



Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Centro de Tecnologia - CT

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecatrônica

Controle do nível de água e pressão de uma caldeira de tubulão por meio do uso de inteligência artificial: aplicação de controlador fuzzy otimizado por algoritmo genético

Thiago de Araujo Brito

Natal-RN, Brasil

2022



Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Centro de Tecnologia - CT

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecatrônica

Controle do nível de água e pressão de uma caldeira de tubulão por meio do uso de inteligência artificial: aplicação de controlador fuzzy otimizado por algoritmo genético

Thiago de Araujo Brito

Orientador: Fábio Meneghetti Ugulino de Araujo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecatrônica da UFRN como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecatrônica.

Natal-RN, Brasil

2022

Controle do nível de água e pressão de uma caldeira de tubulão por meio do uso de inteligência artificial: aplicação de controlador *fuzzy* otimizado por algoritmo genético

Thiago de Araujo Brito

Dissertação de Mestrado aprovada em XX de xxxx de XXXX pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Fábio Meneghetti Ugulino de Araujo (orientador) DCA/UFRN

Prof. Dr. Pessoa 1 DEE/UFRN

Prof. Dr. Pessoa 2 DCA/UFRJ

Prof^a Dr^a Pessoa 3 DEE/UFSC

Natal-RN, Brasil

2022

Resumo

Diante das constantes evoluções tecnológicas que a sociedade moderna vivencia, as indústrias tem evoluído cada vez mais em busca de maior eficiência e confiabilidade de seus processos para atender a demanda do mercado cada vez mais competitivo. A busca por novas otimizações das atividades industriais tem alimentado o interesse no desenvolvimento de pesquisas voltadas para essa área. Apesar das diversas evoluções tecnológicas que as indústrias passam constantemente, o vapor permanece presente em seus processos desde a primeira revolução industrial, sendo ele utilizado para realizar movimentos em máquinas, o que revolucionou o processo produtivo da época. Nos dias atuais sua presença permanece vasta em diferentes tipos de indústria, sendo utilizado amplamente para aquecimento e geração de eletricidade. O equipamento utilizado para a geração de vapor é a caldeira. No processo de geração de vapor em uma caldeira, há duas variáveis de grande importância para o controle que são o nível de água no tubulão e a pressão de vapor no tubulão. O controle dessas variáveis garante a segurança operacional da máquina e o atendimento dos parâmetros do processo por meio da pressão do vapor exigida. Dessa forma, o problema de controle de caldeira é de grande interesse no meio acadêmico e industrial. Para o controle das variáveis relatadas, se faz necessário basicamente a atuação nas válvulas de alimentação de água e de saída de vapor saturado do tubulão. Com base nisso, esse trabalho tem o propósito de realizar o controle do nível de água e da pressão no tubulão de uma caldeira do tipo aquatubular por meio da inteligência artificial a fim de evitar variações indesejadas de nível e pressão ao passar por variações de carga. Para isso, se faz uso de controladores *fuzzy* otimizados por algoritmo genético. O desenvolvimento do trabalho se deu inicialmente pela modelagem dinâmica de uma caldeira de tubulão, seguido pela modelagem das válvulas de controle de água de alimentação e saída de vapor do tubulão e definição dos atuadores utilizados nas válvulas. Em seguida o modelo foi implementado nos softwares Simulink e Matlab e validados por meio da avaliação da resposta do sinal de saída ao realizar variações nos sinais de entrada. Após a validação, os controladores *fuzzy* foram implementados utilizando funções de pertinência do tipo triangular. Com o sistema todo implementado, uma sintonização inicial foi realizada de forma empírica para definição dos parâmetros dos controladores *fuzzy*. Por fim, os controladores foram otimizados por meio do algoritmo genético e testes foram realizados para o modelo com variações de cargas de média a alta e seus resultados avaliados.

Palavras-chave: Caldeira. Controle. Inteligência artificial. *Fuzzy*. Algoritmo Genético.

Abstract

Faced with the constant technological evolutions that modern society experiences, industries have evolved more and more in search of greater efficiency and reliability of their processes to meet the demand of the increasingly competitive market. The search for new optimizations of industrial activities has fueled the interest in the development of research focused on this area. Despite the various technological developments that industries constantly undergo, steam remains present in their processes since the first industrial revolution, being used to perform movements in machines, which revolutionized the production process of the time. Nowadays its presence remains vast in different types of industry, being widely used for heating and electricity generation. The equipment used for steam generation is the boiler. In the process of generating steam in a boiler, there are two variables of great importance for control, which are the water level and the steam pressure in the drum. The control of these variables guarantees the operational safety of the machine and compliance with the process parameters through the required steam pressure. Thus, the boiler control problem is of great interest in academia and industry. In order to control the variables reported, it is basically necessary to act on the water supply and saturated steam exit valves of the drum. Based on this, this work aims to control the water level and pressure in the drum of a water-tube boiler through artificial intelligence in order to avoid unwanted variations in level and pressure when going through load variations. For this, fuzzy controllers optimized by genetic algorithm are used. The development of the work was initially carried out by the dynamic modeling of a drum-boiler, followed by the modeling of the control valves of feed water and steam output of the drum and definition of the actuators used in the valves. Then the model was implemented in the softwares Simulink and Matlab and validated by evaluating the response of the output signal when performing variations in the input signals. After validation, the fuzzy controllers were implemented using triangular membership functions. With the entire system implemented, an initial tuning was performed empirically to define the parameters of the fuzzy controllers. Finally, the controllers were optimized through the genetic algorithm and tests were performed for the model with load variations from medium to high and their results evaluated.

Keywords: Boiler. Control. Artificial Intelligence. Fuzzy. Genetic Algorithm.

Listas de ilustrações

Figura 1 – Eolípila	9
Figura 2 – A máquina de Papin	10
Figura 3 – A bomba de Savery	11
Figura 4 – A máquina de Newcomen	12
Figura 5 – Motor a vapor de Watt	12
Figura 6 – Locomotiva a vapor de Trevithickr	13
Figura 7 – Nível de água de operação normal	15
Figura 8 – Controlador com três elementos	18
Figura 9 – Esquematização da caldeira de tubulão com <i>risers</i> e <i>downcomers</i>	21
Figura 10 – Vazão através da válvula	22
Figura 11 – Caldeira flamotubular de 3 passes	25
Figura 12 – Caldeira aquatubular	26
Figura 13 – Circulação de água em caldeira aquatubular	27
Figura 14 – Arranjo típico do interior de um tubulão superior	28
Figura 15 – Função de pertinência bivalente	31
Figura 16 – Função de pertinência <i>fuzzy</i>	32
Figura 17 – Intersecção de conjuntos <i>fuzzy</i>	34
Figura 18 – União de conjuntos <i>fuzzy</i>	35
Figura 19 – Exemplos de funções de pertinência	35
Figura 20 – Processo de Fuzzificação.	37
Figura 21 – Processo de defuzzificação.	38
Figura 22 – Agregação em um sistema com duas regras.	40
Figura 23 – Agregação em um sistema com duas regras.	41
Figura 24 – Tabela de regras <i>fuzzy</i>	42
Figura 25 – Tabela de regras <i>fuzzy</i>	43
Figura 26 – Fluxograma do Algorítimo Genético.	46
Figura 27 – Esquematização simplificada de uma caldeira.	50
Figura 28 – Temperatura de saturação	60
Figura 29 – Entalpia líquido saturado	60
Figura 30 – Entalpia vapor saturado	61
Figura 31 – Densidade líquido saturado	61
Figura 32 – Densidade vapor saturado	62
Figura 33 – Válvula globo	63
Figura 34 – Tipos de obturador e sede válvula globo	65
Figura 35 – Características de fluxo inerentes por tipo de válvula	65
Figura 36 – Relação elevação da sede com vazão	66

Figura 37 – Atuador elétrico	67
Figura 38 – Implementação Simulink/Matlab	70

Sumário

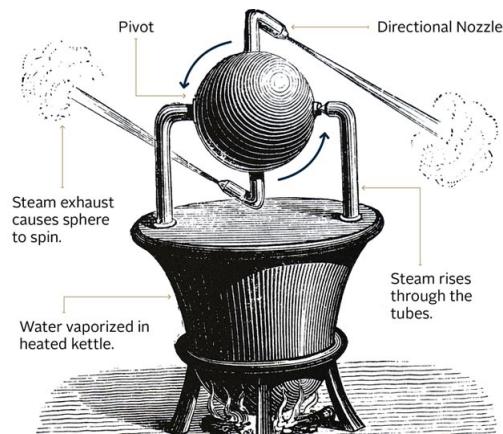
1	Introdução	9
1.1	Justificativa	13
1.2	Proposta de controle	20
1.3	Objetivo geral	22
1.4	Objetivos específicos	23
1.5	Organização do texto	23
2	Fundamentação teórica	24
2.1	Caldeiras	24
2.2	Sistema inteligente	26
2.3	Modelagem do sistema	27
2.4	Princípios básicos de lógica Fuzzy	29
2.4.1	Bivalência	30
2.4.2	Multivalência	30
2.5	Noções básicas sobre conjuntos	30
2.6	Operações entre conjuntos no mesmo universo de discurso	32
2.6.1	Subconjuntos <i>fuzzy</i>	33
2.6.2	Intersecção de conjuntos <i>fuzzy</i>	33
2.6.3	União de conjuntos <i>fuzzy</i>	33
2.7	Funções de pertinência <i>fuzzy</i>	34
2.8	Fuzzyficação	36
2.9	Vetor de possibilidades	37
2.10	Defuzzyficação	37
2.10.1	Defuzzificação centro da área (centróide)	38
2.11	Controladores fuzzy baseados em regra	39
2.11.1	Inferência fuzzy	40
2.11.2	Controlador <i>fuzzy</i> usando inferência Máx-Mín	40
2.11.3	Tabela de regras fuzzy	42
2.12	Controlador Proporcional-Integral (PI) fuzzy	42
2.13	Controlador Mamdani	43
2.14	Controlador Tagaki-Sugeno-Kang	44
2.15	Algorítimo Genético (<i>Genetic Algorithm</i>)	44
2.15.1	Inicialização	45
2.15.2	Gerações	46
2.15.3	Índices de avaliação de controladores	47
3	Metodologia	49

3.1	Modelagem dinâmica	49
3.1.1	Distribuição do vapor na caldeira	53
3.1.2	Razão média de volume de vapor nos tubos <i>risers</i>	54
3.1.3	Agrupamento de parâmetros	54
3.1.4	Fluxo de circulação	55
3.1.5	Distribuição de vapor no tubulão	55
3.1.6	Nível de água no tubulão	56
3.1.7	O modelo	56
3.1.8	Parâmetros do modelo	58
3.1.9	Valores de equilíbrio no estado estacionário	58
3.1.10	Solução do modelo	58
3.1.11	Tabelas de vapor	59
3.2	Válvulas de controle	61
3.2.1	Válvula água de alimentação	63
3.2.2	Válvula vapor saturado	63
3.2.3	Característica de fluxo	64
3.2.4	Atuadores das válvulas	66
3.3	Validação do modelo	66
3.4	Controladores <i>fuzzy</i>	67
3.5	Otimização por Algoritmo Genético (AG)	68
3.5.1	Inicialização	68
3.5.2	Gerações	69
3.5.3	Índices de avaliação de controladores (custos)	69
3.6	Implementação Simulink/Matlab	69
4	Considerações parciais	71
5	Cronograma	72
	Referências	73

1 Introdução

O uso do vapor pelo homem é conhecido na história desde o primeiro século d.c. O primeiro caso relatado do seu uso foi pelo matemático grego Heron de Alexandria, onde ele inventou a máquina Eolípila mostrada na figura [Figura 1](#).

Figura 1 – Eolípila



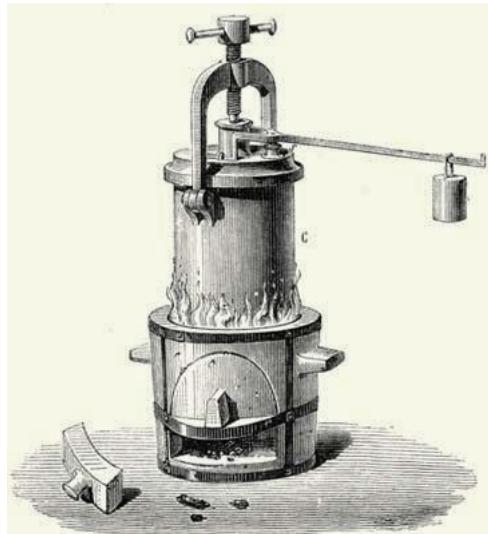
Fonte: [Scientia73 \(2020\)](#)

Essa invenção consistia em uma esfera metálica vazia em seu interior e conectada a tubos ligados a uma caldeira, onde se gerava vapor. Caldeira se refere ao recipiente onde era adicionado água e submetido a uma fonte de calor, fazendo com que a água presente no seu interior entrasse em ebulição, consequentemente gerando vapor. A esfera continha dois tubos em formato de "L" em direções opostas. O vapor gerado no interior da caldeira fluía para o interior da esfera pelos tubos que os conectavam. O vapor contido na esfera era liberado para a atmosfera por meio dos dois tubos em formato de "L". Ao liberar o vapor pelos tubos em "L", era gerado um movimento de rotação da esfera. Esse foi então o primeiro uso do vapor conhecido na história. Mas apesar de gerar movimento rotacional, o equipamento não realizava nenhum trabalho útil, sendo considerado apenas como algo para entretenimento ([ENGENHARIA, 2016](#)) ([BRITANNICA, 2020c](#)) ([BRITANNICA, 2020a](#)).

Somente após dezesseis séculos do primeiro relato do uso do vapor, começaram a surgir novas invenções a base do seu uso. Denis Papin foi um dos pioneiros no descobrimento da aplicação do vapor. Em 1679, Papin desenvolveu um vaso fechado com uma tampa bem ajustada, o qual permitia que o vapor gerado no seu interior fosse armazenado, resultando em uma elevação da pressão no seu interior. Como consequência, a temperatura de evaporação da água contida no interior do vaso aumentava de acordo com a pressão.

A invenção de Papin é então considerada a criação da panela de pressão. Papin também percebeu a necessidade da criação de um dispositivo de segurança que fosse capaz de manter a pressão no interior do recipiente dentro do admissível pelo material utilizado. Foi ele então, quem criou a primeira válvula de segurança (BRITANNICA, 2020b) (BRITANNICA, 2020d).

Figura 2 – A máquina de Papin

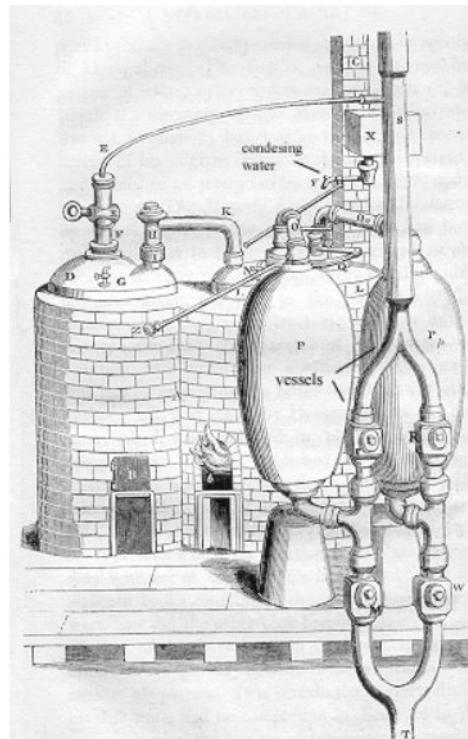


Fonte: <http://invencoeseseculoxix.blogspot.com> (Acesso em: 22/05/2022)

No ano de 1698, o engenheiro inglês Thomas Savery inventou a primeira máquina térmica de interesse da indústria. Savery se baseou na panela de pressão de Papin de 1679 e criou uma máquina que produzia vácuo para retirada de água no interior das minas. A máquina consistia em um sistema de funcionamento simples, onde vapor era introduzido em alta pressão no interior do vaso. Em seguida, ele era resfriado rapidamente, resultando na condensação do vapor. Após a condensação do vapor, era gerado um vácuo no interior do vaso. O vácuo gerado fazia com que a água da mina fluísse para o interior do vaso. Eram então, realizadas manobras em válvulas e em seguida inserido vapor novamente a alta pressão para o vaso, fazendo com que a água em seu interior agora fosse deslocada para fora (BELLIS, 2020).

Um aperfeiçoamento da máquina de Savery surgiu no ano de 1712, quando o inglês Thomas Newcomen criou uma nova máquina para retirar água do interior das minas. A máquina de Newcomen possuía um mecanismo diferente da máquina de Savery. Apesar de usar o princípio da geração do vácuo por meio do vapor, assim como Savery, a diferença na máquina de Newcomen é que ele utilizou o vácuo dentro de um cilindro que continha um pistão que poderia se deslocar livremente no interior do cilindro. Dessa forma, o vácuo era gerado no interior do cilindro e por meio da pressão atmosférica que exercia uma força externa maior do que a interna, resultava no deslocamento do pistão para baixo. Ao inserir

Figura 3 – A bomba de Savery



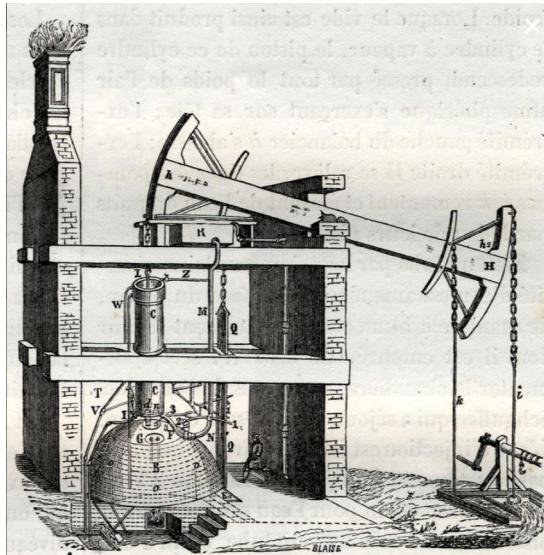
Fonte: <https://www.egr.msu.edu/lira/supp/steam/savery.htm> (Acesso em: 22/05/2022)

vapor novamente no interior do cilindro, o pistão era deslocado para cima. Além disso, Newcomen utilizou um braço de alavanca para transferir a força gerada no deslocamento do pistão para o eixo da bomba que ia até o interior da mina. Esse foi então considerado o primeiro motor prático que utilizou um pistão e cilindro (BBC, 2020).

Por volta do ano de 1763, o engenheiro mecânico e matemático escocês James Watt recebeu em sua oficina uma máquina Newcomen para conserto, a mais moderna do período. Watt observou ineficiências na máquina de Newcomen, principalmente perda de grande quantidade de calor. Watt começou, então, a desenvolver melhorias para o modelo. Para o primeiro grande problema observado por ele, desenvolveu uma câmara de condensação separada para o motor a vapor, o que previnu grandes perdas de vapor. O modelo de Watt se tornou predominante e é considerado, por muitos, que sua máquina foi quem proporcionou o surgimento da revolução industrial (FRAZAO, 2021) (UNICAMP, 1996) (BBC, 2014).

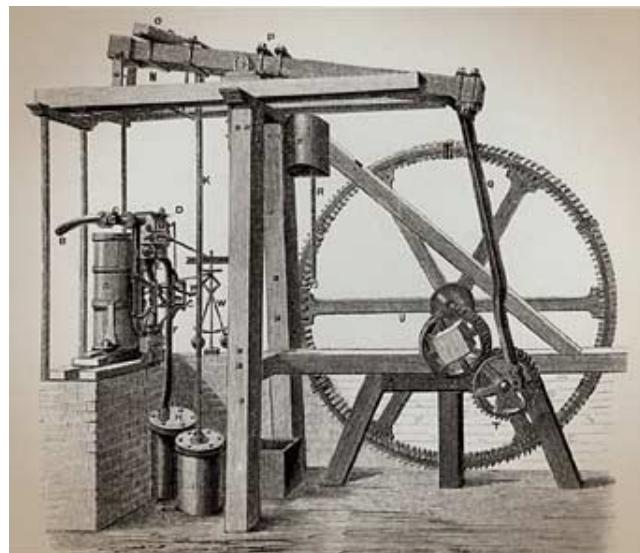
Na virada para século XIX, o engenheiro mecânico britânico Richard Trevithick é creditado como o inventor do primeiro motor a vapor de alta pressão e a primeira locomotiva a vapor operacional. No ano de 1797, Trevithick desenvolveu um motor a vapor mais compacto que o de Watt, que utilizava vapor a alta pressão. Dando continuidade em suas invenções, ele estava interessado em desenvolver motores capazes de deslocar

Figura 4 – A máquina de Newcomen



Fonte: <https://www.historycrunch.com/thomas-newcomen.html/> (Acesso em: 22/05/2022)

Figura 5 – Motor a vapor de Watt



Fonte: <https://www.asme.org/topics-resources/content/james-watt> (Acesso em: 22/05/2022)

locomotivas. Foi no ano de 1801 que Trevithick revelou sua primeira locomotiva movida a vapor a alta pressão. No ano de 1804, desenvolveu a primeira locomotiva a vapor a se deslocar em trilhos. A locomotiva foi capaz de transportar cinco carros carregados com dez toneladas de ferro e setenta trabalhadores por cerca de nove milhas, deslocando-se a uma velocidade aproximada de cinco milhas por hora (RICCI, 2012) (HISTORY, 2009).

