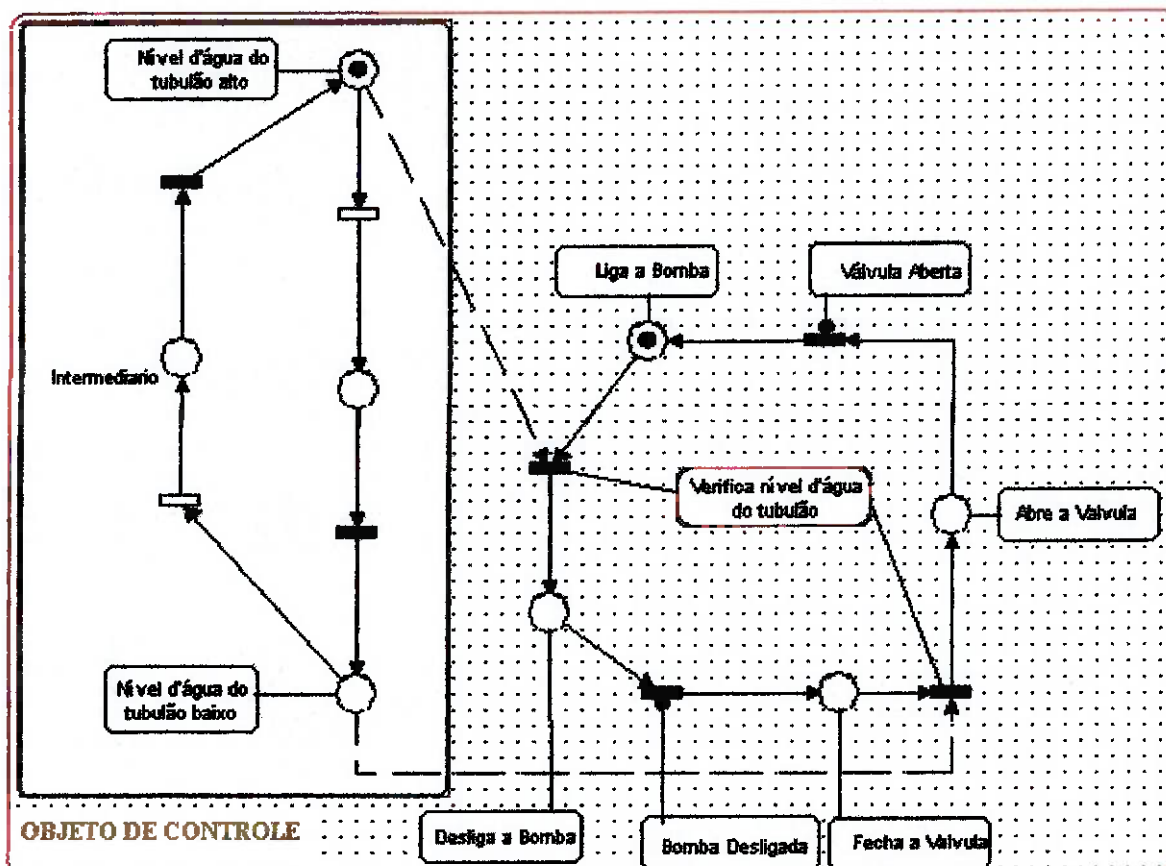


Figura 30: Modelo Verifica Nível d'água do tubo

Acendimento (figura 31): Este modelo interage com outro modelo através do estado “Verifica temperatura do comb. Principal”, que retorna o estado “Temperatura do comb. Principal entre 60°C e 120°C”. O intuito deste modelo é representar as ações que o sistema de controle deve executar para acender a fornalha. Durante a sua execução, temos a interação a com o controle das variáveis contínuas do sistema, que pode ser melhor compreendido na seção Modelagem Contínua.

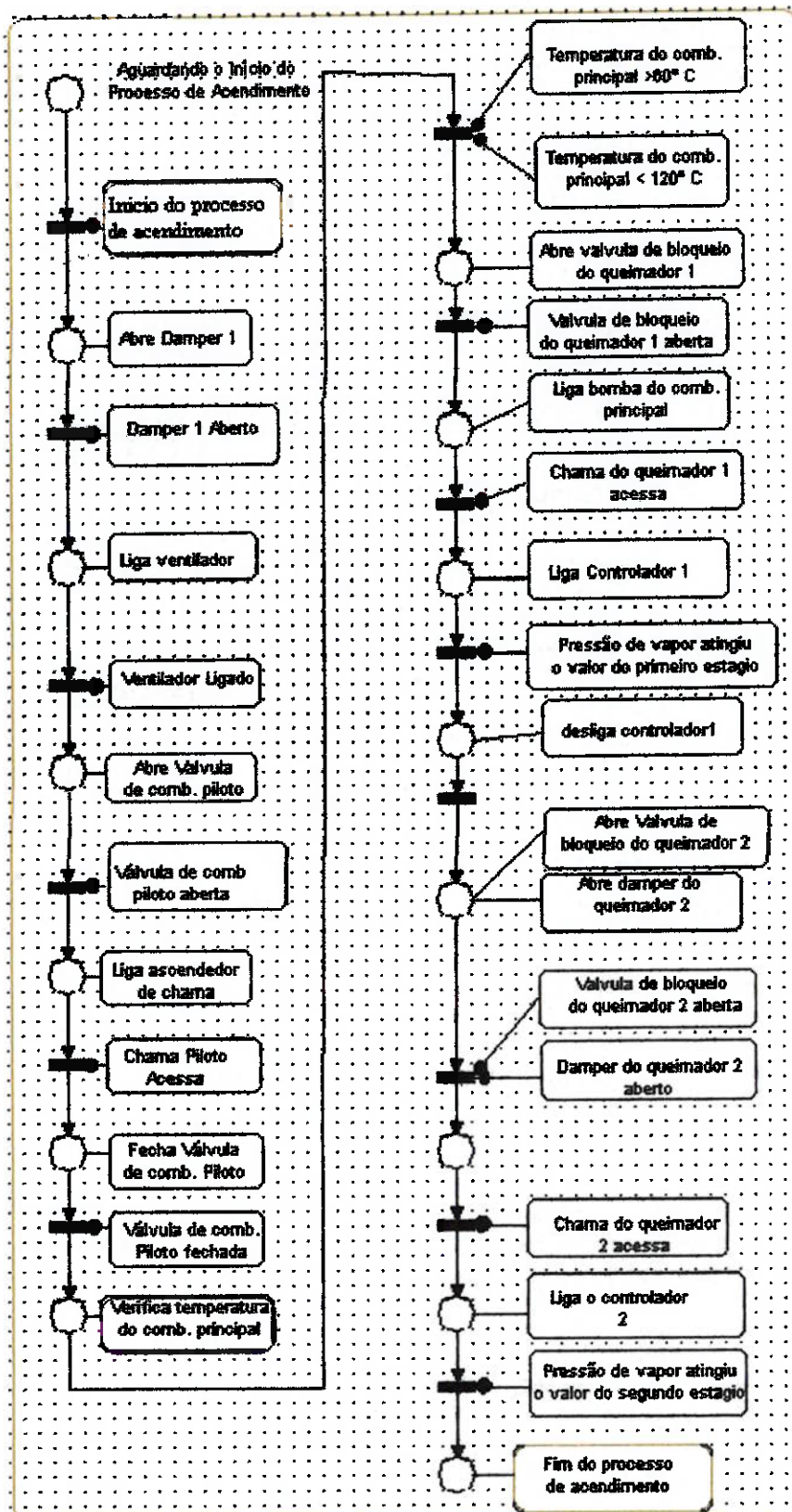


Figura 31: Modelo Acendimento

Verifica Temperatura do Combustível Principal (figura 32): Assim como o terceiro modelo, ele está dividido em duas partes, modelagem do sistema de controle e do objeto a ser controlado. De acordo com a temperatura do combustível o sistema de controle aciona o aquecedor com o intuito de manter a temperatura do combustível entre 60°C e 120°C.