Figura 6 – Locomotiva a vapor de Trevithickr



Fonte: <https://museum.wales/articles/1012/Richard-Trevithicksquos-steam-locomotive/>
(Acesso em: 22/05/2022)

1.1 Justificativa

De acordo com o abordado, é possível perceber a importância do vapor nas evoluções tecnológicas. O seu uso é relatado desde o primeiro século d.c., associado às locomotivas e à revolução industrial. O vapor pode então ser considerado como um importante meio de geração, transporte e utilização de energia. Atualmente, o vapor está cada vez mais presente na vida das pessoas, seja no uso industrial ou doméstico. Como um grande aliado da indústria, é possível citar dois grandes exemplos de sua utilização: **para aquecimento**, seja por injeção direta de vapor no meio que se deseja aquecer, ou por injeção indireta, utilizando trocadores de calor; **para movimentação**, sendo o vapor fonte de força motriz, geralmente utilizado nas turbinas de geração de energia elétrica. Muitos dos processos industriais da atualidade não seriam viáveis sem o uso do vapor. Dessa forma, o vapor é de fundamental importância na vida das pessoas, seja de forma direta ou indireta (FOLGER, 2019) (TOGAWA, 2018) (TLV, 2022).

De acordo com a Norma Regulamentadora 13 (NR 13), "caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, excetuando-se refervedores e similares." (BRASIL, 2018). Dessa forma, quando se fala em vapor, está diretamente relacionado à caldeiras. Dentre os diferentes tipos de caldeiras, os mais comumentes utilizados na indústria podem ser divididos em três grandes grupos que são as caldeiras aquatubulares, flamotubulares e mistas. As caldeiras aquatubulares são aquelas em que a água passa pelo interior dos tubos e os gases aquecidos por fora, realizando a troca de calor. O modelo flamotubular é o oposto, ou seja, os gases e fumaça aquecidos resultantes da combustão passam pelo interior dos tubos, enquanto a água cobre os tubos por fora, recebendo assim o calor dos gases. Já o modelo misto é aquele em que há uma

parte da caldeira que é aquatubular e outra flamotubular (MBX, 2021).

Ainda de acordo com a NR 13, alguns itens de segurança são obrigatórios em todas as caldeiras para a sua segurança operacional, entre eles: válvula de segurança, instrumento que indique a pressão do vapor acumulado (manômetro), injetor ou sistema de alimentação de água reserva, sistema dedicado de drenagem rápida de água em caldeiras de recuperação de álcalis com ações automáticas após acionamento pelo operador e sistema automático de controle do nível de água com intertravamento que evite o superaquecimento por alimentação de água deficiente (BRASIL, 2018).

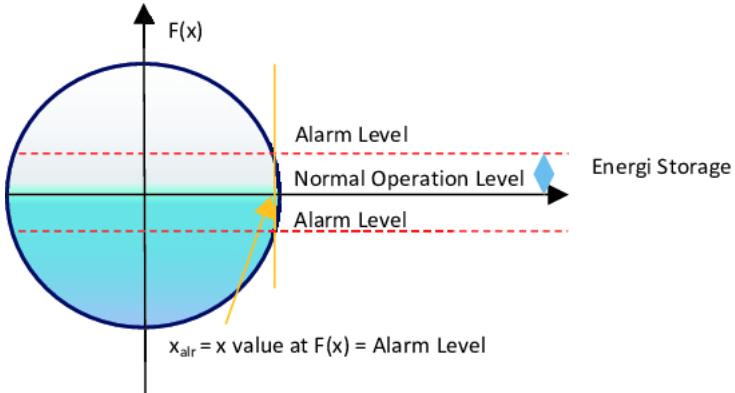
De acordo com a Spirax Sarco, uma das maiores fabricantes de componentes do processo de produção e distribuição de vapor no mundo, "o nível de água em uma caldeira deve ser controlado de forma cuidadosa, assegurando boa qualidade de vapor produzido de forma segura, eficiente e na pressão correta" (SARCO, 2020). Em uma caldeira, o vapor é gerado por meio da troca de calor entre os gases quentes e a água. O calor pode ser proveniente da queima de combustíveis em uma câmara de combustão ou pelo calor residual de um processo. A água, ao receber o calor, evapora no interior do tubulão, gerando vapor sob pressão (SARCO, 2020).

No interior do tubulão da caldeira, local onde o vapor é gerado, é necessário que haja uma área de superfície de água para que ocorra a liberação do vapor. Ou seja, é necessário que tenha espaço no interior do tubulão que não esteja preenchido com água para possibilitar que o vapor gerado seja acumulado antes de deixar a caldeira. Esse fator também deve ser levado em consideração em relação às variações de carga da caldeira. Pois, quando a carga da caldeira aumenta, o nível de água também aumenta devido a presença de mais bolhas de vapor misturadas com a água, se a carga diminui, o nível diminui. Esse efeito de variação de nível de acordo com a carga é conhecido como efeito de *shrink* e *swell* (BABCOCK, 2007). Dessa forma, o tubulão da caldeira deve sempre manter uma superfície de água independente da carga de operação, evitando assim o arraste de água junto com o vapor (SARCO, 2020).

Conforme a água vai evaporando no interior da caldeira, seu reabastecimento é necessário para que se mantenha em seu nível normal de operação. O nível normal de operação, conforme mostrado na figura 7, é aquele em que a água deve permanecer durante o funcionamento da caldeira, geralmente assumido como nível 0 (zero) de referência (FAHMILIA et al., 2017).

Com as variações de cargas durante a operação e os efeitos *shrink* e *swell*, é normal que esse nível sofra variações durante o processo. Dessa forma, é de extrema importância um bom controle do nível de água nas caldeiras. No controle do nível de água de caldeira, o *set-point* é definido como zero, para assim manter o nível de água de operação normal. Além disso, são definidos intertravamentos de segurança para nível alto e nível baixo de água, evitando o arraste de água junto com o vapor em caso de nível alto, ou o superaquecimento

Figura 7 – Nível de água de operação normal



Fonte: ([FAHMILIA et al., 2017](#))

das superfícies metálicas em caso de nível baixo.

O problema de controle de nível em caldeiras engloba não somente segurança operacional, mas também a eficiência na operação. Parry, Petetrot e Vivien (1995) afirmaram que cerca de 30% das paradas em usinas elétricas na França, naquele período, eram causadas por deficiência no controle de nível de água das caldeiras ([PARRY et al., 1995](#)).

O controle em caldeiras vem sendo abordado no meio acadêmico há muitos anos. Ainda na década de 60, Nicholson (1964) já relata que o problema de controle das estações de geração de energia elétrica estavam ficando cada vez mais complexos de serem realizados. Ele ainda visualizava que, no futuro, computadores digitais seriam utilizados para partida e controle *on-line* das caldeiras. Com a visão dessa demanda, Nicholson cita a necessidade da otimização dinâmica contínua e que era possível de ser obtida por meio do uso de técnicas de otimização digital, juntamente com um modelo matemático do processo ([NICHOLSON, 1964](#)).

Ainda no mesmo ano, Thompson (1964) desenvolveu um modelo dinâmico de uma caldeira de tubulão elétrica apropriado para o uso em desenvolvimento e análise de controladores de multivariáveis. Para o desenvolvimento de seu modelo, Thompson utilizou as equações que modelam a caldeira em matrizes em espaço de estado. Ao abordar o controle, Thompson relata que os controladores utilizados no período para controlar as várias variáveis em uma planta de geração de vapor eram dispositivos analógicos e que geralmente eram projetados para responder a um único erro de uma variável por vez. Dessa forma, era utilizado diferentes controladores independentes para regular as variáveis do processo. Quando ocorria uma variação em alguma das variáveis do processo, o controlador responsável por essa variável movia um único atuador para reduzir essa variação. Porém, ao mover esse único atuador, causava outros erros nas demais variáveis da planta, tendo em vista que as variáveis são altamente correlacionadas. Como alternativa

para esse problema, Thompson sugere um controlador capaz de controlar multivariáveis. As entradas no controlador eram os valores reais da planta e o valor desejado, ou *set-point*, de mais de uma variável ao mesmo tempo. O controlador era então capaz de controlar mais de um atuador simultaneamente. Sendo assim, quando ocorria a variação em uma das variáveis do processo, o controlador respondia movimentando diferentes atuadores de forma coordenada, reduzindo a variação na variável do processo desejada sem causar erros nas demais. Com esse novo controlador, o novo estado estacionário da planta era atingido de forma rápida sem ter que esperar diversos atuadores trabalhando de forma independente cada um tentando corrigir sua variável (THOMPSON, 1964).

Já na década de 70, McDonald e Kwatny (1970) relatam a necessidade de melhorias em uma resposta dinâmica mais aprimorada das usinas de energia e que isso resultou em um grande programa de desenvolvimento de projetos e análises de sistemas de controle. Para o desenvolvimento do seu trabalho, eles utilizaram um modelo matemático não linear de um sistema de caldeira-turbina-gerador do tipo tubulão com duas fornalhas e reaquecedor. Por meio de linearização e análise modal, eles verificaram a estabilidade local, observabilidade e controlabilidade do sistema e por meio da teoria do regulador linear ótimo, desenvolveram uma abordagem do modelo de sistema de controle. O modelo abordado produzia ações do tipo integral as quais garantiam que o sistema em estado estacionário não tivesse erros em relação ao *set-point*. O modelo de controle desenvolvido incorporou o controle *feedforward*, forneceu um método de reconstrução do espaço de estados, teve vantagem de precisão no estado estacionário, quando comparado com controladores PI convencionais, e não dependia da precisão questionável do modelo utilizado. Dessa forma, a aplicação do modelo foi bem sucedido e conseguiram uma melhoria significativa na resposta dinâmica do sistema (MCDONALD; KWATNY, 1970).

No final da década de 80, Jarkovsky, Fessl e Medulova (1988) citam as etapas para elaboração de um modelo de sistema de controle bem-sucedido que são: identificação do processo, construção de um modelo do processo, simulação, projeto dos controladores, simulação (para teste dos controladores) e análise de desempenho. Além disso, em seu trabalho eles verificaram a aplicação de controladores em cascata em um superaquecedor da caldeira. Também é relatada a importância de que qualquer tipo de aperfeiçoamento nos controladores já existentes resultam em grandes benefícios por diminuir o estresse térmico e aumentar o tempo de vida da caldeira. Para avaliar a aplicação dos controladores, eles propuseram o seguinte: para o controle da temperatura era utilizado o controle em cascata e como controlador principal eles testaram alternadamente controladores do tipo PI digital e analógico e o LQ STC (*controlador self-tuning*) de multi passos. O melhor desempenho de controlador obtido foi quando utilizaram como controlador principal o controlador LQ STC (JARKOVSKY et al., 1988).

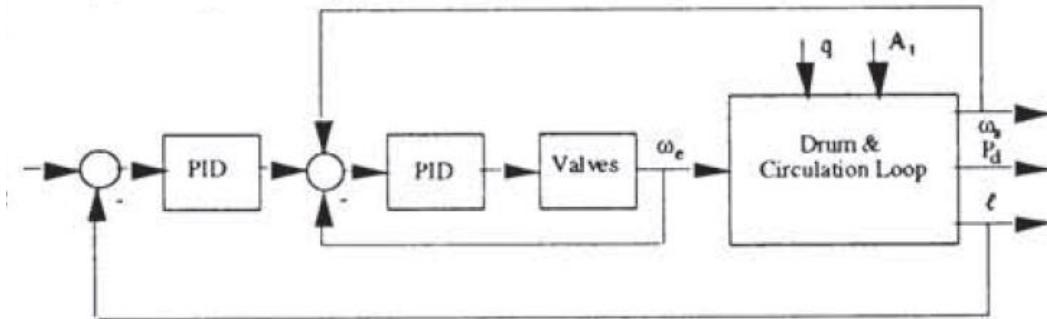
Com o objetivo de desenvolver um controlador automático e que fosse satisfatório

para o controle do nível de água em geradores de vapor, e que não utilizasse nenhuma operação manual, desde a partida até às condições transitórias de carga total, Na e No (1992) propuseram em seu trabalho o desenvolvimento de um controlador adaptativo baseado em observador para o controle de nível de água na caldeira. Eles relatam alguns dos principais problemas de controladores convencionais e que o seu controlador deveria resolver. Os principais problemas eram: o controlador *feedforward* pode levar a um resultado enganoso devido à medições de vazões incorretas, tendo em vista que podem ocorrer erros de medições da vazão de vapor e de água em carga baixa; o processo de geração de vapor tem propriedade de fase não-mínima, ou seja, existem zeros do sistema na região de instabilidade, não é possível ter grandes aumentos de ganhos no controlador, pois pode deixar o sistema instável. A característica de fase não-mínima é ocasionada principalmente pelos fenômenos *shrink* e *swell* que são significantemente maiores em cargas baixas; O sistema de geração de vapor é altamente complexo, não-linear e variante no tempo. Os seus parâmetros passam por grandes variações de acordo com mudanças nas condições operacionais; a válvula de controle principal de alimentação de água e a válvula de controle de *bypass* de alimentação de água possuem características não-lineares entre a posição da válvula e a vazão de água de alimentação. Como proposta para desenvolvimento do controlador sub-ótimo, o controle adaptativo representa uma alternativa para os sistemas estocásticos não-lineares e variantes no tempo. Para verificação dos resultados, eles compararam os resultados obtidos por meio do controlador adaptável baseado em observador com um controlador PI convencional. O controlador por eles desenvolvido teve respostas mais rápidas, menores efeitos de *shrink*, *swell* e *overshoot* do que o controlador PI convencional (NA; NO, 1992).

Kwatny e Berg (1993) relatam que no início da década de 90 os *hardwares* voltados para o controle da água de alimentação de caldeira vinham evoluindo, mas os algorítimos voltados para o controle tinham permanecido os mesmos por décadas. Eles ainda relatam que esses sistemas de controle cumpriam seu papel para funções básicas. Porém, o controle da alimentação de água em caldeiras era geralmente problemático em situações atípicas. Os problemas de controle ficavam mais evidentes quando a caldeira operava em cargas baixas. Para avaliar o problema relatado, eles investigaram as variações do comportamento dinâmico do sistema que eram ocasionados devido as variações de carga. Com essa avaliação, eles estudaram a efetividade e limitações de controladores convencionais nessas aplicações. A estrutura de controle utilizada foi considerada como a mais comumente utilizada para regulagem da água de alimentação em caldeiras de tubulão em usinas de energia na época. A configuração do controlador utilizado pode ser vista na figura 8, a qual ilustra um típico controlador de água de alimentação de três elementos com uso dos ganhos proporcional-integral-derivativo (PID) aplicados ao sinal de erro do nível de água e ao *feedback* da vazão de vapor. Ao se omitir o *feedback* da vazão de vapor, resulta em um controlador de elemento único (KWATNY; BERG, 1993).

Como resultado dos testes realizados, Kwatny e Berg identificaram que os ganhos

Figura 8 – Controlador com três elementos



Fonte: ([KWATNY; BERG, 1993](#))

do controlador PID definidos para a caldeira com carga alta não obtinham bons resultados em carga baixa. Dessa forma, parâmetros diferentes são necessários para operação em carga baixa. Como resultado final, foi identificado que o controlador de três elementos projetado para ter bom desempenho em carga nominal não era efetivo para cargas inferiores a 30%. O desempenho alcançado em cargas baixas de até 30% é muito prejudicado em relação ao desempenho de cargas altas. Já o controlador de elemento único projetado para um desempenho aceitável em cargas entre 20-30% não era efetivo em cargas abaixo de 5% ([KWATNY; BERG, 1993](#)).

Outro modelo de controle para o nível de água das caldeiras foi desenvolvido por Na (1995). Em seu trabalho, ele projetou um controlador de nível de água que utilizava a estimativa de erros dos fluxos (água e vapor). Os erros de fluxos foram considerados como parâmetros variantes no tempo e para serem estimados ele utilizou um algoritmo de estimativa de parâmetros por mínimos quadrados. Na relata que o nível de água de uma caldeira é composto por quantidades de níveis imensuráveis devido a capacidade de massa, a dinâmica reversa e oscilações mecânicas. Dessa forma, se as vazões de água de alimentação e vapor poderem ser estimadas, a quantidade de nível não mensurável pode ser estimada de forma exata, pois o parâmetro relacionado a quantidade de nível devido ao efeito da capacidade de massa não é alterado de acordo com os níveis de carga da caldeira. Com as estimativas dos erros de vazão encontradas por meio dos mínimos quadrados, a ação de controle *feedforward* sem erros de vazões pode ser utilizada em cargas baixas nas caldeiras e os efeitos *shrink* e *swell* serão reduzidos. Ele ressalta a importância da ação de *feedforward* para minimizar os efeitos *shrink* e *swell* quando operando em cargas baixas, mas que os controladores convencionais não o utilizam por ter erros consideráveis de fluxo quando a caldeira operava em carga baixa. Porém, como no seu trabalho esses erros de fluxo foram estimados, a ação de *feedforward* pode ser utilizada e que reduz o efeito da dinâmica reversa. O controlador demonstrou bom desempenho e robustez. Além disso,

só era necessário a sintonização de um único parâmetro, o fator de ponderação. Como principal desvantagem desse controlador era a necessidade de um tempo inicial de *start-up* para estimar os erros de fluxos ([NA, 1995](#)).

Conforme pode ser observado até o momento, o problema de controle de caldeira é de grande interesse, principalmente para a indústria. Diversos modelos vem sendo desenvolvidos durante os anos, sempre buscando controladores mais robustos e com bom desempenho. Dentro os modelos modernos aplicados às caldeiras, pode-se citar os controladores que utilizam inteligência artificial, como por exemplo, os controladores nebulosos (*Fuzzy*).

Nos dias atuais, muito se ouve falar de inteligência artificial (IA). É fácil de acreditar que essa tecnologia surgiu recentemente, mas a IA aplicada aos controladores é conhecida na literatura desde a década de 70, quando Mandani (1974) publicou o primeiro caso conhecido na história de aplicação de *Fuzzy* como controlador. Ele ressalta a dificuldade na época de realizar o controle de plantas complexas, como as plantas dinâmicas não lineares e propõe a implementação do algorítimo como um interpretador de um conjunto de regras expressas como declarações condicionais *fuzzy*. Mandani propõe o uso de um programa heurístico adequado para a situação com base em dois conhecimentos: a abordagem de Zadeh (1973) ([ZADEH, 1973](#)), a qual fornecia um método geral de expressão de regras linguísticas para que fossem processadas de forma rápida por um computador com base em conjuntos e algorítimos *fuzzy*; e o fato de que um operador experiente possivelmente seria capaz de expressar a estratégia de controle de uma planta, ou seja, capaz de gerar um conjunto de regras que fossem possíveis de se utilizar em diferentes situações de controle ([MANDANI, 1974](#)).

O modelo usado por Mandani para o controle foi uma planta dinâmica simples, um modelo de um motor a vapor. Como principal vantagem do uso do controlador *fuzzy*, diferente dos demais métodos do campo de inteligência artificial da época, era que as decisões podiam ser feitas de forma rápida pelo controlador, sendo compatível com a necessidade de plantas mais dinâmicas. Como resultado, Mandani cita que quando comparado com controladores clássicos, o resultado foi o mesmo ou até melhor, mas que sua simplicidade pode fazer sua aplicação viável em muitas situações práticas ([MANDANI, 1974](#)).