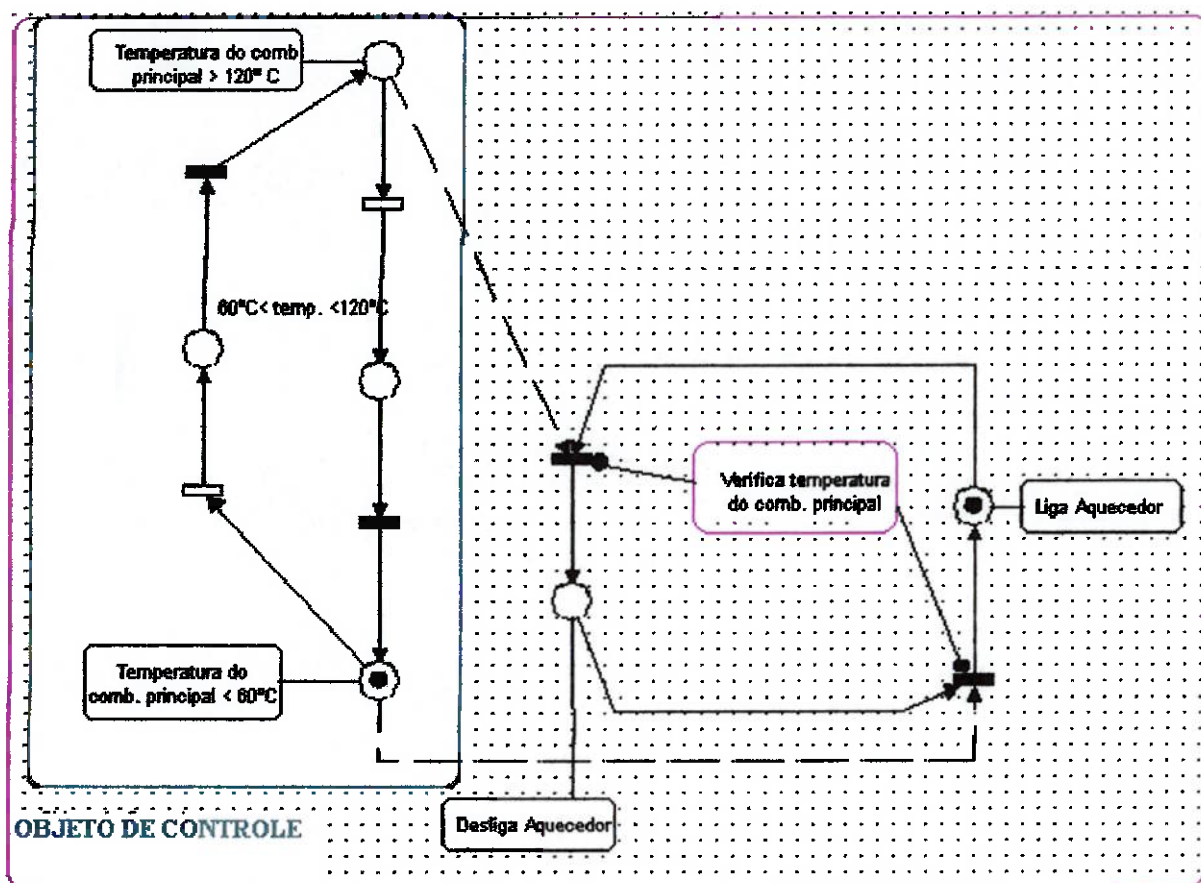


Figura 32: Modelo Verifica Temperatura do Combustível Principal

Planos de Emergência (figura 33): De acordo com a situação de emergência os planos são acionados, com o intuito de impedir a entrada de combustível no sistema e/ou a entrada de ar e água.