Diferentes tipos de controladores continuam sendo estudados na atualidade. Dentre os estudos recentes encontrados na literatura e que abordam o controle *fuzzy*, pode-se citar Liu e Kong (2013) ([LIU; KONG, 2013](#)) que desenvolveram um controlador preditivo de modelo não linear baseado em controle de aprendizado iterativo (NMPILC - Nonlinear Model Predictive Controller Based on Iterative Learning Control) aplicado a um modelo de sistema de caldeira de tubulão e turbina; Dinakaran (2015) ([DINAKARAN, 2015](#)) realizou o controle da temperatura e nível de água em uma caldeira utilizando *fuzzy* do

tipo Mandani tendo como entradas a realimentação dos sensores de temperatura e do nível de água e como saída a posição de abertura da válvula de alimentação de água; Sonawane *et al* (2016) ([SONAWANE; MEDEWAR; MUNJE, 2016](#)) apresentaram um controlador com interface gráfica do usuário (GUI) para o nível de água de uma caldeira utilizando *fuzzy* do tipo Mandani e Sugeno e comparando os resultados com controlador do tipo PID; Pelusi *et al* (2016) ([PELUSI et al., 2016](#)) propõe o controle da dinâmica de uma caldeira de tubulão por um controlador *fuzzy* otimizado por meio de algoritmo genético para obtenção das funções de pertinência e das regras *fuzzy* e Mello (2018) ([MELLO, 2018](#)) implementa um controle *fuzzy* atuando sobre a vazão de ar para a fornalha de uma caldeira, mantendo o teor de oxigênio da combustão dentro da faixa ótima.

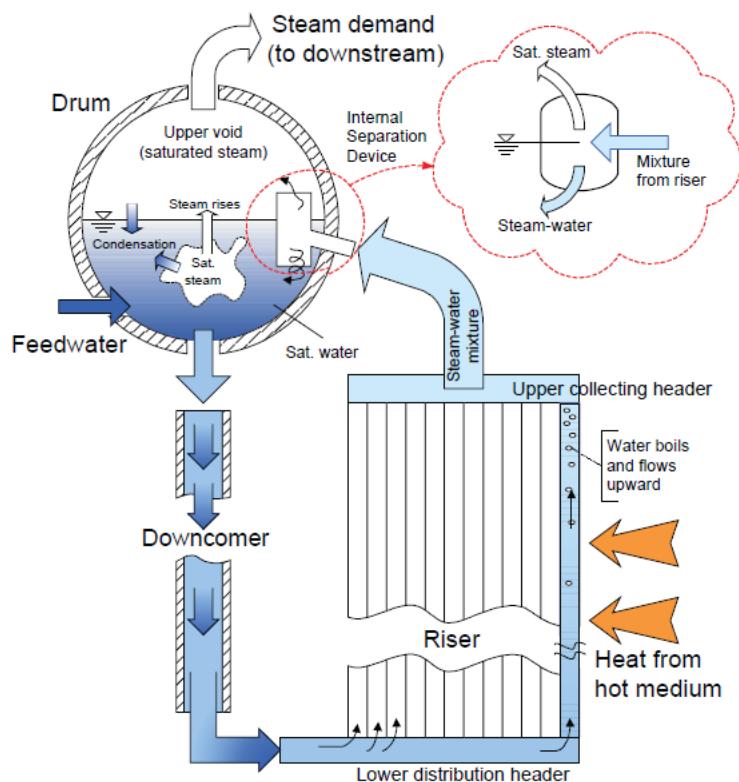
1.2 Proposta de controle

Com base no que foi visto até o momento, a importância do controle de caldeiras é evidente. Diante disso, o objetivo a ser abordado nesse trabalho é de realizar o controle do nível de água em uma caldeira do tipo tubulão por meio da inteligência artificial (IA), utilizando controladores de lógica *Fuzzy* com otimização por meio de algoritmo genético (GA). A variável de processo (PV), ou seja, a variável a ser controlada é o nível de água da caldeira. As variáveis manipuladas (MV) são os coeficientes de abertura da válvula de água de alimentação da caldeira e da válvula de saída de vapor, consequentemente variando as vazões de água de alimentação e de saída de vapor da caldeira.

Para início do estudo dos controladores, é necessário um modelo que represente bem a dinâmica da geração de vapor em uma caldeira. Dessa forma, foi escolhido o modelo desenvolvido por Astrom e Bell (2000) ([ASTROM; BELL, 2000](#)). Esse é um modelo de quarta ordem, não-linear e que descreve bem o comportamento de uma caldeira de tubulão com tubos de descida (*downcomers*) e tubos de subida (*risers*), conforme pode ser observado na figura 9.

A partir desse modelo, é possível implementar um outro modelo mais simples de segunda ordem, onde pode ser descrito pelos estados volume total de água na caldeira e pela pressão no interior do tubulão. Além disso, um outro modelo de terceira ordem, onde é possível ser implementado mais um estado, o título do vapor na saída dos tubos de subida (*risers*). E por fim, um modelo de quarta ordem, onde é considerado o volume de vapor no tubulão, e consequentemente, torna possível avaliar a variação de nível de água da caldeira. Os autores citam modelagem de ordens mais elevadas, como de quinta ordem, por exemplo, mas que os resultados não diferem muito do modelo de quarta ordem e assim não justifica a necessidade de um modelo de ordem maior.

Além disso, esse modelo capta muito bem os fenômenos *shrink* e *swell*. Esses fenômenos são os ocasionadores das variações bruscas de nível de água da caldeira. Pois,

Figura 9 – Esquematização da caldeira de tubulão com *risers* e *downcomers*

Fonte: (KIM; CHOI, 2005)

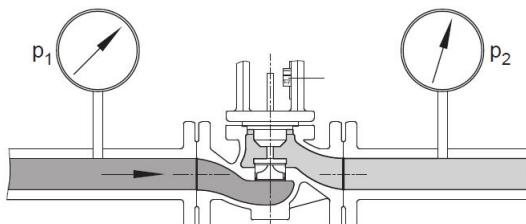
eles são altamente relacionados à variação de pressão no interior do tubulão (ASTROM; BELL, 2000). O modelo aqui relatado considera as bolhas de vapor presentes misturadas com a água, assim, quando a pressão no interior do tubulão diminui, essas bolhas expandem-se, ocasionando um aumento súbito (*swell*) no nível da água, e quando a pressão aumenta resulta no efeito contrário (*shrink*). Com isso, o modelo descreve bem a dinâmica da variação do nível de água no interior do tubulão da caldeira. Os autores validaram o modelo comparando os resultados com uma planta real e os resultados foram bem satisfatórios. É possível encontrar na literatura muitos outros trabalhos que utilizam o modelo desenvolvido por Astrom e Bell como base para suas pesquisas (ELGUINDY, 2013) (BORZELLIERI, 2019) (OSMAN, 2018).

O modelo desenvolvido é composto de quatro entradas: energia (calor); vazão de água de alimentação; temperatura da água de alimentação e vazão de saída de vapor. Os quatro estados do modelo são: Volume de água total; pressão; título do vapor na saída dos tubos de subida e volume de vapor no tubulão. Nele é possível avaliar onze parâmetros de saída que são: título do vapor na saída dos *risers*; relação de volume de vapor; nível de água no tubulão; contribuição do nível de vapor; contribuição do nível de água; pressão no

tubulão; fluxo de condensação; fluxo nos *downcomers* e nos *risers*; volume de vapor no tubulão; volume de água total.

Como evolução do modelo, é desenvolvido também o modelo dinâmico das válvulas que regulam a vazão de água de alimentação da caldeira e a válvula de saída de vapor. A vazão do fluido que passa pela válvula é relacionada à variação de pressão através da válvula, conforme visto na figura 10, à porcentagem de abertura da válvula (H), ao coeficiente de dimensionamento da válvula (k) e à densidade do fluido (ρ) (ELGUINDY, 2013).

Figura 10 – Vazão através da válvula



Fonte: (SAMSON, 2012)

Dessa forma, para o controle do nível de água na caldeira, a variável manipulada é a porcentagem de abertura da válvula (H), que dependendo de seu valor, resulta em variações nas vazões de água de alimentação e vazão de saída de vapor.

Para o controle, é utilizado o controlador com inteligência artificial com lógica *Fuzzy* e otimizado por algoritmo genético. Para avaliação de desempenho do controlador, são utilizadas diferentes configurações de variáveis de entrada no controlador *Fuzzy* e os resultados comparados. Para as simulações e avaliações dos resultados, são utilizados os softwares Matlab/Simulink.

Para validação do modelo utilizado nas simulações, após a implementação no Matlab/Simulink, utilizam-se os mesmos parâmetros utilizados por Astrom e Bell para verificar se o resultado obtido como resposta é igual ao que eles obtiveram. Em seguida, para verificação do modelo com as válvulas, verifica-se a resposta do sistema em malha aberta em relação a uma variação no sinal de entrada do tipo degrau. Uma variável de entrada sofre variação por vez enquanto as demais permanecem constantes.

1.3 Objetivo geral

Desenvolver um controlador nebuloso (*fuzzy*) otimizado por algoritmo genético aplicado ao controle do nível de água em uma caldeira do tipo tubulão.

1.4 Objetivos específicos

- Obter um modelo dinâmico de uma caldeira do tipo tubulão;
- Implementar o modelo com as válvulas de alimentação de água e saída de vapor;
- Simular o sistema em malha aberta em resposta a uma variação no sinal de entrada do tipo degrau para avaliar a estabilidade do sistema;
- Implementar e testar o controlador com diferentes configurações de variáveis de entrada;
- Elaborar o código do algoritmo genético para otimização do controlador;
- Validar resultados.

1.5 Organização do texto

Esse trabalho está estruturado conforme a seguir:

- O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, onde nele é apresentado uma melhor explicação sobre caldeiras, sistemas inteligentes, modelagem de sistemas, os princípios da lógica *fuzzy*, as operações com conjuntos que são utilizados na lógica *fuzzy*, funções de pertinência e as etapas no processo de controle *fuzzy*. Em seguida é abordado um controlador proporcional-integral (PI) do tipo *fuzzy* e os tipos de controladores Mamdani e Tagaki-Sugeno-Kang. Por fim, nesse capítulo aborda sobre algoritmo genético e seu uso para otimização dos controladores.
- No capítulo 3 é apresentado a metodologia do desenvolvimento do trabalho. Inicialmente é apresentado a modelagem dinâmica da caldeira de tubulão, seguido das funções quadráticas utilizadas para cálculo dos parâmetros da tabela de vapor saturado. Após a apresentação da modelagem da caldeira, é apresentado a modelagem das válvulas utilizadas no controle da água de alimentação e saída de vapor saturado do tubulão. Na sequência é apresentado como o modelo foi validado e na sequência refere-se aos controladores *fuzzy* e as funções de pertinência usadas no trabalho. Na sequência é apresentado o algoritmo genético e os parâmetros usados para otimização dos controladores. O capítulo finaliza demonstrando a implementação da simulação no Simulink.
- O capítulo 4 apresenta as considerações parciais dos resultados que foram obtidos até o momento nesse trabalho.

2 Fundamentação teórica

Nesse capítulo são abordadas as teorias que baseiam o desenvolvimento desse trabalho. Nele são mostrados os tipos de caldeira mais comumente utilizados na indústria na atualidade, seus componentes e seu funcionamento. Além disso, os tópicos sobre modelagem de um sistema e a lógica utilizada nos controladores *fuzzy* também são descritos.

2.1 Caldeiras

Uma caldeira é basicamente composta por dois sistemas, um de água e o outro de fogo. No lado da água da caldeira é onde se encontra a água e vapor, enquanto que no lado do fogo é onde estão a chama e os gases provenientes da queima do combustível. A água de alimentação da caldeira encontra-se em uma temperatura inferior à água contida em seu interior. Essa água é, então, aquecida por meio da troca de calor entre os sistemas de água e do fogo, onde a combustão, que converte energia química em energia térmica, fornece energia (calor) para água. A água ao receber o calor entra em estado de evaporação, gerando assim vapor (BEGA, 2003).

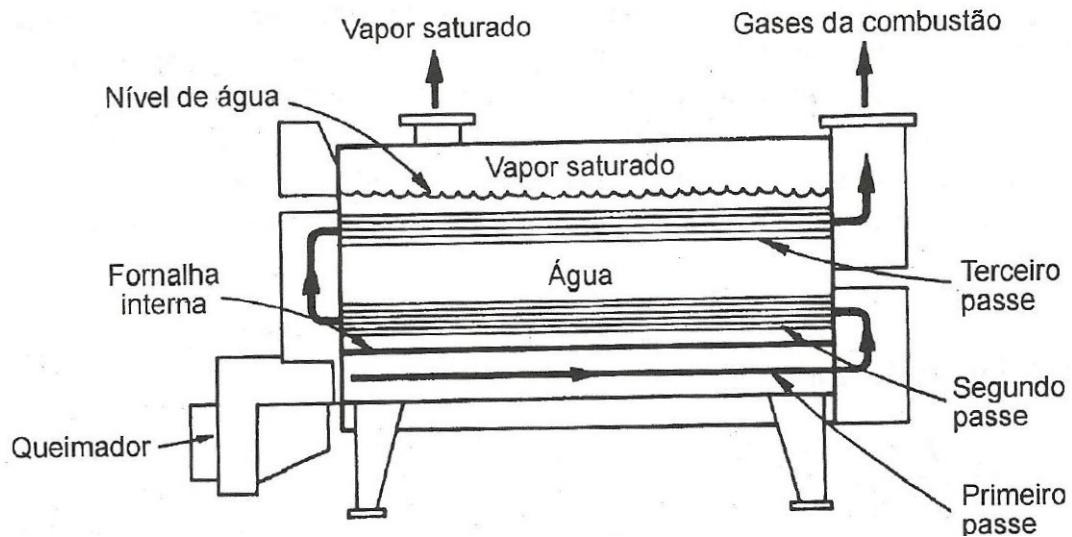
As caldeiras, em sua maioria, são classificadas em dois grandes tipos: aquatubular e flamotubular (ou fogotubular).

Nas caldeiras flamotubulares, os gases quentes, provenientes da combustão, passam pelo interior dos tubos que estão cobertos pela água. Ou seja, nesse modelo os gases estão no interior dos tubos e a água por fora, realizando assim a troca de calor e geração de vapor (BEGA, 2003). A figura 11 representa um esquema básico de uma caldeira flamotubular.

No modelo aquatubular ocorre o oposto. A água passa pelo interior dos tubos e os gases provenientes da combustão passam por fora. Esse tipo de caldeira normalmente é constituída de dois ou mais tubulões cilíndricos conectados pelos tubos nos quais a água flui em seu interior. Os tubos que conectam os tubulões são os tubos descendentes (*downcomers*) e os tubos ascendentes (*risers*). O tubulão inferior e os tubos ficam completamente cobertos por água, enquanto o tubulão superior fica com seu nível de água controlado em torno de 50%. Nessas caldeiras ocorrem a circulação natural da água, pois a água de alimentação que está mais fria, desce pelos tubos *downcomers* enquanto a água do tubulão inferior, que está mais quente, sobe pelos *risers* devido a diferença de densidade (BEGA, 2003). A figura 12 representa um esquema básico de uma caldeira aquatubular e a figura 13 representa a circulação de água em caldeiras aquatubulares.

Bega (2003) cita que nas caldeiras aquatubulares as duas variáveis que são mais

Figura 11 – Caldeira flamotubular de 3 passes

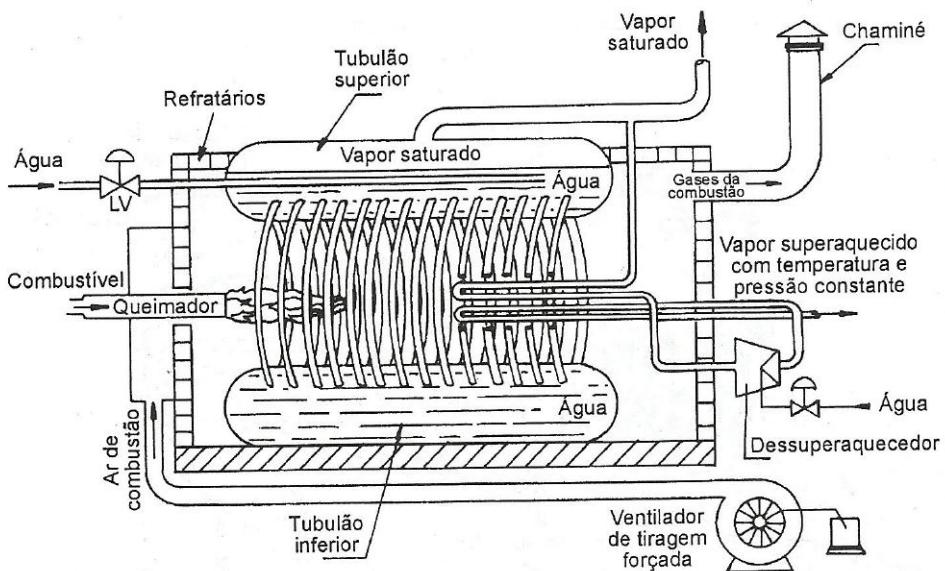


Fonte: ([BEGA, 2003](#))

importantes para serem controladas são a pressão do vapor e o nível de água no tubulão superior. A **Pressão do vapor** deve ser controlada em uma faixa com pequenas variações, pois essa pressão deve atender às características do processo, os quais trabalham com uma pressão pré-definida. As variações de pressão são controladas por meio da variação da vazão de combustível e do ar de combustão. Ao aumentar essas vazões, aumenta a transferência de calor para a água que resulta em um aumento na evaporação da água e ao reduzir, ocasiona no efeito contrário. O **nível de água** no tubulão superior também deve ser controlado em uma pequena faixa de variação, pois o nível alto ou baixo ocasionam problemas ao processo ou à caldeira. O nível alto de água ocasiona arraste de água junto com o vapor e o nível baixo poderá descobrir os tubos, ocasionando um superaquecimento dos mesmos. O nível de água da caldeira é controlado por meio da atuação na válvula de alimentação de água que regula a quantidade de água enviada para a caldeira ([BEGA, 2003](#)).

A figura 14 representa o interior de um tubulão superior, onde demonstra a entrada da água de alimentação, saída de vapor e outros componentes. Quando a caldeira está em operação com condições estáveis, no lado da água possui uma certa quantidade de água misturada com vapor com uma densidade média em função das condições operacionais desse determinado momento. Enquanto a taxa de evaporação de água permanecer constante na caldeira, a densidade média da mistura e a proporção volumétrica de vapor permanecem sem variações. Porém, quando ocorre variações de cargas nas caldeiras essas condições se alteram. Quando ocorre um diminuição da pressão no interior do tubulão, as bolhas de vapor presentes abaixo do nível da água se expandem, ocasionando um aumento do

Figura 12 – Caldeira aquatubular



Fonte: ([BEGA, 2003](#))

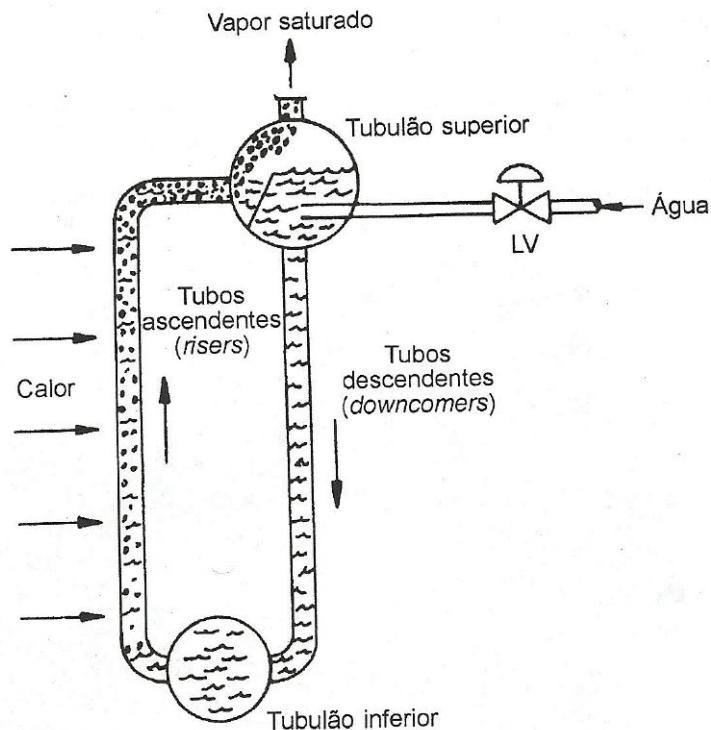
volume da mistura vapor-água de forma instantânea. Esse efeito é conhecido como *swell* (expansão). Quando a pressão no interior do tubulão aumenta ocorre o efeito contrário, as bolhas se contraem, ocasionando na redução do nível. Esse efeito é conhecido como *shrink* (contração) ([BEGA, 2003](#)).

2.2 Sistema inteligente

Simões e Shaw (1999) descrevem sistemas inteligentes como "aqueles que fornecem respostas que solucionam problemas, tais respostas apropriadas às situações específicas destes problemas, mesmo que sejam novas ou inesperadas, fazendo com que comportamento seja "único" ou até mesmo considerado "criativo" "([SIMOES; SHAW, 1999](#)). Ou seja, os sistemas inteligentes são capazes de propor soluções para os problemas que eles são submetidos, proporcionando respostas baseadas em interpretações do problema. Os sistemas inteligentes são baseados em sistemas biológicos, capazes de tomar decisões por meio da observação e interpretação de padrões, possuindo capacidade de raciocínio similar aos humanos. O raciocínio realizado pela máquina é o então chamado *fuzzy*, podendo ser traduzido para impreciso, difuso ou nebuloso ([SIMOES; SHAW, 1999](#)).

A lógica *fuzzy* possibilita o uso de um controlador computacional com ações similares ao comportamento de um operador humano. Dessa forma, a lógica *fuzzy* possibilita o controle de sistemas por meio de computadores, mas com a forma humana de pensar.

Figura 13 – Circulação de água em caldeira aquatubular



Fonte: (BEGA, 2003)

Esse tipo de controle utiliza o raciocínio dedutivo e/ou indutivo, ou seja, no raciocínio dedutivo as conclusões são inferidas de acordo com informações conhecidas previamente e no indutivo, onde se utiliza exemplos únicos baseados no comportamento do processo, torna-se possível o aprendizado e generalização (SIMOES; SHAW, 1999).

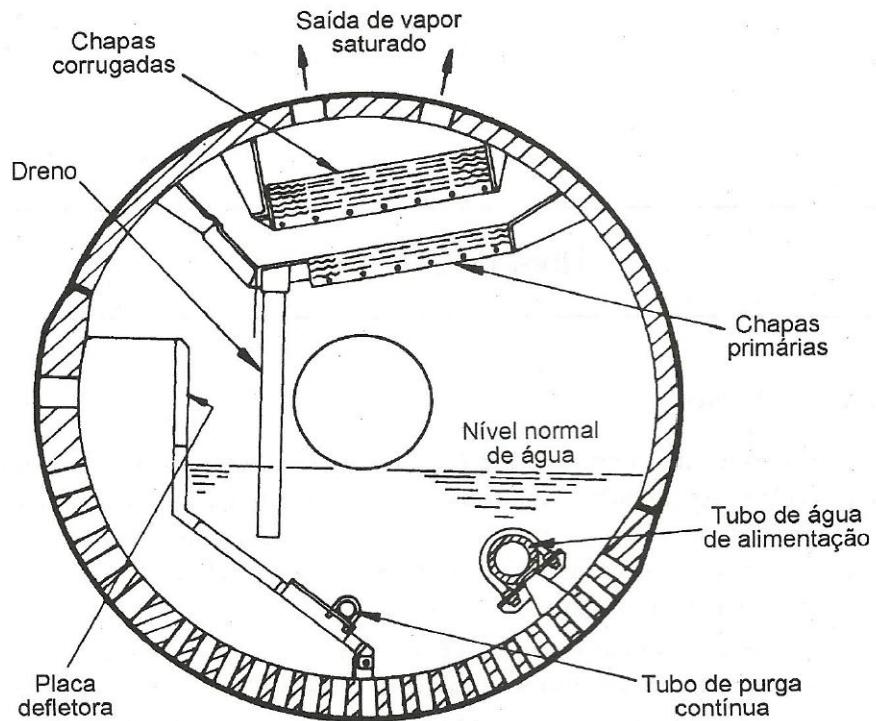
A idealização de um sistema inteligente é que ele seja capaz de tornar os sistemas, que estejam sob o seu controle, autônomos. Considerar um sistema autônomo é reconhecer que ele seja capaz de realizar ações de controle desde as mais simples até as mais complexas, inclusive quando ocorrer falhas, sem a necessidade de intervenção humana (SIMOES; SHAW, 1999).

2.3 Modelagem do sistema

A modelagem de plantas e processos proporciona a simulação de sistemas reais com menor custo, maior facilidade e sem por o sistema em risco de acidentes ou danos. A modelagem pode ser baseada em método experimental, modelagem matemática (ou analítica) e método heurístico (SIMOES; SHAW, 1999).

O método experimental para obtenção de um modelo é constituído pela elaboração

Figura 14 – Arranjo típico do interior de um tubulão superior



Fonte: (BEGA, 2003)

de uma tabela, obtida de forma experimental, que relaciona os valores da entrada com a saída da planta. Esse método é equivalente a se plotar pontos discretos de uma curva característica de entrada versus saída (SIMOES; SHAW, 1999).

A modelagem matemática geralmente é utilizada nos problemas de controle com enfoque em se obter um modelo idealizado do processo que se deseja controlar. Nessa modelagem, algumas considerações são tomadas com propósito de tornar o modelo mais simples, como por exemplo, assumindo o modelo como linear, quando as variações na entrada resultam em variações proporcionais na saída. Porém, ao se modelar sistemas não-lineares a dificuldade aumenta e muitas vezes se utiliza a linearização em torno de um ponto de operação para a obtenção do modelo. Além disso, é comum que na modelagem se considere que os sistemas sejam invariantes no tempo, ou seja, que os parâmetros não se alterem no decorrer do tempo. Destarte, a modelagem matemática demanda algumas simplificações do sistema, aumentando a dificuldade na elaboração de um modelo realista do processo. Diante das simplificações adotadas, os modelos matemáticos podem perder características importantes do sistema e com isso, fazer com que seja necessário novos ajustes e sintonia na planta real ao se utilizar o controlador testado no modelo. Em determinadas condições, o controlador pode se tornar inviável para uso na planta real por não ser fidedigno a realidade (SIMOES; SHAW, 1999).

Segundo Simões e Shaw (1999), o método heurístico utiliza uma experiência prévia, que pode conter regras práticas ou dicas e estratégias que já são frequentemente utilizadas para realizar uma tarefa. A regra heurística é uma implicação lógica do tipo:

SE < condição > **Então** < Consequência >

Ou então em uma regra típica de uma situação de controle:

SE < condição > **Então** < ação >

Esse método é similar ao experimental, onde é possível construir uma tabela em que cada linha é uma expressão que relaciona as variáveis de entrada com a saída utilizando regras heurísticas. Um detalhe interessante na modelagem heurística é que as entrada e saída podem ser números reais ou podem ser descritos por valores *fuzzy*, onde os valores numéricos são substituídos por expressões linguísticas ou verbal. Um ganho relevante ao se utilizar o método heurístico e as expressões linguísticas é que a linearidade deixa de ser necessária ou relevante para a modelagem, pois a função de entrada-saída é descrita para todo o intervalo de discurso. Diante disso, o método heurístico tem como maior vantagem a possibilidade de construir uma relação da entrada e saída do sistema que não é matemática, mas útil para descrever a planta ou processo (SIMOES; SHAW, 1999).

2.4 Princípios básicos de lógica Fuzzy

O termo lógica difusa ou *fuzzy* originou-se em 1965 da Teoria de Conjuntos Difusos de Lotfi A. Zadeh; todavia, tem sido estudada por Lukasiewicz e Tarski como a lógica infinito-valorada desde meados da década de 20. Como o próprio nome remete, é um conceito onde os resultados são difusivos, onde as variáveis *booleanas* (0 para falso e 1 para verdadeiro, geralmente) diferem na proposição de ser apenas dois valores possíveis. Esta lógica é multi valorada, ou seja, pode resultar em qualquer valor real entre 0 e 1 (PUCSP, 2004).

Em muitos sistemas de controles, principalmente naqueles mais complexos, a lógica verdadeiro ou falso (usualmente, alta e baixa tensões, respectivamente) não resultam em um controle mais adequado por não representarem todas as graduações envolvidas no sistema. Dessarte, têm-se uma maior flexibilidade para relevar mais as incertezas e imprecisões do sistema (MENEGHETTI, 2004). Então, têm-se uma resposta "parcialmente verdadeira" e "parcialmente falsa", o que torna-se mais preciso na aplicação proporcional do controle.

A lógica do cérebro humano assemelha-se a esta lógica. Por isso, ao implementá-la, os dispositivos eletrônicos passam a ser acionados com os estados indeterminados. Assim, é

possível analisar situações não quantificáveis como argumentação, sentimentos, veracidade, condições subjetivas e etc.

Sua arquitetura base é constituída de quatro partes. A Regra Base, que lida com um conjunto de regras com a condição "SE-ENTÃO" (*IF – THEN*), ou seja, toma partido das decisões, baseando-se em uma condição. A Fuzzificação, esta converte os sinais de entradas (dados providos pelos sensores) que são números *crisp* em definições *fuzzy*. A *Inference Engine* (traduzindo, Motor de Inferência), ela determina o nível de cada entrada difusa, baseando-se em cada regra, para decidir quais condições serão implementadas na lógica; posteriormente, estas regras são combinadas para tomada de decisão. E por fim, a Defuzzificação, como o nome infere, é o inverso da Fuzzificação onde ocorre a conversão das definições *fuzzy* em sinais de saídas para atuação do sistema ([GEEKSFORGEEKS](#),).

2.4.1 Bivalência

O princípio da bivalência assume apenas dois tipos de respostas: Verdadeiro ou falso. Na bivalência não existe meio termo, as respostas precisam ser sim ou não, certo ou errado, preto ou branco e assim por diante. A ciência da computação, por meio da lógica booleana, se baseia na bivalência para transformar as "leis da verdade" em linguagem matemática. A forma de pensar do ser humano é fortemente relacionada ao princípio da bivalência, onde praticamente não se leva em consideração o meio termo, aquilo que está entre o certo e o errado é desconsiderado na "lei do raciocínio" humano ([SIMOES; SHAW, 1999](#)).

2.4.2 Multivalência

Apesar da tendência humana em querer aceitar as respostas nos extremos preto ou branco, o mundo real não é bivalente. Ao invés de duas opções, existem infinitas opções de respostas, como por exemplo, entre o branco e preto existe diferentes tons de cinza. O propósito da lógica *fuzzy* é de capturar os graus de verdade entre os extremos, utilizando uma incerteza e verdade parcial de maneira sistemática e rigorosa. Apesar dos computadores trabalharem com lógica bivalente, incapacitando de compreender a comunicação humana contendo incertezas, a lógica *fuzzy* é o que possibilita a tradução da imprecisão na comunicação humana em diferentes graus de verdade de cada afirmação, possibilitando assim a compreensão pelo computador ([SIMOES; SHAW, 1999](#)).

2.5 Noções básicas sobre conjuntos

Na teoria de conjuntos, uma forma de indicar se determinado elemento x pertence ou não ao conjunto A é por meio da pertinência que é indicada pelo símbolo \in , conforme a equação 2.1.

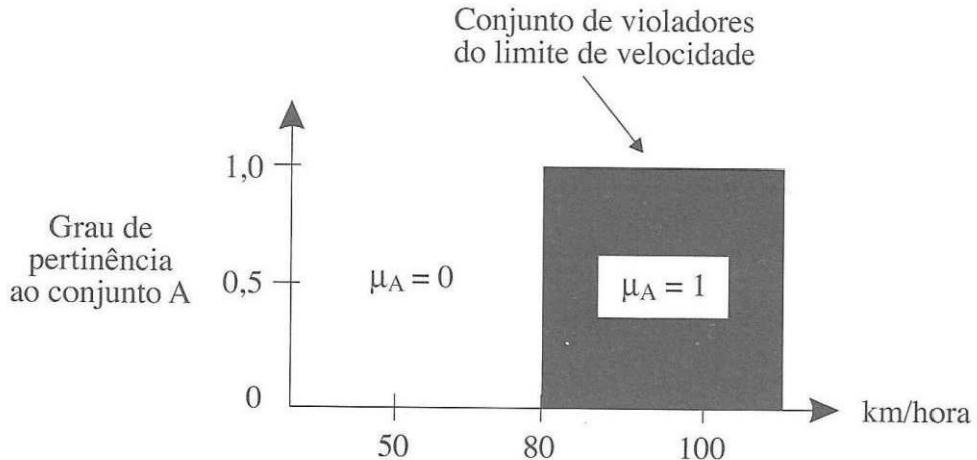
$$x \in A \quad (2.1)$$

A função de pertinência $\mu_A(x)$ é uma das formas de demonstrar se o elemento x pertence ao conjunto A . Um exemplo para uma função bivalente é mostrado na equação 2.2.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A \\ 0, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (2.2)$$

Quando a função de pertinência é do tipo bivalente, o termo pertence ou não ao conjunto, não há meio termo. Dessa forma, a variação de não pertence ao grupo para pertence ao grupo acontece de forma abrupta. Um exemplo da aplicação bivalente pode ser visto na figura 15.

Figura 15 – Função de pertinência bivalente



Fonte: (SIMOES; SHAW, 1999)

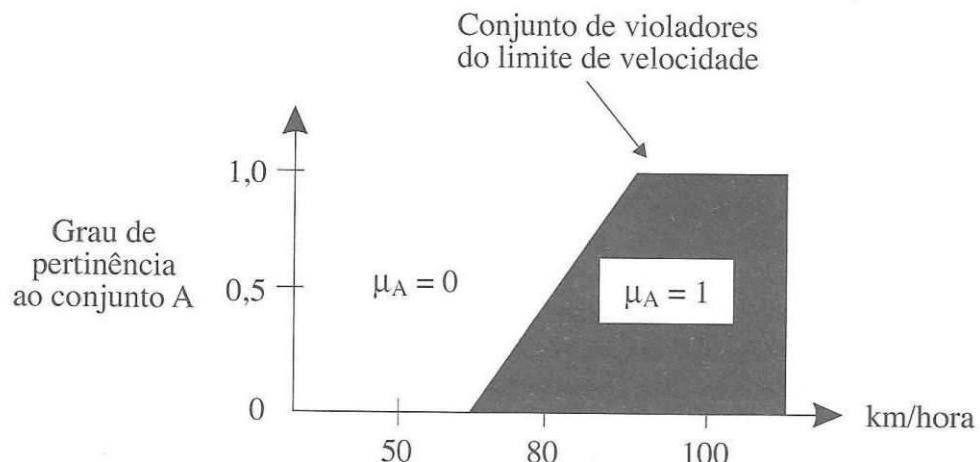
No exemplo abordado na figura 15, os motoristas que dirigem com velocidade inferior a 80 km/h não são considerados infratores e aqueles que dirigem com velocidade acima de 80 km/h são considerados infratores. Porém, na prática essa forma de avaliação não é útil, pois as pequenas variações em torno do ponto de pertinência ou não pertinência não são levadas em consideração e aqueles infratores que dirigem a 110 km/h seriam multados da mesma forma daqueles que dirigem a 80,5 km/h.

Uma forma de contornar esse problema é fazer com que a transição entre as áreas de pertinência e não pertinência seja gradual, com diferentes graus de pertinência, conforme observado na equação 2.3.

$$\begin{aligned}
 x_1 &= 78,0 \quad \mu_A(x_1) = 0,0 \\
 x_2 &= 80,0 \quad \mu_A(x_2) = 0,2 \\
 x_3 &= 82,0 \quad \mu_A(x_3) = 0,4 \\
 x_4 &= 84,0 \quad \mu_A(x_4) = 0,6 \\
 x_5 &= 86,5 \quad \mu_A(x_5) = 0,8 \\
 x_6 &= 88,0 \quad \mu_A(x_6) = 1,0
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

A figura 16 representa graficamente essa variação de forma gradual da função de pertinência *fuzzy*.

Figura 16 – Função de pertinência *fuzzy*



Fonte: ([SIMOES; SHAW, 1999](#))

Simões e Shaw (1999) relatam que "A propriedade fundamental da lógica *fuzzy* é que a função de pertinência $\mu_A(x)$ tem todos os valores dentro do intervalo [0,1]. Isso significa que um elemento pode ser membro parcialmente de um conjunto, indicado por um valor fracionário dentro do intervalo numérico". Portanto, essa propriedade é de grande importância na avaliação das incertezas de pertinência ou não a um determinado conjunto.

2.6 Operações entre conjuntos no mesmo universo de discurso

As operações com conjuntos na lógica *fuzzy* são diferentes da lógica tradicional. Enquanto a lógica tradicional realiza as operações entre conjuntos com operações booleanas, utilizando os conectivos E, OU e NÃO, na lógica *fuzzy* as operações lógicas podem ser

executadas por vários operadores. A classificação desses operadores pode ser dividida em duas classes, ou normas, que são as normas triangulares, ou normas-t, e as normas duais, que também podem ser chamadas de normas-s ou conormas-t. Essa maior variação de operadores na lógica *fuzzy* possibilita ao projetista um maior número de opções de implicações no controle (SIMOES; SHAW, 1999).

2.6.1 Subconjuntos *fuzzy*

A definição de um subconjunto *fuzzy* é dada por Simões e Shaw (1999) como a seguinte: dado um universo de discurso E que pertence ao conjunto dos reais, os vetores possibilidade $A \subset E$, $B \subset E$ e o conjunto de valores de pertinência de todos os conjuntos $M[0,1]$. A expressão $A \subset B$ para todo elemento x se:

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (2.4)$$

Ou seja, A está contido em B se o valor de pertinência de cada elemento de A for menor ou igual ao valor correspondente em B (SIMOES; SHAW, 1999).

2.6.2 Intersecção de conjuntos *fuzzy*

A intersecção dos conjuntos A e B é dada pela parte em comum em ambos os conjuntos e tem como resultado um subconjunto menor do que os conjuntos individuais. Com isso, os graus de pertinência da intersecção $A \cap B$ pode ser calculado a partir dos valores individuais de A e B, conforme a equação 2.5 (SIMOES; SHAW, 1999).

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.5)$$

A definição da função *fuzzy* "E" pode ser dada pela equação 2.6.

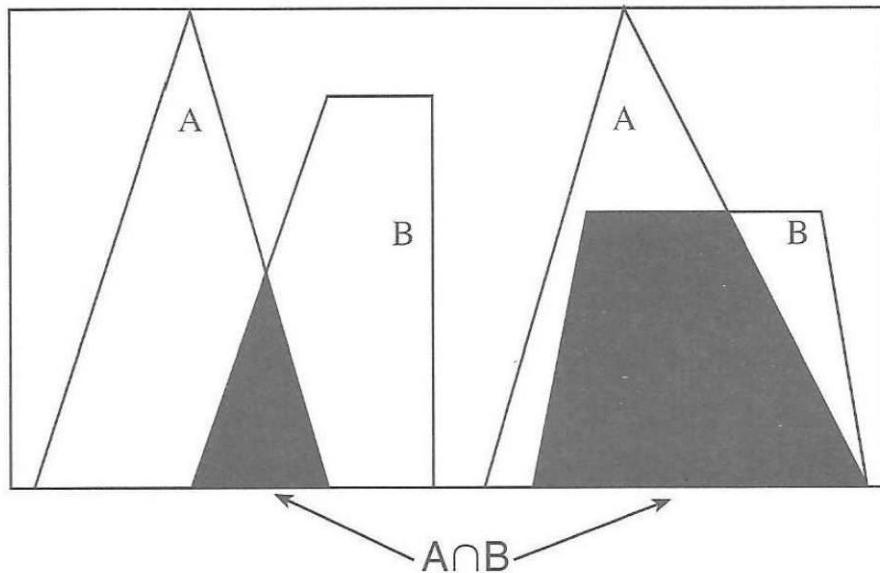
$$\begin{aligned} x \in A \quad E \quad x \in B \rightarrow x = A \cap B \quad \forall x \\ \mu_A \quad E \quad \mu_B \rightarrow \mu_{A \cap B} \end{aligned} \quad (2.6)$$

A representação gráfica da intersecção (E) dos conjuntos *fuzzy* pode ser visto na figura 17. No eixo horizontal utiliza-se uma escala de 0 a E (universo de discurso) e no eixo vertical uma escala de 0 a 1 para o valor de pertinência.

2.6.3 União de conjuntos *fuzzy*

A união entre os conjuntos A e B é dada pelo contorno que inclui os dois conjuntos *fuzzy* A e B e como resultado, o subconjunto resultante é sempre maior do que os conjuntos

Figura 17 – Intersecção de conjuntos fuzzy



Fonte: ([SIMOES; SHAW, 1999](#))

individuais. Dessa forma, os componentes do vetor com os graus de pertinência da união são calculados dos valores individuais dos conjuntos A e B conforme a equação 2.7 ([SIMOES; SHAW, 1999](#)).