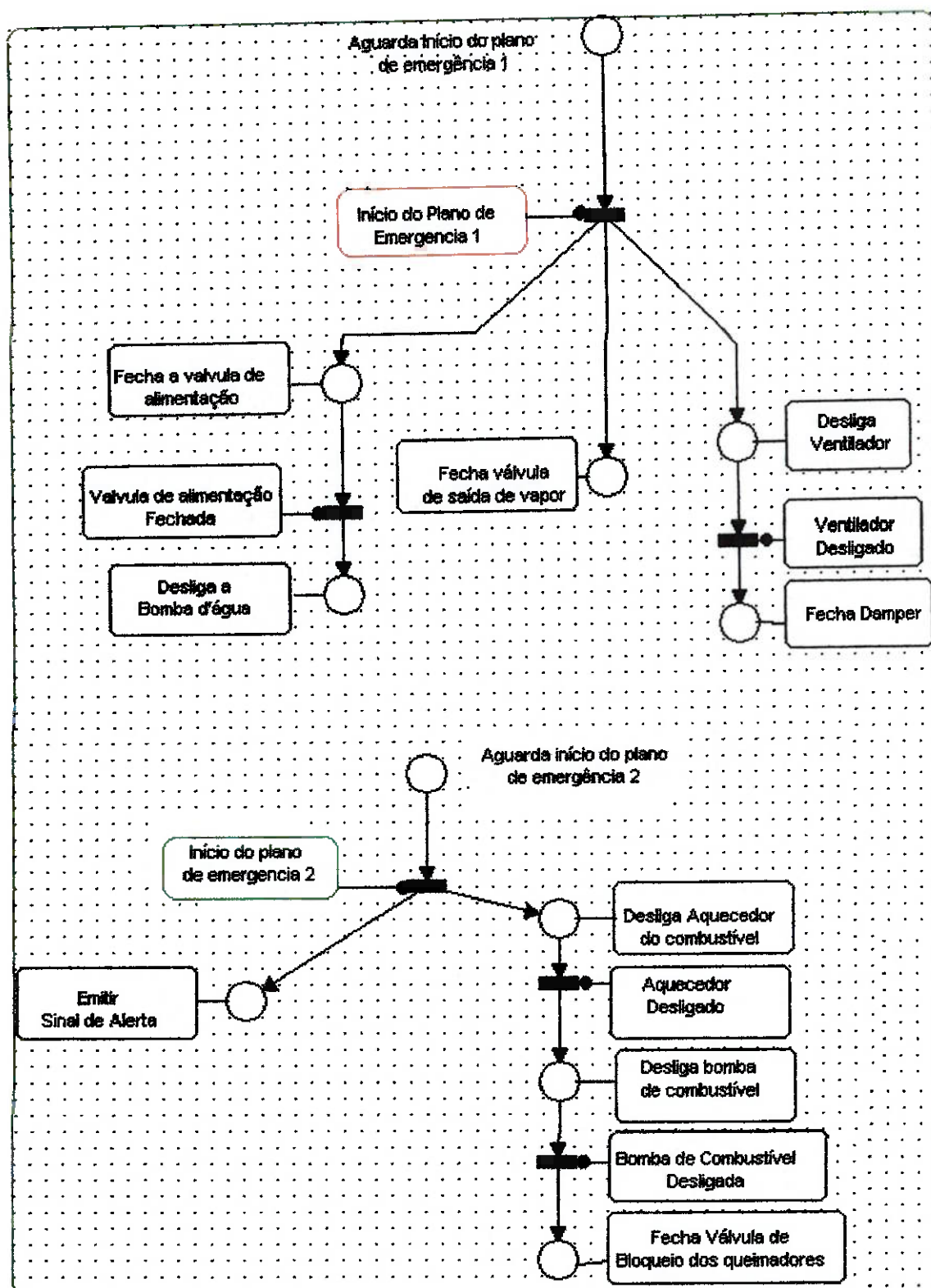


Figura 33: Modelos Planos de Emergência

Desligamento (figura 34): Este modelo representa as ações tomadas pelo sistema de controle para “apagar” a fornalha.

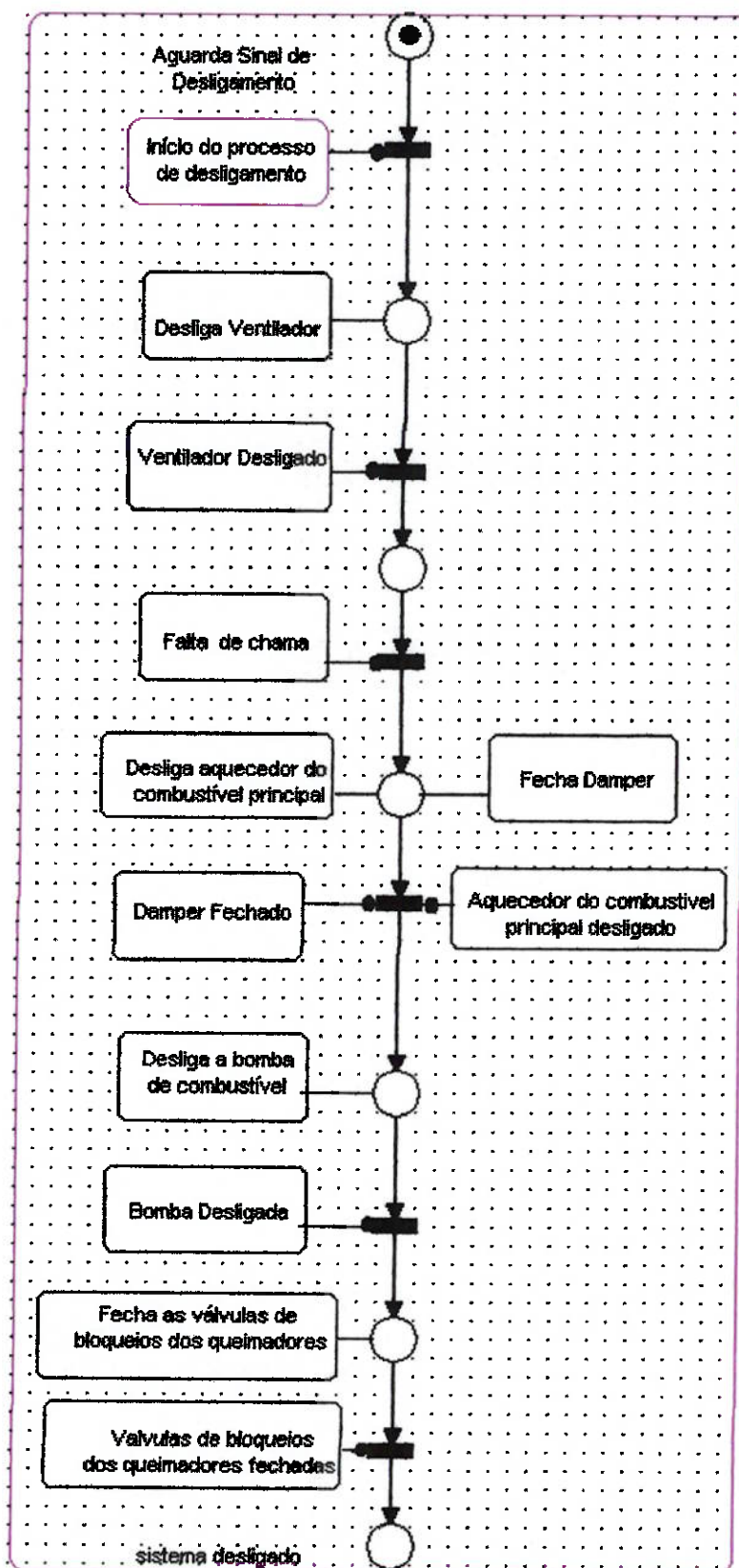


Figura 34: Modelo Desligamento

6 Conclusão

A classificação de um sistema como híbrido também é determinada pela existência da interação de um sistema de controle local basicamente contínuo com um sistema supervisorio a evento discreto, ou seja o processo é controlado com técnicas de controle contínuo de acordo com um planejamento discreto. Neste caso o sistema contém dois tipos de componentes que interagem entre si: sub-sistemas com variáveis contínuas e subsistemas a eventos discretos.