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.7)$$

A definição da função fuzzy "OU" pode ser dada pela equação 2.8.

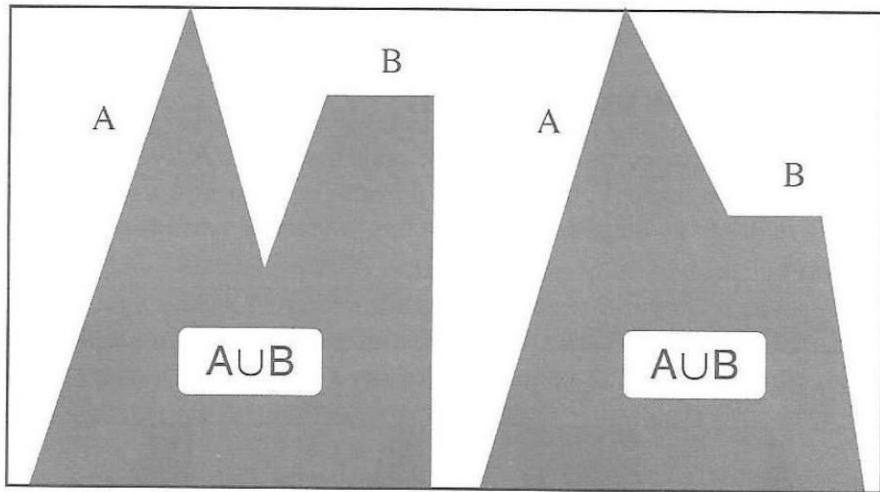
$$\begin{aligned} x \in A \text{ OU } x \in B &\rightarrow x \in A \cup B \forall x \\ \mu_A \text{ OU } \mu_B &\rightarrow \mu_{A \cup B} \end{aligned} \quad (2.8)$$

A representação gráfica da união (OU) dos conjuntos fuzzy pode ser visto na figura 18.

2.7 Funções de pertinência fuzzy

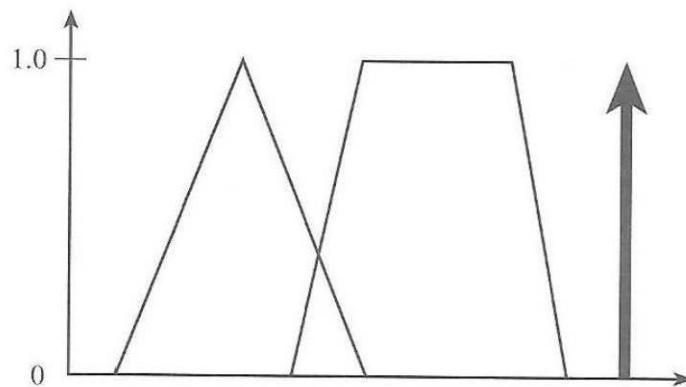
Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabular que atribui valores de pertinência difusos a valores discretos de variáveis em seu domínio de discurso, onde esse refere-se ao intervalo numérico de todos os valores reais possíveis que uma determinada variável pode assumir ([SIMOES; SHAW, 1999](#)). Alguns exemplos de funções

Figura 18 – União de conjuntos fuzzy

Fonte: ([SIMOES; SHAW, 1999](#))

de pertinência podem ser vistos na figura [Figura 19](#), onde são mostradas funções do tipo triangular, trapezoidal e fuzzy-tom. O eixo vertical representa o grau de pertinência da variável, que varia de zero a um, e o eixo horizontal o universo de discurso ([SIMOES; SHAW, 1999](#)).

Figura 19 – Exemplos de funções de pertinência

Fonte: ([SIMOES; SHAW, 1999](#))

Simoes e Shaw (1999) sugerem que as funções de pertinência triangulares e trapezoidais são as mais comumente utilizadas, mas que isso não é regra e a escolha do tipo de função de pertinência vai de acordo com base em experiência prévia, da natureza do processo que se deseja controlar ou por meio de entrevista com especialistas. Os autores destacam que essa não é uma atividade simples de ser realizada e sugerem algumas dicas

a serem seguidas:

- Um número prático de funções de pertinência entre 2 e 7, quanto maior for o número de conjuntos, maior a precisão, mas em compensação a demanda computacional também aumenta;
- Por serem gerados com mais facilidade, os formatos triangulares e trapezoidais são comumente utilizados. Porém, onde não se deseja variações bruscas e se deseja um desempenho suave se utilizam funções do tipo $\cos^2(x)$, gaussiana, sigmoide e *spline cúbico S-shape*. Além disso, as funções de pertinência não precisam ser simétricas nem espaçadas de forma igual e cada variável pode ter seu conjunto de função de pertinência com formas e quantidades diferentes;
- O grau de superposição entre as funções de pertinência no mínimo de 25% e no máximo 75%.
- A função de pertinência X deve ser normal, ou seja, a altura máxima, ou seu grau de pertinência máximo é igual a um.

$$\max \mu_x(u) = 1, u \in U \quad (2.9)$$

- A função de pertinência X deve ser convexa, ou seja, deve possuir as conectividades interior entre as funções, prevenindo espaços vazios entre elas dentro dos extremos.

$$\mu_x [\lambda u_1 + (1 - \lambda) u_2] \geq \min [\mu_x(u_1), \mu_x(u_2)] \quad (2.10)$$

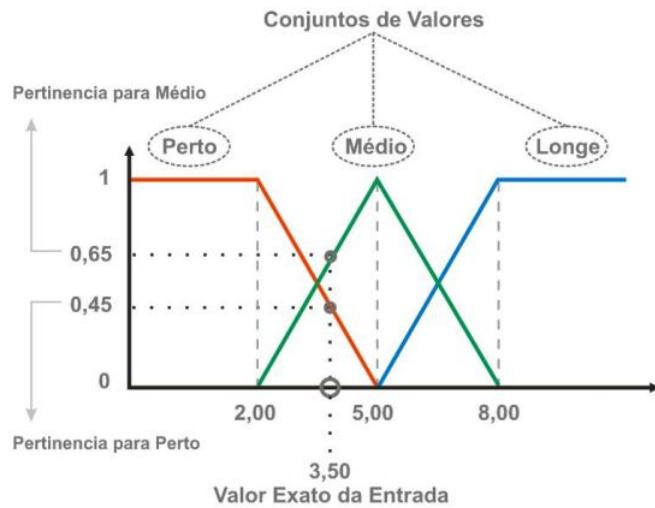
$$\text{Para } u_1, u_2 \in U, \lambda \in [0, 1]$$

- As funções de pertinência de uma determinada variável devem cobrir todo o universo de discurso da referida variável, ou seja, precisam ser completas.

2.8 Fuzzyficação

O processo de *fuzzificação* consiste em transformar os números reais do universo de discurso para o domínio *fuzzy*. A Figura 20 representa um exemplo de *fuzzificação*, onde o valor real 3.50 é transformado no domínio *fuzzy*. Nesse exemplo, para a função de pertinência "Perto" o grau de pertinência é de 0.45, enquanto que para a função "Médio" têm-se 0.65 de grau de pertinência. Dessa forma, o resultado é um vetor *fuzzy* com os respectivos graus de pertinência para cada função cruzada pelo valor de entrada. ([SIMOES; SHAW, 1999](#))

Figura 20 – Processo de Fuzzificação.



Fonte: www.researchgate.net (Acesso em: 22/05/2022).

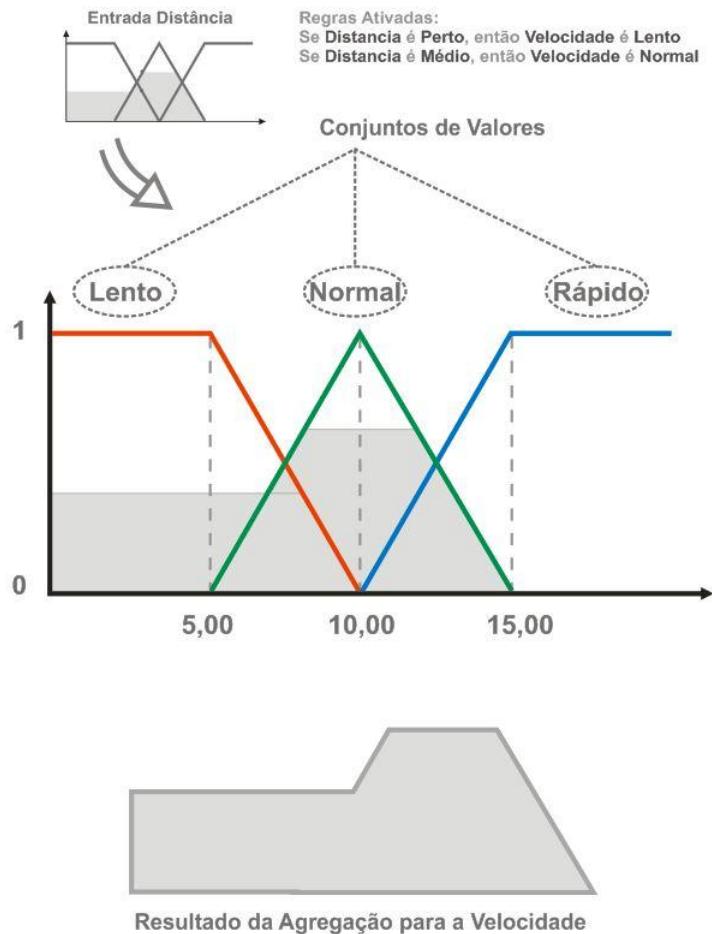
2.9 Vetor de possibilidades

Conforme visto no tópico anterior referente a fuzzificação, a transformação do valor real 3.50 para o domínio fuzzy resultou em um grau de pertinência de 0.45 para a função de pertinência "Perto" e 0.65 para a função "Médio". Para a função de pertinência "Longe", o grau de pertinência é igual a 0.0, pois a linha vertical no valor real 3.50 não cruza essa função de pertinência. O vetor *fuzzy* para o número discreto 3.50 é igual a {0.45; 0.65; 0}. Dessa forma, é possível definir que se há Y funções de pertinência, um vetor discreto com N valores, resulta em N vetores *fuzzy* que são chamados de vetores de possibilidades e cada um contém Y elementos. Em cada vetor, há dois elementos com valores diferentes de zero, ou apenas um quando a projeção vertical do valor real corta a função de pertinência exatamente no seu pico (SIMOES; SHAW, 1999).

2.10 Defuzzificação

O processo de defuzzificação é o inverso da fuzzificação. Ou seja, a defuzzificação traduz a saída do domínio *fuzzy* para o domínio discreto. Os métodos mais comumente utilizados para defuzzificação são: centro de área (centroide), centro do máximo e média do máximo. A Figura 21 representa um exemplo de defuzzificação, onde nela mostra a figura fuzzy gerada como resultado. Se o método centroide for utilizado para defuzzificação, será então calculado o centro de área da figura resultante e o resultado será um número real. (SIMOES; SHAW, 1999)

Figura 21 – Processo de defuzzificação.



Fonte: www.researchgate.net (Acesso em: 22/05/2022).

2.10.1 Defuzzificação centro da área (centróide)

O método do centro de área também é chamado de método do centro de gravidade, pois ele calcula o centróide da área composta do termo de saída *fuzzy* (μ_{out}), o qual é composto pela contribuição de todas as regras. O centróide é o ponto que divide a área resultante em duas áreas iguais e seu cálculo é dado pela equação 2.11 (SIMOES; SHAW, 1999).

$$u^* = \frac{\sum_{j=1}^N u_i \mu_{OUT}(u_i)}{\sum_{j=1}^N \mu_{OUT}(u_i)} \quad (2.11)$$

Onde, $\mu_{OUT}(u_i)$ é a área de uma função de pertinência modificada pelo resultado da inferência *fuzzy* e u_i é a posição do centróide de cada uma das funções de pertinência (SIMOES; SHAW, 1999).

2.11 Controladores fuzzy baseados em regra

Existem dois tipos de regras de inferência *fuzzy*, ou também chamados de associações, que são *modus ponens* que é o modo afirmativo e o *modus tollens* que é o modo negativo. Nos dois casos, a operação é baseada em premissas ou condições e que resultam em uma consequência (SIMOES; SHAW, 1999).

No *modus ponens*:

Premissa 1: $u = A$

Premissa 2: Se $u = A$ então $y = B$

Consequência: $y = B$

No *modus tollens*:

Premissa 1: $y = \text{não-}B$

Premissa 2: se $u = A$ então $y = B$

Consequência: $u = \text{não-}A$

A regra ou inferência *fuzzy* utiliza o *modus ponens* para relacionar conjuntos *fuzzy* conforme mostrado na equação 2.12 (SIMOES; SHAW, 1999).

$$\mathbf{SE} \ X = A \ \mathbf{ENTÃO} \ Y = B \quad (2.12)$$

Onde, $A \subset X$ e $B \subset Y$.

Os controladores *fuzzy* são munidos de diversas regras *fuzzy* e todas elas são ativadas ao mesmo tempo em paralelo. Dessa maneira, a forma de que esses controladores "raciocinam" é a inferência associativa paralela. Quando fornecido com uma entrada, o controlador *fuzzy* dispara cada regra em paralelo em graus variados, dependendo de um peso chamado de grau de suporte, que é um número na faixa de zero a um associado a cada regra, para inferir um resultado ou saída. Esses controladores possuem alta velocidade de processamento justamente pela operação paralela (SIMOES; SHAW, 1999).

A forma de raciocínio dos sistemas *fuzzy* não utiliza proposições lógicas bivalentes, mas sim conjuntos linguísticos e de forma geral, uma regra *fuzzy* é dada conforme equações 2.13 e 2.14 (SIMOES; SHAW, 1999).

$$\mathbf{SE} \ < \text{condições} \ > \ \mathbf{ENTÃO} \ < \text{conclusão} \ > \quad (2.13)$$

ou

$$\mathbf{SE} \ < \text{antecedente} \ > \ \mathbf{ENTÃO} \ < \text{consequente} \ > \quad (2.14)$$

As condições podem ser relacionadas a valores *fuzzy* linguísticos, conforme equação 2.15:

$$\text{SE } \text{pressão} = <\text{muito baixa}> \quad \text{E } \text{temperatura} = <\text{média}> \quad (2.15)$$

$$\text{ENTÃO } \text{válvula} = <\text{abrir um pouco}>$$

2.11.1 Inferência fuzzy

Segundo Simões e Shaw (1999), as escolhas mais comuns para a inferência *fuzzy* na agregação, que é a composição dos vários conjuntos *fuzzy* de entrada dentro de uma regra, são as t-normas *mín* e *produto*. Já na combinação, que é a composição de saída *fuzzy* de cada regra, a escolha mais comum é a s-norma *máx*.

2.11.2 Controlador *fuzzy* usando inferência Máx-Mín

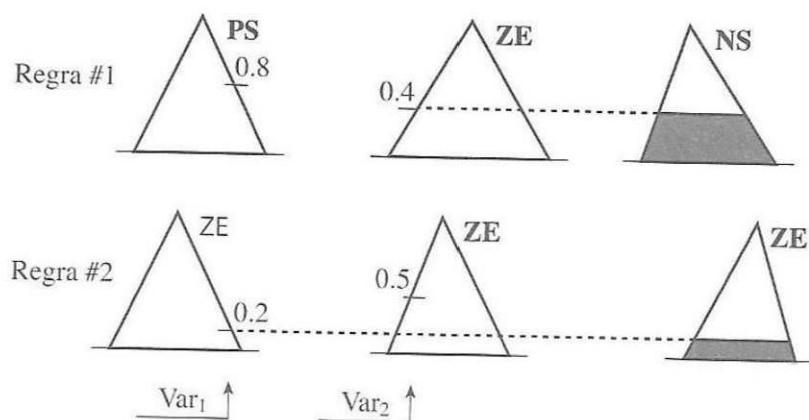
Para um dado controlador *fuzzy* com duas entrada e uma saída é dada as regras vistas na equação 2.16.

$$\text{Regra1 : SE } Var_1 = PS \text{ E } Var_2 = ZE \text{ Então } Var_{out} = NS \quad (2.16)$$

$$\text{Regra2 : SE } Var_1 = ZE \text{ E } Var_2 = ZE \text{ Então } Var_{out} = ZE$$

A representação gráfica da equação 2.16 pode ser vista na figura 22.

Figura 22 – Agregação em um sistema com duas regras.

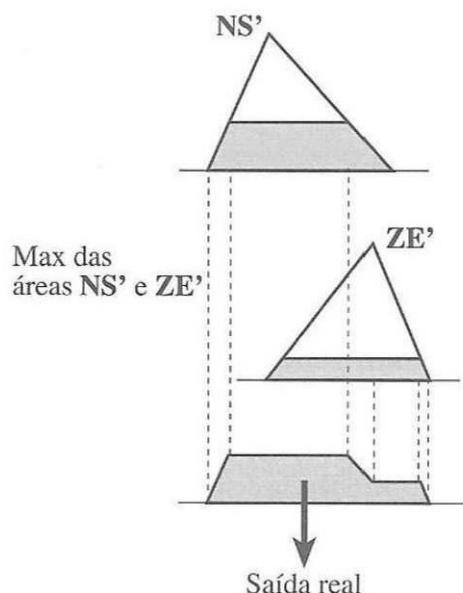


Fonte: (SIMOES; SHAW, 1999)

Na figura 22 é possível observar na primeira regra a agregação das funções de pertinência PS e ZE que são os números de entrada *fuzzy*. As funções foram combinadas utilizando o operador "Mín" correspondente ao conector "E", sendo essa a regra de intersecção *fuzzy*. Os valores Var_1 e Var_2 são as entradas discretas do sistema plotadas no eixo horizontal (universo de discurso). Ao plotar uma linha vertical sobre o valor das entradas, essa linha cruza o conjunto *fuzzy* antecedente, que nesse caso pode ser PS ou ZE, obtendo assim o seu grau de pertinência do referido conjunto. No caso da regra 1, os valores de grau de pertinência foram 0,8 e 0,4 para os conjuntos PS e ZE, respectivamente. Como o conector utilizado foi o "E", ou seja, o "Mín" ou intersecção, é necessário encontrar o menor valor dentre os graus de pertinência encontrados, que no referido exemplo foi 0,4. Uma linha horizontal é então traçada do menor valor de grau de pertinência sobre o conjunto *fuzzy* consequente *NS*. O conjunto consequente é então truncado nesse valor, resultando então na conclusão da referida regra. Os conjuntos *fuzzy* NS e ZE truncados são agora referidos como NS' e ZE' (SIMOES; SHAW, 1999).

A etapa seguinte é a chamada de composição. Nessa etapa, os conjuntos *fuzzy* truncados NS' e ZE' utilizam o operador "Máx", que corresponde ao conectivo "OU" (regra de união *fuzzy*) para serem combinados. Ao utilizar o operador "Máx", é encontrado o contorno comum aos dois conjuntos, convertendo o resultado do processo de inferência *fuzzy* em um resultado numérico único. A figura 23 representa o processo de composição seguido pela *defuzzificação* pelo centróide (SIMOES; SHAW, 1999).

Figura 23 – Agregação em um sistema com duas regras.



Fonte: (SIMOES; SHAW, 1999)

2.11.3 Tabela de regras fuzzy

A tabela de regras *fuzzy* é considerada como a base do conhecimento ou o depósito de inteligência do controlador. Durante a identificação do sistema *fuzzy* é feito o preenchimento das entradas da tabela de regras. Nessa etapa é comum utilizar a ajuda de um operador humano com bom conhecimento do processo para auxiliar na identificação da operação e controle do processo (SIMOES; SHAW, 1999). Um exemplo de uma tabela de regras pode ser vista na figura 24.

Figura 24 – Tabela de regras *fuzzy*.

	NM	NS	ZE	PS	PM
NM					
NS					
ZE					
PS					NS
PM					

(Variável 1 = linhas, Variável 2 = colunas)

Fonte: (SIMOES; SHAW, 1999)

Na figura 24 mostra uma tabela de regras para um sistema com duas entradas e uma saída, onde a primeira linha representa as funções de pertinência relacionadas à variável 1, enquanto a primeira coluna está relacionada à variável 2. O preenchimento da tabela é então feito com as funções de pertinência consequentes, ou seja, de saída. O exemplo preenchido na figura 24 pode ser descrito pela equação 2.17.

$$\text{SE } v_1 = PM \text{ E } v_2 = PS \text{ ENTÃO } v_{out} = NS \quad (2.17)$$

2.12 Controlador Proporcional-Integral (PI) fuzzy

O controle *fuzzy* pode ser assimilado ao controle PID de forma simples e direta. Um controlador PI pode ser dado no domínio do tempo pela equação 2.18.