De acordo com a definição acima se pode classificar o sistema de controle de caldeira como híbrido, pois conforme pudemos observar o processo de produção de vapor é controlado com técnicas de controle contínuo de acordo com o tempo de estabilização dos sinais de pressão, ou seja, de acordo com eventos discretos.

As abordagens de sistemas híbridos combinam modelos de sistemas contínuos, descritos por equações diferenciais, e de sistemas discretos descritos por autômato finito ou redes de Petri, com a introdução de uma interface para a comunicação entre os dois tipos de modelos. Neste trabalho utilizamos modelos contínuos e discretos separadamente e definimos um modelo para a interface entre as duas partes.

Após realizar uma pesquisa com os profissionais da área de automação, verificamos que para se obter a função de transferência do sistema, é aplicada uma entrada degrau e de acordo com a saída do sistema a função de transferência é modelada. Como não dispormos de uma caldeira, o modelo físico do sistema foi obtido por intermédio da modelagem matemática.

No entanto o sistema de produção de vapor não é composto por apenas variáveis contínuas mas também por variáveis discretas, surge então a necessidade de modelar o sistema de forma a integrar o sistema supervisorio aos demais eventos discretos do sistema. Para elaborar uma proposta para o controle de sistema híbrido, definimos, primeiro, as

funções necessárias para a produção de vapor, de forma hierarquizada . Em seguida definimos os procedimentos que ativam as várias funções de controle anteriormente definidas, isto é, definimos o fluxo das funções de controle. Para esta parte do trabalho utilizamos modelos PFS, o que nos permitiu obter uma representação estruturada. E em seguida, cada macro atividade do PFS foi explodido em modelos, que foram simulados no HPSim.

A sistemática de projeto de sistema de controle para sistemas híbridos, deve conter modelagens contínuas e discretas. Após a elaboração de modelos contínuos, podemos elaborar a lógica de controle supervisiório. Através de aplicação da metodologia de projeto para sistemas SED, podemos integrar o controle supervisiório às demais funções discretas do sistema.

7 Bibliografia

ANTSAKLIS, Panos J; KOUTSOUKOS, Xenofon D.; **Hybrid Systems Control**; Nrote Dame; 2003

BAZZO, Edson. ,**Geração de vapor**; Ed UFSC; Florianópolis; 1992

CETE (Centro de especialização e treinamento empresarial) – **Treinamento de Segurança para Operador de Caldeira**

LUYBEN, William L.; **Process Modeling Simulation and Control for Chemical Engineers**; Editora McGraw; 1989

MIYAGI, P. E. ; **Controle Programável – Fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos**; Ed. Edgard Blücher Ltda; São Paulo; 1996

OGATA, Katsuhiko; **Engenharia de Controle Moderno**; Prentice Hall do Brasil; Rio de Janeiro; 2000.

SMITH, C.A. & CORRIPIO, A.B.; **Principles and Practice of Automatic Process Control**; John Wiley & Sons; 1985

VILLANI, Emília. **Abordagem híbrida para modelagem de sistemas de ar condicionado em Edifícios Inteligentes**; Tese de Mestrado; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2000

YEN-TSANG, Chen; MIYAGI, P. E.; VILLANI, Emília.; **Simulação de Sistemas Híbridos usando MatLab / Simulink**. ; Apresentado a II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica , João Pessoa –PB; 2002.