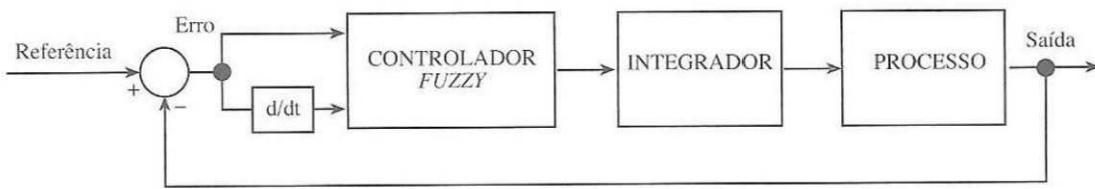
$$du = K_p e + K_i de \quad (2.18)$$

Já a sua definição da regra *fuzzy* é dada pela equação 2.19.

$$\text{SE } erro = E_i \text{ E variação do erro} = dE_i \text{ ENTÃO variação do controle} = dU_i \quad (2.19)$$

No controlador *fuzzy* demonstrado na equação 2.19 há duas entradas que são o erro e sua primeira derivada que é a variação do erro. Como a saída é a variação do controle, se faz necessário a sua integração antes de ser usada para controle do processo. Uma representação em diagrama de blocos de um controlador *fuzzy*-PI pode ser vista na figura 25 (SIMOES; SHAW, 1999).

Figura 25 – Tabela de regras *fuzzy*.



Fonte: (SIMOES; SHAW, 1999)

2.13 Controlador Mamdani

O nome deriva do seu criador Ebrahim Mamdani, da Universidade de Londres, que em 1973 introduziu um sistema de controle com lógica difusa. Atualmente, esta é a técnica de mais utilizada de inferência *fuzzy*. Este processo é aplicado em quatro etapas (WIHELM,):

1. Fuzzificação das variáveis de entrada;
2. Inferência (análise das regras);
3. Composição (agregar as saídas das regras);
4. Defuzzificação.

Cada regra do algoritmo *fuzzy* é uma proposição condicional e as diferentes relações entre estas podem ser derivadas. O operador define previamente a regra a ser implementada para a função de implicação, a qual definirá o seguinte. O controle deste método é a resultante da agregação das regras do programa, gerando um conjunto *fuzzy* que define a saída do controlador por meio da defuzzificação (ANDRADE; JACQUES, 2008).

2.14 Controlador Tagaki-Sugeno-Kang

Em 1983, o controlador Sugeno ou modelo difuso TSK (Takagi, Sugeno e Kang) foi implementado como uma simplificação do modelo Mamdani. Este sugere um *singleton* difuso, ou seja, um único ponto como função de pertinência consequente da regra ([WIHELM](#),). Dessa maneira, o resultado não é mais um conjunto *fuzzy* de uma centroide bidimensional, esse assume apenas um valor numérico.

Com tal abordagem, dispensa-se a definição de implicação específica, onde a saída final do controlador é resultante da média ponderada das respostas de cada regra, não sendo necessário a defuzzificação. Como mencionado, o modelo de inferência é similar ao método baseado, o qual altera-se apenas o consequente da regra. O formato desse estilo é:

$$\mathbf{SE} \ x \ \text{é} \ A \ \mathbf{E} \ y \ \text{é} \ B \ \mathbf{ENTÃO} \ z \ \text{é} \ f(x, y)$$

onde:

- x , y e z são termos linguísticos;
- A e B são variáveis linguísticas de X e Y , respectivamente;
- $f(x, y)$ é uma função matemática *crisp*.

O resultado de z é definido como uma constante que representa com um único valor o conjunto *fuzzy* e os demais com pertinência zero, sem alterar a determinação simplificada da resposta final do controlador.

2.15 Algorítmico Genético (*Genetic Algorithm*)

O conceito deste método baseia-se na exploração de um sistema com parâmetros conhecidos, na busca da melhor solução para problemas de otimização ([ACADEMY](#),). Partindo de uma pré-definição, o algorítmico genético cruza específicas interações e produz novas soluções para adaptar-se ao objetivo ou *set – point*.

Como na biologia, a área da computação encara a problemática como um *indivíduo* (ser vivo), o qual carrega informações no seu *cromossomo* (DNA) essenciais para encontrar a solução. As variáveis ou *genes*, ao interagir por meio de *crossovers* (cruzamentos), *reproduzem* e seus *fenótipos* (saídas) serão avaliados para determinar os mais *fitness* (aptos).

Em resumo, o AG divide-se em quatro componentes principais:

1. Indivíduo

O portador do "código genético", onde em conjunto formam uma população, dos quais serão comparados e selecionados para realizarem os cruzamentos e procriarem;

2. Função de Avaliação

Este é o objeto da otimização, onde é avaliado cada indivíduo e comparado entre si. Cada atribuição é ranqueada e estes são ordenados de acordo com o mais apto para o menos;

3. Seleção

Baseada no resultado das comparações, a seleção categoriza as probabilidades de cada indivíduo e ordena-os;

4. Reprodução

Ao acasalar (cruzar), os cromossomos são combinados e ocorrem as mutações. Após a seleção do acasalamento, ocorre o *crossing-over* e os novos indivíduos recombinados, possuem a variabilidade genética para ser testada nas adversidades.

No estudo abordado nesse trabalho, os componentes serão divididos e sequenciados, de acordo com o fluxograma ilustrado na Figura 26.

Nos sub-tópicos à seguir, é explanado de forma sucinta, o processo cíclico para otimização do controle por lógica nebulosa.

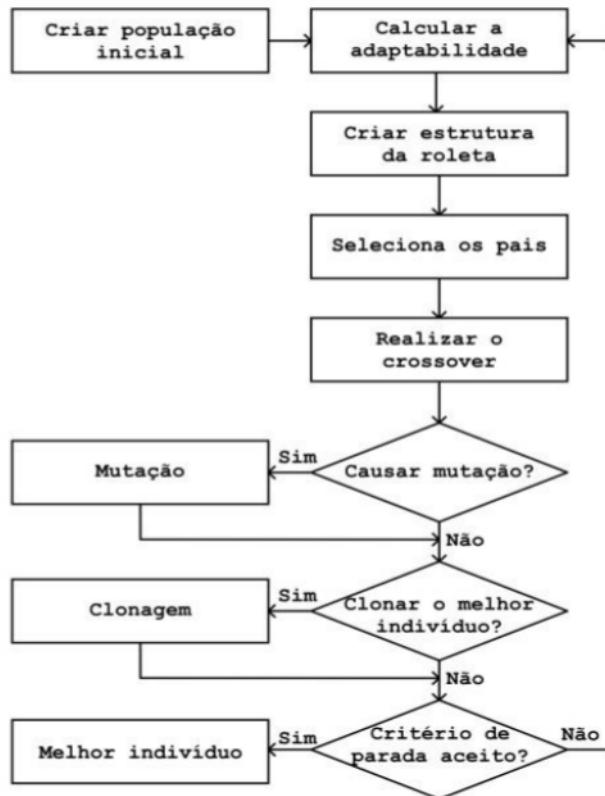
2.15.1 Inicialização

Para inicialização do código AG, é preciso gerar os vetores dos cromossomos de forma aleatória cobrindo todo o universo de discurso. O número de indivíduos da população pode ser escolhido de acordo com a necessidade do problema. É necessário que haja um vetor cromossomo para cada uma das entradas e saídas do controlador, bem como para o conjunto de regras.

Após a definição dos vetores cromossomos, é inicializada a simulação e para cada um dos indivíduos é feito uma simulação. Assim, para cada um dos indivíduos será possível obter o custo (definido pela função custos, abordado adiante) da simulação em função do erro e do sinal de controle.

Ao término das simulações de todos os indivíduos, é gerado um vetor de custos onde contém o custo de cada indivíduo. Posteriormente, verifica-se aqueles indivíduos que possuem menor custo de simulação, ou seja, aqueles controladores que foram melhores. É necessário definir a porcentagem da população que será clonada para a geração futura, ou seja, aqueles melhores indivíduos que se encaixam na quantidade definida, passam para a próxima geração (são clonados). A clonagem permite que os melhores indivíduos não sejam perdidos e que a tendência das gerações futuras é sempre de melhorar.

Figura 26 – Fluxograma do Algorítimo Genético.



Fonte: UFRN

2.15.2 Gerações

Para iniciar uma geração, utiliza-se o método da roleta. Os indivíduos que possuírem menores custos terão mais chances de serem sorteados. Assim, serão sorteados dois indivíduos da geração anterior e os que tiverem menores custos serão provavelmente sorteados.

Os dois indivíduos sorteados são os chamados de pais e eles farão o *crossover* – *over* (cruzamento) para geração de um filho da geração atual. Para isso, para cada indivíduo novo gerado são sorteados dois pais para cada uma das variáveis (entradas, saídas e regras).

Um dos métodos utilizados para o *crossover* é o *flat crossover* (ZHANG; ISHIKAWA, 2005). Outro método tradicional bastante utilizado é o qual é sorteado uma posição dos cromossomos e a parte inicial (antes do ponto sorteado do cromossomo) do pai 1 é junto com a parte final (após o ponto sorteado do cromossomo) do pai 2, gerando assim um filho.

Os indivíduos passam novamente pela simulação, onde será obtido um valor de custo para cada um deles onde os melhores serão clonados para geração futura e os com

menores custos terão chances maiores de serem sorteados para serem os pais na geração seguinte.

2.15.3 Índices de avaliação de controladores

Para comparar o desempenho de controladores diferentes, é necessário estabelecer uma forma de avaliação, onde comumente se utiliza os índices de avaliação para tal tarefa. Na literatura é possível encontrar diferentes índices de avaliação que podem ser utilizados como forma de avaliação de performance de controladores, mas conforme citado por Cavalcante (2007), os que são mais comumente utilizados são aqueles que utilizam a integral do erro em relação ao *set – point*. Dentre os índices existentes, é possível ressaltar: Integral do erro absoluto ponderado no tempo (*Integral Time Absolute Error - ITAE*), Integral do erro absoluto (*Integral Absolute Error - IAE*) e o Índice de Goodhart (IG) (CAVALCANTE, 2017).

O índice Integral do Erro Absoluto (IAE) é dado pela equação 2.20.

$$IAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |e(k)| \quad (2.20)$$

O índice da Integral do Erro Absoluto Ponderado no Tempo é dado pela equação 2.21.

$$ITAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N t|e(k)| \quad (2.21)$$

O Índice de Goodhart, o qual é mais completo, pois avalia tanto a resposta do sistema em relação ao *set – point* quanto o sinal de controle, é dado pela equação 2.22.

$$IG = \alpha_1 \varepsilon_1 + \alpha_2 \varepsilon_2 + \alpha_3 \varepsilon_3 \quad (2.22)$$

Onde α_1 , α_2 e α_3 são pesos atribuídos dependendo do que se deseja priorizar e os termos ε_n são dados por:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u(k) \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (u(k) - \varepsilon_1)^2 \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (s(k) - y(k))^2 \quad (2.25)$$

Em que $u(k)$ representa a ação de controle, $s(k)$ é a referência, $y(k)$ é a resposta do sistema e N é a quantidade de pontos avaliados.

3 Metodologia

Nesse trabalho é desenvolvido o controle do nível de água e da pressão em uma caldeira do tipo tubulão com inteligência artificial. Para isso, é desenvolvido o modelo dinâmico de uma caldeira e das válvulas de alimentação de água e saída de vapor. O controle do nível de água da caldeira é realizado por meio do controle da válvula de alimentação de água. Para o controle da pressão no tubulão, é realizado o controle da válvula de saída de vapor saturado. Para isso, são utilizados controladores *Fuzzy* com funções de pertinência do tipo triangular e otimizados por meio de algoritmo genético.

Neste capítulo é apresentado o sistema a ser utilizado para o controle e o método empregado para a sua realização. Inicialmente é apresentado a modelagem dinâmica do modelo de uma caldeira de tubulão. Em seguida é apresentado a implementação das válvulas de alimentação de água e de saída de vapor da caldeira, onde serão aplicados os controladores *fuzzy*. Na sequência é detalhado o uso dos controladores *fuzzy* com suas funções de pertinência e otimização por meio de algoritmo genético. Por fim, é apresentado a implementação do modelo no *software* Simulink/Matlab.

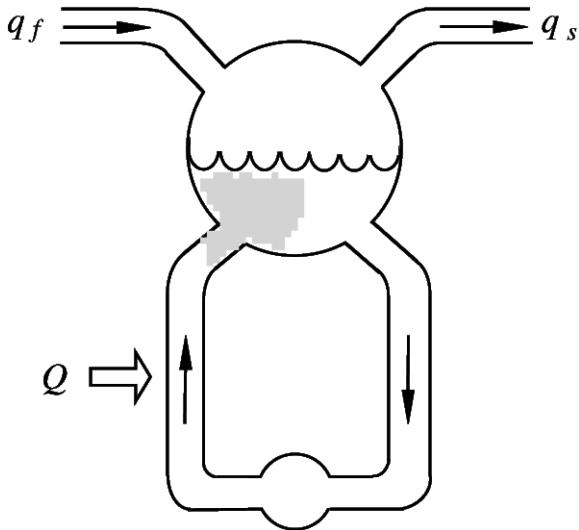
3.1 Modelagem dinâmica

Os autores Astrom e Bell (2000) descrevem a modelagem dinâmica não linear da circulação natural de uma caldeira de tubulão. O modelo foi desenvolvido com propósito de servir como base para controle da dinâmica complicada dos componentes do tubulão, *downcomer* e *risers*. Como uma vantagem do modelo, é que nele os efeitos *shrink* e *swell* são bem capturados, o que é de grande importância quando se aborda o controle de nível da caldeira. Para a modelagem, utilizou-se princípios básicos da termodinâmica e alguns parâmetros físicos do modelo, sempre em busca de manter a fidelidade do modelo com simplicidade. Os dados da modelagem foram validados em comparação com os dados de uma planta real, consolidando assim a modelagem por eles desenvolvida ([ASTROM; BELL, 2000](#)). Dessa forma, o modelo desenvolvido por Astrom e Bell (2000) foi escolhido para o desenvolvimento desse trabalho.

A modelagem se baseia inicialmente em um balanço global de massa e energia. Conforme pode ser visto na figura 27, a qual representa uma esquematização simplificada de uma caldeira. Na parte inferior da imagem é possível observar o ciclo fechado dos *risers-tubulão-downcomers*. O calor (Q) é fornecido ao sistema nos tubos de subida (*risers*), que faz com que a água entre em estado de evaporação. Ao evaporar, as forças gravitacionais fazem com que o vapor saturado suba e com isso ocasiona uma circulação natural nesse ciclo, onde a água desce do tubulão pelos tubos de descida (*downcomers*), é

aquecido nos tubos de subida (*risers*) e no tubulão há a mistura de vapor saturado com a água de alimentação em estado líquido. A água de alimentação (q_f) é fornecida ao tubulão à medida que o vapor saturado (q_s) deixa o tubulão. É possível compreender que dentro do tubulão haverá vapor saturado abaixo da linha do líquido, ou seja, vapor misturado na água, e essa presença é o que ocasiona os fenômenos *shrink* e *swell*, o que faz com que o controle de nível de água na caldeira seja complicado (ASTROM; BELL, 2000).

Figura 27 – Esquematização simplificada de uma caldeira.



Fonte: (ASTROM; BELL, 2000).

A figura 27 representa uma simples esquematização da caldeira, mas apesar de toda a complexidade que existe em uma caldeira real, o comportamento grosso do sistema é bem capturado usando apenas o balanço global de massa e energia. Assim, o balanço global de massa é dado pela equação 3.1, onde a taxa de acumulação de massa no sistema é igual a taxa de entrada de massa menos a taxa de saída de massa (ASTROM; BELL, 2000).

$$\frac{d}{dt}[\varrho_s V_{st} + \varrho_w V_{wt}] = q_f - q_s \quad (3.1)$$

Onde:

- ϱ_s é a densidade específica do vapor;
- ϱ_w é a densidade específica da água;
- V_{st} é o volume total de vapor no sistema;
- V_{wt} é o volume total de água no sistema;

- q_f é a taxa de fluxo mássico de água de alimentação;
- q_s é a taxa de fluxo mássico de vapor saturado.

O balanço global de energia é dado pela equação 3.2, onde a taxa de acumulação de energia no sistema é igual a taxa de entrada de energia menos a taxa de saída de energia (ASTROM; BELL, 2000).

$$\frac{d}{dt}[\varrho_s u_s V_{st} + \varrho_w u_w V_{wt} + m_t C_p t_m] = Q + q_f h_f - q_s h_s \quad (3.2)$$

Onde:

- u_s é a energia interna específica do vapor (J/kg);
- u_w é a energia interna específica da água saturada (J/kg);
- m_t é a massa total de metal dos tubos e tubulão (kg);
- C_p é o calor específico do metal (J/kg°C);
- t_m é a temperatura do metal (°C);
- Q é o calor fornecido aos *risers*;
- h_f é a entalpia específica da água de alimentação (J/kg);
- h_s é a entalpia específica do vapor (J/kg).

De acordo com a Primeira Lei da termodinâmica, a entalpia (H) é dado pela energia interna (U) menos o produto da pressão (p) com o volume (V), conforme equação 3.3.

$$H = U - pV \quad (3.3)$$

Dessa forma, a energia interna específica pode ser dada pela equação 3.4.

$$u = h - \frac{p}{\rho} \quad (3.4)$$

Com a equação 3.4 é possível reescrever a equação do balanço global de energia em função da entalpia e que é dada conforme equação 3.5.

$$\frac{d}{dt}[\varrho_s h_s V_{st} + \varrho_w h_w V_{wt} - pV_t + m_t C_p t_m] = Q + q_f h_f - q_s h_s \quad (3.5)$$

Onde:

V_{st} é o volume total de vapor; V_{wt} é o volume total de água;

O volume total do tubulão, *downcomers* e *risers* é dado pela soma de V_{st} e V_{wt} . A temperatura do metal t_m pode ser relacionada com a pressão no tubulão, pois essa temperatura está fortemente ligada a temperatura de saturação do vapor, que muda de acordo com a pressão (ASTROM; BELL, 2000).

$$V_t = V_{st} + V_{wt} \quad (3.6)$$

Utilizando apenas as equações 3.1, 3.5 e 3.6, juntamente com as tabelas de vapor saturado, resultam em um modelo mais simples de uma caldeira, um modelo de segunda ordem. Algumas manipulações podem ser realizadas no modelo para se obter o modelo em espaço de estados. Com o resultado, é possível observar alguns mecanismos físicos principais que afetam a dinâmica do sistema.

A princípio são escolhidas as variáveis de estado, sendo a primeira escolhida a pressão P do tubulão, pois todas as partes no seu interior estão em equilíbrio térmico e é uma variável fácil de medir. A segunda variável escolhida é o volume total de água no sistema V_{wt} . As variáveis de densidade específica e entalpia específica são retiradas da tabela de vapor saturado, dessa forma, podem ser expressas em função da pressão. Sabendo que o volume total é constante e é dado pela soma de vapor total e de água total, é possível realizar manipulações para assim remover a variável V_{st} das equações 3.1 e 3.5, resultando assim nas equações em espaço de estado 3.7 e 3.8 (ASTROM; BELL, 2000).

$$e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s \quad (3.7)$$

$$e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s \quad (3.8)$$

Onde:

$$\begin{aligned} e_{11} &= (\rho_w - \rho_s) \\ e_{12} &= (V_{wt} \frac{d\rho_w}{dp} + V_{st} \frac{d\rho_s}{dp}) \\ e_{21} &= (\rho_w h_w - \rho_s h_s) \\ e_{22} &= h_s V_{st} \frac{d}{dp} \rho_s + V_{st} \rho_s \frac{d}{dp} h_s + h_w V_{wt} \frac{d}{dp} \rho_w + V_{wt} \rho_w \frac{d}{dp} h_w - V_t + m_t C_p \frac{d}{dp} t_s \end{aligned} \quad (3.9)$$

Por meio desse modelo é possível obter uma resposta na pressão do tubulão quando ocorre variações na taxa de fluxo de calor, água de alimentação, temperatura da água de alimentação e saída de vapor. Entretanto, como esse modelo é baseado no balanço global de massa e energia, ele não descreve o nível de água no tubulão, pois ele não aborda os

fenômenos relacionados a distribuição de água e vapor na caldeira ([ASTROM; BELL, 2000](#)).

A vazão de condensação é dada por um balanço de energia realizado no interior do sistema e pode ser dada pela equação [3.10](#).

$$q_{ct} = \frac{1}{h_c}(h_w - h_f)q_f + \frac{1}{h_c}(\rho_s V_{st} \frac{dh_s}{dt} + \rho_w V_{wt} \frac{dh_w}{dt} + m_t C_p \frac{dt_s}{dt} - V_t \frac{dp}{dt}) \quad (3.10)$$

Onde $h_c = h_s - h_w$.

3.1.1 Distribuição do vapor na caldeira

A distribuição de vapor no interior da caldeira precisa ser levada em consideração para que o modelo descreva a variação de nível de água no tubulão. O fenômeno shrink e swell é desencadeado devido a redistribuição de vapor e água no interior da caldeira e isso ocasiona o comportamento de fase não-mínima da dinâmica do nível. Quando a válvula de saída de vapor é aberta, ocasiona em uma queda de pressão no interior do tubulão e isso resulta em um aumento no nível de água da caldeira devido ao aumento (*swelling*) das bolhas de vapor que estão abaixo do nível da água. Tratar o comportamento de fluxo em duas fases é algo complicado de se fazer e tipicamente é modelado por equações diferenciais parciais. Porém, uma das grandes contribuições do trabalho de Astrom e Bell (2000) é a possibilidade de derivação de modelos de parâmetros agrupados relativamente simples que se adequam aos dados obtidos experimentalmente ([ASTROM; BELL, 2000](#)).

Para iniciar a análise do título da mistura saturada em um tubo aquecido, é avaliado primeiramente a dinâmica da água e vapor em um tubo aquecido. Para isso, considera-se um tubo vertical uniformemente aquecido ao longo da coordenada z . O balanço global de massa e energia para uma seção do tubo aquecida é dado pelas equações [3.11](#) e [3.12](#) ([ASTROM; BELL, 2000](#)).

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial qu}{\partial z} = \frac{Q}{V} \quad (3.12)$$

Onde α_m é a fração mássica de vapor no fluxo, ou seja, o título da mistura; ρ é a densidade da mistura de vapor-água; q é a vazão mássica; A é a área de seção transversal do tubo; V é o volume; u é a energia interna específica e Q é o calor fornecido aos tubos.

A energia interna específica da mistura vapor e água é então dada pela equação [3.13](#) ([ASTROM; BELL, 2000](#)).

$$u = \alpha_m u_s + (1 - \alpha_m) u_w = u_w + \alpha_m (u_s - u_w) = u_w + \alpha_m u_c \quad (3.13)$$

No estado estacionário:

$$\frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial qu}{\partial z} = qu_c \frac{\partial \alpha_m}{\partial z} = \frac{QA}{V} \quad (3.15)$$

A fração mássica de vapor pode então ser dada pela equação 3.16 (ASTROM; BELL, 2000).

$$\alpha_m = \frac{QA}{qu_c V} z \quad (3.16)$$

As frações de volume e massa de vapor podem ser relacionados por meio da equação 3.17 (ASTROM; BELL, 2000).

$$\alpha_v = \frac{\rho_w \alpha_m}{\rho_s + (\rho_w - \rho_s) \alpha_m} \quad (3.17)$$

3.1.2 Razão média de volume de vapor nos tubos *risers*

É essencial que se seja levado em consideração a quantidade total de vapor nos tubos de subida para realizar a modelagem do nível de água no tubulão. Essa informação pode ser obtida por meio da fração de volume médio nos tubos de subida (*risers*), dada pela equação 3.18.

$$\bar{\alpha}_v = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_s} \left(1 - \frac{\rho_s}{(\rho_w - \rho_s) \alpha_r} \ln \left(1 + \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_s} \alpha_r \right) \right) \quad (3.18)$$

3.1.3 Agrupamento de parâmetros

Astrom e Bell (2000) evitaram o uso de equações diferenciais parciais no modelos por eles desenvolvido. Dessa forma, foi obtido um modelo de parâmetros agrupados por meio de aproximações pelo método de Galerkin. Para isso, assumiu-se que a distribuição do título da massa de vapor é linear mesmo que em condições dinâmicas. O balanço de massa global na seção dos tubos de subida é dado pela equação 3.19 (ASTROM; BELL, 2000).

$$\frac{d}{dt} (\rho_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r) = q_{dc} - q_r \quad (3.19)$$

Onde q_r é o fluxo mássico total saindo dos tubos de subida e q_{dc} é o fluxo mássico total entrando nos tubos de subida. O balanço global de energia para os *risers* é dado pela equação 3.20 (ASTROM; BELL, 2000).

$$\frac{d}{dt}(\rho_s h_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w h_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r - p V_r + m_r C_p t_s) = Q + q_{dc} h_w - (\alpha_r h_c + h_w) q_r \quad (3.20)$$

3.1.4 Fluxo de circulação

Para avaliar o fluxo de circulação, nesse modelo, a caldeira possui uma circulação natural e a taxa de fluxo é regido pelos gradientes de densidade nos tubos de descida e subida e é dado pela relação de estado estacionário conforme a equação 3.21.

$$\frac{1}{2} k q_{dc}^2 = \rho_w A_{dc} (\rho_w - \rho_s) g \bar{\alpha}_v V_r \quad (3.21)$$

Onde k é o coeficiente de fricção (sem unidade) e A_{dc} é a área do tubo de descida (*downcomer*).

3.1.5 Distribuição de vapor no tubulão

Outro ponto a ser avaliado é a distribuição de vapor no tubulão. Os fenômenos físicos no tubulão são complicados, principalmente em relação ao padrão de fluxo e à geometria. Basicamente, o que acontece no tubulão é que a água de alimentação é aquecida pela condensação do vapor à medida que o vapor borbulha através da água. Assim, o balanço de massa para o vapor abaixo do nível de água é dado pela equação 3.22 (ASTROM; BELL, 2000).

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_{sd}) = \alpha_r q_r - q_{sd} - q_{cd} \quad (3.22)$$

Onde V_d é o volume abaixo do nível de água no tubulão; V_{sd} é o volume de vapor abaixo do nível de água; V_{wd} é o volume de água abaixo do nível de água e q_{sd} é a vazão de vapor através da superfície de água no tubulão. A vazão de condensação q_{cd} é dada pela fórmula 3.23.

$$q_{cd} = \frac{h_w - h_f}{h_c} q_f + \frac{1}{h_c} \left(\rho_s V_{sd} \frac{dh_s}{dt} + \rho_w V_{wd} \frac{dh_w}{dt} - V_{sd} + m_d C_p \frac{dt_s}{dt} \right) \quad (3.23)$$

Astrom e Bell (2000) relatam a dificuldade para o cálculo da vazão de vapor através da superfície de água no tubulão e que diferentes modelos foram testados, mas um bom resultado foi obtido pelo modelo empírico mostrado na equação 3.24.

$$q_{sd} = \frac{\rho_s}{T_d}(V_{sd} - V_{sd}^0) + \alpha_r q_{dc} + \beta(q_{dc} - \alpha_r q_r) \quad (3.24)$$

Na equação 3.24, o termo V_{sd}^0 é o volume de vapor no tubulão em uma situação hipotética onde não ocorre condensação de vapor no interior do tubulão e T_d é o tempo de permanência do vapor no interior do tubulão que pode ser aproximado pela equação 3.25 (ASTROM; BELL, 2000).

$$T_d = \frac{\rho_s V_{sd}^0}{q_s} \quad (3.25)$$

3.1.6 Nível de água no tubulão

Com a possibilidade de calcular o vapor distribuído abaixo do nível de água no tubulão, torna-se possível descrever o nível de água. Inicialmente, deve-se encontrar o volume de água no tubulão dado pela equação 3.26 (ASTROM; BELL, 2000).

$$V_{wd} = V_{wt} - V_{dc} - (1 - \bar{\alpha}_v)V_r \quad (3.26)$$

O desvio do nível de água no tubulão, medido em relação a seu nível de operação normalizado é dado pela equação 3.27.

$$l = \frac{V_{wd} + V_{sd}}{A_d} = l_w + l_s \quad (3.27)$$

Onde, l_w é a variação de nível causada pela mudança na quantidade de água no tubulão, l_s é a variação causada pelo vapor no tubulão e A_d é a superfície molhada no nível de operação.

3.1.7 O modelo

Com as equações apresentadas anteriormente é obtido um modelo de quarta ordem, o qual apresenta uma boa representação da caldeira, inclusive o nível de água no tubulão. Para implementação em softwares de simulação, foram obtidas as equações em espaço de estado do modelo. Para o modelo em espaço de estado, os estados escolhidos foram a pressão do tubulão (P), o volume total de água (V_{wt}), título de vapor na saída dos tubos de subida (α_r) e o volume de vapor abaixo do nível de água no tubulão (V_{sd}). O modelo em espaço de estados é dado conforme equação 3.28 (ASTROM; BELL, 2000).

$$\begin{aligned}
e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} &= q_f - q_s \\
e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} &= Q + q_f h_f - q_s h_s \\
e_{32} \frac{dp}{dt} + e_{33} \frac{d\alpha_r}{dt} &= Q - \alpha_r h_c q_{dc} \\
e_{42} \frac{dp}{dt} + e_{43} \frac{d\alpha_r}{dt} + e_{44} \frac{dV_{sd}}{dt} &= \frac{\rho_s}{Td} (V_{sd}^0 - V_{sd}) + \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Os coeficientes e_{ij} são dados pela equação 3.29.

$$\begin{aligned}
e_{11} &= \rho_w - \rho_s \\
e_{12} &= V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} \\
e_{21} &= \rho_w h_w - \rho_s h_s \\
e_{22} &= V_{wt} \left(h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) + V_{st} \left(h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) - V_t + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \\
e_{32} &= (\rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} - \alpha_r h_c \frac{\partial \rho_w}{\partial p}) (1 - \bar{\alpha}_v) V_r + ((1 - \alpha_r) h_c \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p}) \bar{\alpha}_v V_r \\
&\quad + (\rho_s + (\rho_w - \rho_s) \alpha_r) h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} - V_r + m_r C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \\
e_{33} &= ((1 - \alpha_r) \rho_s + \alpha_r \rho_w) h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r} \\
e_{42} &= V_{sd} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \frac{1}{h_c} (\rho_s V_{sd} \frac{\partial h_s}{\partial p} + \rho_w V_{wd} \frac{\partial h_w}{\partial p} - V_{sd} \\
&\quad + m_d C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}) + \alpha_r (1 + \beta) V_r (\bar{\alpha}_v \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + (1 - \bar{\alpha}_v) \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + (\rho_s - \rho_w) \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p}) \\
e_{43} &= \alpha_r (1 + \beta) (\rho_s - \rho_w) V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r} \\
e_{44} &= \rho_s
\end{aligned} \tag{3.29}$$

As derivadas parciais da fração de volume de vapor com respeito a pressão e fração de massa são obtidas por meio da equação 3.30.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} &= \frac{1}{(\rho_w - \rho_s)^2} (\rho_w \frac{\partial \rho_s}{\partial p} - \rho_s \frac{\partial \rho_w}{\partial p}) (1 + \frac{\rho_w}{\rho_s} \frac{1}{1 + \eta} - \frac{\rho_s + \rho_w}{\eta \rho_s} \ln(1 + \eta)) \\
\frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r} &= \frac{\rho_w}{\rho_s \eta} \left(\frac{1}{\eta} \ln(1 + \eta) - \frac{1}{1 + \eta} \right)
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Onde η é dada pela equação 3.31.

$$\eta = \alpha_r \frac{(\rho_w - \rho_s)}{\rho_s} \tag{3.31}$$

3.1.8 Parâmetros do modelo

Uma característica interessante no modelo desenvolvido por Astrom e Bell (2000) utilizado nesse trabalho é que ele precisa de apenas alguns parâmetros conforme listados abaixo.

- Volume do tubulão V_d ;
- Volume do *riser* V_r ;
- Volume do *downcomer* V_{dc} ;
- Superfície molhada do tubulão no nível de operação A_d ;
- Massa total de metal m_t ;
- Massa total do *riser* m_r ;
- Coeficiente de fricção no *loop downcomer – riser* k ;
- Volume de vapor no tubulão quando não há condensação V_{sd}^0 ;
- Parâmetro β da equação empírica 3.24.

3.1.9 Valores de equilíbrio no estado estacionário

A solução no estado estacionário é dado pela equação 3.32.

$$\begin{aligned} q_f &= q_s \\ Q &= q_s h_s - q_f h_f \\ Q &= q_{dc} \alpha_r h_c \\ V_{sd} &= V_{sd}^0 - \frac{T_d(h_w - h_f)}{\rho_s h_c} q_f \end{aligned} \tag{3.32}$$

Para encontrar os valores iniciais das variáveis escolhidas como estados, inicialmente é definido a vazão de saída de vapor q_s e a pressão no tubulão P . As variáveis de estado são então encontradas resolvendo as equações listadas em 3.32.

3.1.10 Solução do modelo

A equação em espaço de estados 3.28 pode ser escrita da forma mostrada na equação 3.33.

$$E \frac{dx}{dt} = b \tag{3.33}$$

Os elementos da matriz E são dados pela equação 3.29. O bloco *S – Function* do *Simulink* é utilizado para juntamente com o *Matlab* resolver a equação. Para resolução, inicialmente são calculados a matriz E e o vetor b . A derivativa do estado é então obtida por meio da inversão de matriz do *Matlab* (ASTROM; BELL, 2000).

3.1.11 Tabelas de vapor

Para calcular as entalpias, densidades e suas derivadas parciais em relação a pressão, as tabelas de vapor são necessárias. Porém, conforme Astrom e Bell (2000) esses valores podem ser aproximados por funções quadráticas conforme mostrado a seguir ([ASTROM; BELL, 2000](#)).

$$h_s = 2,7254E6 + (-1,8992E4 - 1160,0(p - 10))(p - 10) \quad (3.34)$$

$$h_w = 1,4035E6 + (4,9339E4 - 880,0(p - 10))(p - 10) \quad (3.35)$$

$$\rho_s = 53,1402 + (7,673 + 0,36(p - 10))(p - 10) \quad (3.36)$$

$$\rho_w = 691,35 + (-18,672 - 0,0603(p - 10))(p - 10) \quad (3.37)$$

$$t_s = 310,6 + (8,523 - 0,33(p - 10))(p - 10) \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial h_s}{\partial p} = -1,8992E4 - 1160,0(p - 10) \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial h_w}{\partial p} = 4,9339E4 - 880,0(p - 10) \quad (3.40)$$

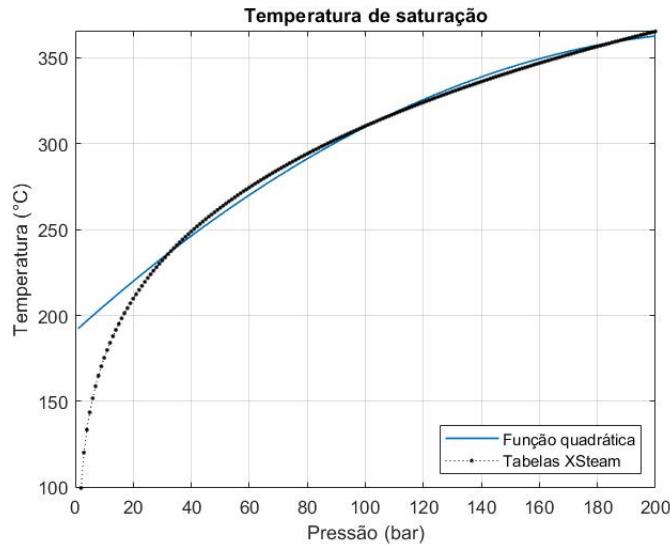
$$\frac{\partial \rho_s}{\partial p} = 7,673 + 0,36(p - 10) \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial p} = -18,672 - 0,0603(p - 10) \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial t_s}{\partial p} = 8,523 - 0,33(p - 10) \quad (3.43)$$

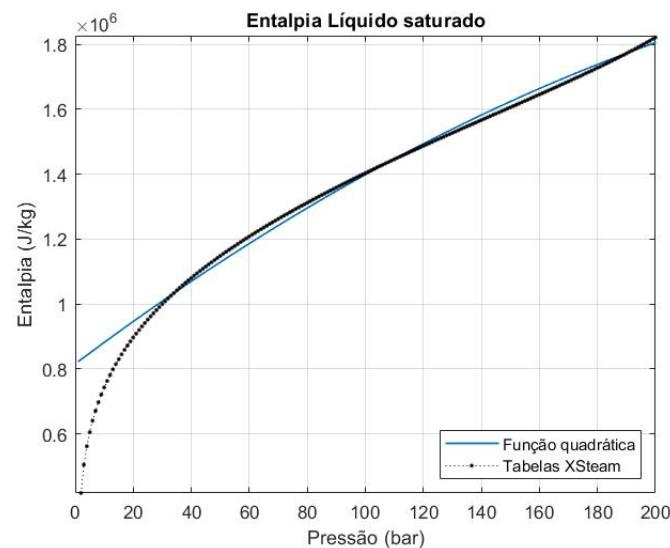
Com o propósito de validar as funções quadráticas para obtenção dos dados das tabelas de vapor, uma comparação foi feita entre os valores das funções quadráticas e os valores resultantes da função *XSteam*. A função *XSteam* é baseada na *International Association for Properties of Water and Steam Industrial Formulation 1997* (IAPWS IF-97) e ela calcula todas as propriedades de vapor e água de forma precisa em uma faixa de 0-1000 bar e 0-2000°C ([HOLMGREN, 2022](#)). A comparação pode ser vista nas figuras 28, 29, 30, 31 e 32.

Figura 28 – Temperatura de saturação



Fonte: Autor (2022).

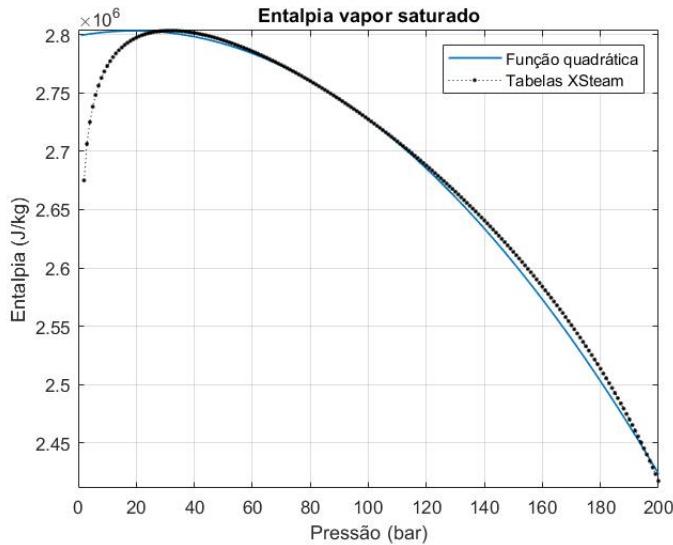
Figura 29 – Entalpia líquido saturado



Fonte: Autor (2022).

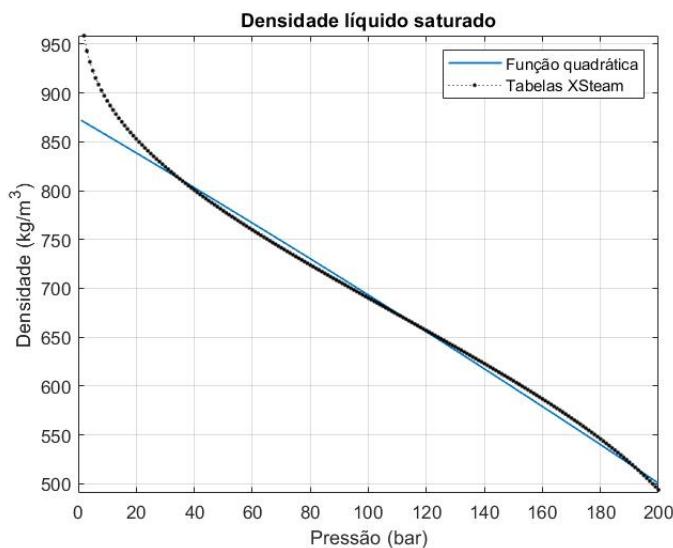
Conforme pode ser visto nas figuras 28, 29, 30, 31 e 32, para pressões acima de 40 bar, ou 4 Mpa, os resultados das funções quadráticas são satisfatórios. Dessa forma, a faixa de pressão acima de 40 bar será considerada para as simulações.

Figura 30 – Entalpia vapor saturado



Fonte: Autor (2022).

Figura 31 – Densidade líquido saturado

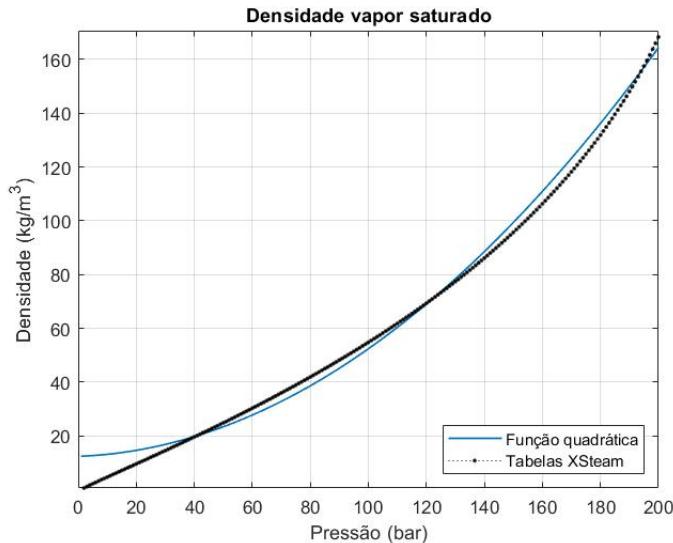


Fonte: Autor (2022).

3.2 Válvulas de controle

A válvula de controle é um dos componentes em um sistema de controle de uma caldeira. Nesse trabalho, são consideradas duas válvulas: uma válvula para água de alimentação e outra para o vapor saturado na saída da caldeira. Segundo Spirax Sarco (2011), as válvulas do tipo globo são comumente as mais utilizadas nos processos de

Figura 32 – Densidade vapor saturado



Fonte: Autor (2022).

controle automático do vapor e suas aplicações, pois elas são de fácil atuação, são versáteis e possuem características bem adequadas às necessidades desse controle (SARCO, 2011).

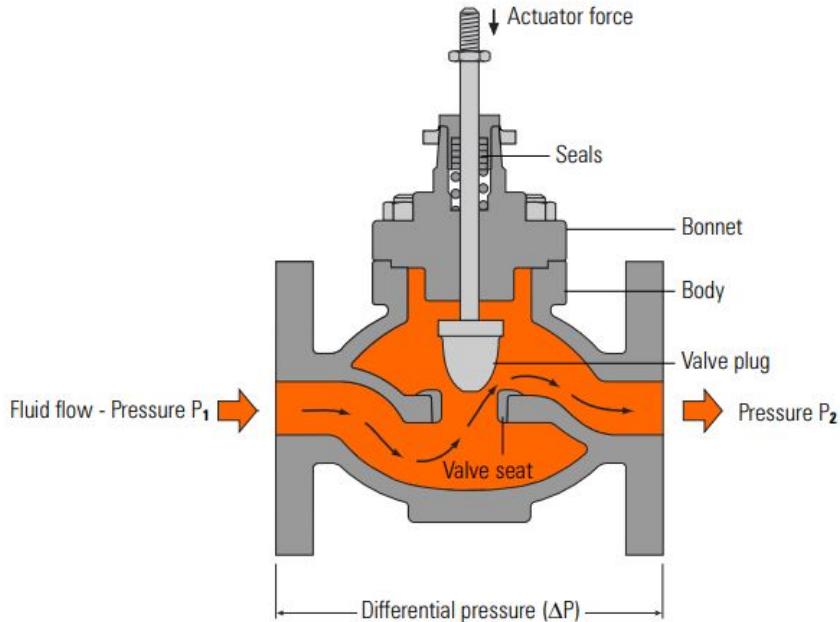
A válvula globo é do tipo linear e de duas-portas. Um representação de uma válvula globo é mostrada na figura 33.

Na figura 33 é possível observar o interior da válvula globo, onde nele se observa o orifício de passagem do fluido. Com a variação da posição do globo, indentificado como "*valve plug*" na imagem, a vazão que passa através da válvula também varia. Dessa maneira, por meio da instalação de um atuador, que pode ser elétrico ou pneumático, ele realiza força no eixo que está conectado ao globo, variando assim a passagem de fluido através da válvula. Além disso, é possível observar que ocorre uma variação de pressão (ΔP) através da válvula, dada pela diferença entre as pressões da entrada e saída da válvula.

Desse modo, uma válvula de controle ajusta o processo realizando variações nos dois fatores, vazão e diferencial de pressão. Esses dois fatores são avaliados juntos em um coeficiente chamado Coeficiente de Vazão (K_v) (SARCO, 2011). De acordo com Spirax Sarco (2011), (K_v) é a vazão medida em m^3/h de água a uma dada temperatura, tipicamente entre 5°C e 40°C , que cria uma queda de pressão de um bar através do orifício da válvula. Outro indicador com informação essencial no controle é o coeficiente K_{vs} , o qual é o valor (K_v) real ou inicial de uma válvula em particular quando está totalmente aberta, constituindo o coeficiente de vazão da válvula ou índice de capacidade (SARCO, 2011).

Esses coeficientes variam de acordo com o fluido que passa pela válvula. Dessa

Figura 33 – Válvula globo



Fonte: (SARCO, 2011).

forma, será abordado o dimensionamento para a válvula de água de alimentação e em seguida para o vapor saturado da saída da caldeira.

3.2.1 Válvula água de alimentação

Para determinar a vazão de água de alimentação através da válvula de controle é utilizada a equação 3.44 (SARCO, 2011).

$$q_f = \frac{K_{vw} \sqrt{1000 \rho_w \Delta P}}{3600} \quad (3.44)$$

Onde q_f é a vazão de água de alimentação (kg/s) e ρ_w é a densidade da água de alimentação (kg/m^3).

3.2.2 Válvula vapor saturado

A dinâmica do vapor através da válvula de controle é complexo e possui uma gama de fórmulas também complexas para sua aplicação. Entretanto, Spirax Sarco (2011) apresenta uma equação relativamente simples que pode ser utilizada para determinação da vazão de vapor em válvulas do tipo globo quando utilizada para controle de passagem de vapor saturado, conforme mostrada na equação 3.45.

$$\dot{m}_s = 12K_{vs}P_1\sqrt{1 - 5,67(0,42 - \chi)^2} \quad (3.45)$$

Onde:

$$\chi = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \quad (3.46)$$

A equação 3.45 assume que a queda de pressão crítica ocorre em 58% da pressão de entrada (P_1). A pressão crítica é aquela em que a válvula possibilita a maior vazão de vapor. Além desse ponto a vazão permanece constante sem aumento. Um detalhe dessa equação é que quando a pressão de saída da válvula (P_2) for menor que a pressão crítica, todo o termo dentro da raíz quadrada deve ser desconsiderado, ou considerado como unitário, pois a vazão será máxima (está abaixo do ponto crítico) (SARCO, 2011).

A vazão de vapor dada pela equação 3.45 é dada em kg/h . Para utilização no modelo descrito nesse trabalho, os valores de vazão de água de alimentação e vapor saturado na saída da caldeira são em kg/s . Dessa forma, uma transformação de unidades é realizada resultando na equação 3.47.

$$q_s = \frac{12K_{vs}P_1\sqrt{1 - 5,67(0,42 - \chi)^2}}{3600} \quad (3.47)$$

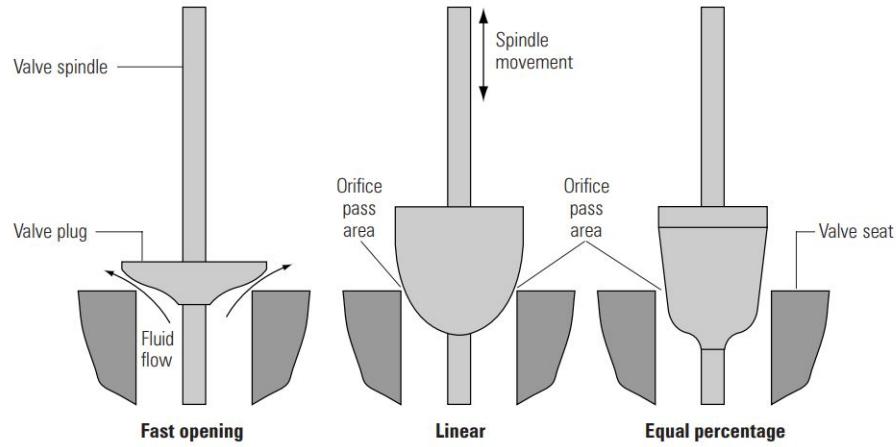
3.2.3 Característica de fluxo

Todas as válvulas de controle possuem uma característica de fluxo inerente que relaciona a abertura da válvula a sua vazão quando sob as mesmas condições de pressão. As características físicas do obturador e sede ocasionam diferentes forma de abertura das válvulas o que resulta em diferentes proporções entre abertura de válvula e variação de vazão. As válvulas do tipo globo, que foram adotadas para o desenvolvimento desse trabalho, possuem três tipos mais comumente utilizados que são o de abertura rápida, linear e porcentagem igual. Uma representação desses três tipos de configurações são mostrados na figura 34 e uma demonstração gráfica da relação entre a porcentagem da abertura da válvula com a porcentagem de vazão é mostrada na figura 35.

O modelo das válvulas globo escolhidos para esse trabalho foi o de característica linear. Nesse modelo a vazão é diretamente proporcional à elevação da sede (H) a um diferencial de pressão constante. Ou seja, uma abertura de 60% da válvula permite que 60% da vazão total desse modelo passe por ela. Uma representação gráfica é visto na figura 36.

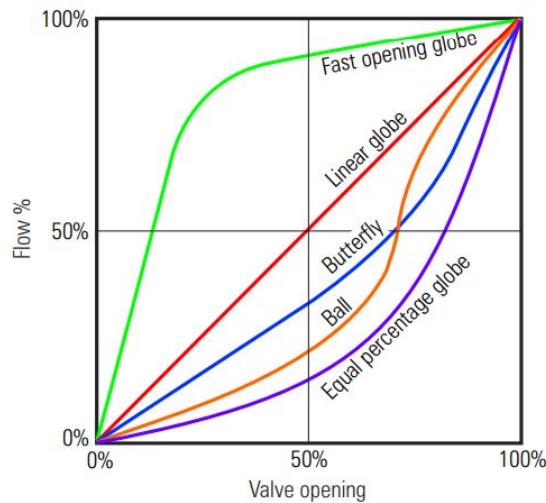
Dessa forma, as equações referentes as vazões de água de alimentação e vapor saturado podem ser reescritas conforme mostrado na equações 3.48 e 3.49.

Figura 34 – Tipos de obturador e sede válvula globo



Fonte: (SARCO, 2011).

Figura 35 – Características de fluxo inerentes por tipo de válvula

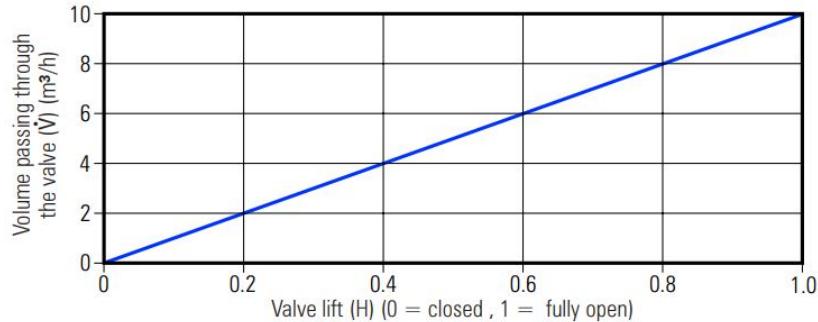


Fonte: (SARCO, 2011).

$$q_f = H_f \frac{K_{vsw} \sqrt{1000 \rho_w \Delta P}}{3600} \quad (3.48)$$

$$q_s = H_s \frac{12 K_{vss} P_1 \sqrt{1 - 5,67(0,42 - \chi)^2}}{3600} \quad (3.49)$$

Figura 36 – Relação elevação da sede com vazão



Fonte: (SARCO, 2011).

3.2.4 Atuadores das válvulas

Como discutido anteriormente, a sede da válvula se desloca para abertura e fechamento da válvula. O atuador é quem realiza o deslocamento da sede da válvula para uma posição dada pelo sinal de controle. Dentre os diferentes tipos de atuadores existentes, os mais comumente utilizados são os pneumáticos e elétricos (SARCO, 2011). Para o desenvolvimento desse trabalho os controladores elétricos foram escolhidos.

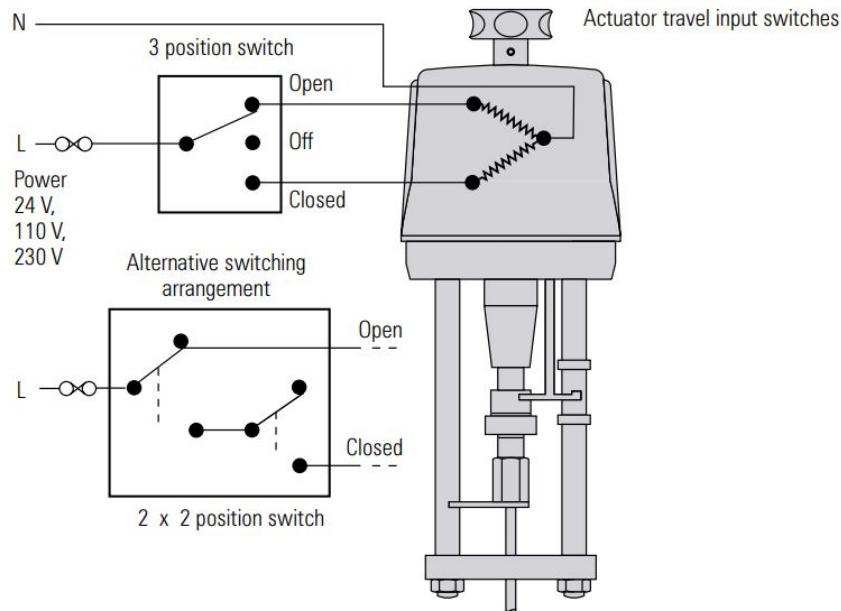
O atuador elétrico utiliza um motor elétrico para realizar o deslocamento da sede para a posição requerida pelo controle. Um dos tipos de atuador elétrico é o VMD (*Valve Motor Drive*) que possui três estados: abertura da válvula, fechamento da válvula e não realizar movimento. A figura 37 mostra a representação de um controlador VMD o qual é controlado por um interruptor (*switch*) de três posições.

O atuador também é equipado com um limitador para evitar danos por deslocamento além dos seus limites. Essa limitação pode ser definida por um torque máximo desenvolvido pelo motor ou uma limitação do posicionador. Nesse trabalho a limitação utilizada é da posição do atuador, limitando no limite inferior como zero, quando a válvula estiver completamente fechada, e o limite superior como um, quando a válvula estiver completamente aberta. Uma outra limitação do atuador é a velocidade do movimento da válvula que deve ser considerada de acordo com o processo. Uma realimentação da posição da válvula também é utilizada no atuador para comparar o valor enviado pelo controle com a posição da válvula a cada instante (SARCO, 2011).

3.3 Validação do modelo

Inicialmente é validado apenas o modelo da caldeira de tubulão desenvolvido por Astrom e Bell (2000) anteriormente relatado. Para isso, serão feitas simulações utilizando os mesmos valores por eles utilizados em seu artigo e as respostas do sistema comparadas.

Figura 37 – Atuador elétrico



Fonte: (SARCO, 2011).

Com o modelo da caldeira validado, é necessário validar também a modelagem das válvulas. Para isso, inicialmente é verificado o comportamento do nível de água da caldeira, mantendo a válvula de saída de vapor totalmente aberta enquanto a abertura da válvula de água de alimentação varia. Em seguida, é avaliado o comportamento da caldeira mantendo a válvula de alimentação de água completamente aberta enquanto varia a bertura da válvula de saída de vapor. Nas validações das válvulas de água de alimentação e saída de vapor saturado o sistema passa por uma variação de carga, ou seja, o calor fornecido para a caldeira sofre variação.

3.4 Controladores fuzzy

As válvulas de alimentação de água e de saída de vapor saturado serão controladas por controladores *Fuzzy*. O controlador da válvula de saída de vapor possui duas entradas, o *erro* do sinal de referência e *variação do erro*. A saída do controlador é a abertura da válvula de saída de vapor. O controle da válvula de alimentação de água é testado em duas configurações diferentes. A primeira é similar à da válvula de vapor, onde as entradas são o *erro* do sinal de referência e *variação do erro*. A saída do controlador é a abertura da válvula de alimentação de água. Para a segunda configuração, as entradas do controlador são o *erro* do sinal de controle e a *variação da saída de vapor*. A saída do controlador também é a abertura da válvula de alimentação de água.

Para todos os controladores desenvolvidos nesse trabalho, na entrada *erro* são usadas cinco funções de pertinência do tipo triangular. Para a entrada *variação do erro* ou *variação da saída de vapor* são usadas três funções de pertinência do tipo triangular. Tendo em vista que o controlador é do tipo Mamdani, para a saída *abertura da válvula* são usadas cinco funções de pertinência do tipo triangular.

3.5 Otimização por Algoritmo Genético (AG)

Para obtenção de um melhor resultado nos controles propostos nesse trabalho, é realizada a otimização das funções de pertinência das entradas, saídas e das regras dos controladores. O algoritmo genético é um processo cíclico que busca por meio da evolução dos resultados de cada iteração, aperfeiçoar os resultados do ciclo seguinte. Desse forma, alguns parâmetros iniciais precisam ser definidos para a inicialização do código conforme mostrado a seguir.

- Número de indivíduos: 20;
- Número de gerações: 150;
- Clonagem: 10%;
- Mutação: 3%.

3.5.1 Inicialização

Para inicialização do código *AG* é preciso gerar os vetores dos cromossomos de forma aleatória cobrindo todo o universo de discurso. Conforme definido, o código contém vinte indivíduos. Porém, decidiu-se utilizar um deles com os parâmetros do controlador pré-definidos de forma empírica e os demais dezenove são gerados de forma aleatória. Dessa forma, é gerado um vetor cromossomo para a variável de entrada 1 (*erro*), para a variável de entrada 2 (*variação do erro* ou *variação da saída de vapor*), para a variável de saída (*abertura da válvula*) e outro para as regras do controlador.

Após a definição dos vetores cromossomos, é inicializada a simulação. Para cada um dos indivíduos é realizada uma simulação. Assim, para cada um dos indivíduos será possível obter o custo (definido pela função *custos*) da simulação em função do erro e do sinal de controle.

Ao término das simulações dos 20 indivíduos, é gerado um vetor de custos onde contém o custo de cada indivíduo. Posteriormente, verifica-se aqueles indivíduos que possuem menor custo de simulação, ou seja, aqueles controladores que foram melhores. Como foi decidido usar 10% de clonagem, de vinte indivíduos, dois serão clonados para a

geração futura. Com isso, assegura-se que os melhores indivíduos nunca serão perdidos e que a tendência das gerações futuras é de ser melhor que a anterior.

3.5.2 Gerações

Para iniciar uma geração, utiliza-se o *método da roleta* onde aqueles indivíduos que possuem menores custos terão chances maiores de serem sorteados. Assim, serão sorteados dois indivíduos da geração anterior e os que tiverem menores custos serão provavelmente sorteados.

Os dois indivíduos sorteados são os chamados de *pais* e eles fazem o *crossing-over* (cruzamento) para geração de um filho da geração atual. Ou seja, dois pais são sorteados para cada indivíduo novo gerado, onde cada variável é um indivíduo (*erro*, *variação do erro* ou *variação da saída de vapor*, *abertura da válvula* e *regras*).

Para o *crossover* das variáveis *erro*, *variação do erro* ou *variação da saída de vapor*, *abertura da válvula*, é utilizado o método do *flat crossover* (ZHANG; ISHIKAWA, 2005). Para o cruzamento das regras aplicou-se o método tradicional, onde é sorteado uma posição dos cromossomos e a parte inicial (antes do ponto sorteado do cromossomo) do pai 1 é junto com a parte final (após o ponto sorteado do cromossomo) do pai 2, gerando assim um filho com o cromossomo *regras*.

O método de *crossover* é utilizado para obtenção de dezoito filhos (indivíduos), pois os outros dois serão clonados da geração anterior. Os indivíduos passam novamente pela simulação, onde será obtido um valor de custo para cada um deles onde os melhores serão clonados para geração futura e os com menores custos terão chances maiores de serem sorteados para serem os pais na geração seguinte.

3.5.3 Índices de avaliação de controladores (custos)

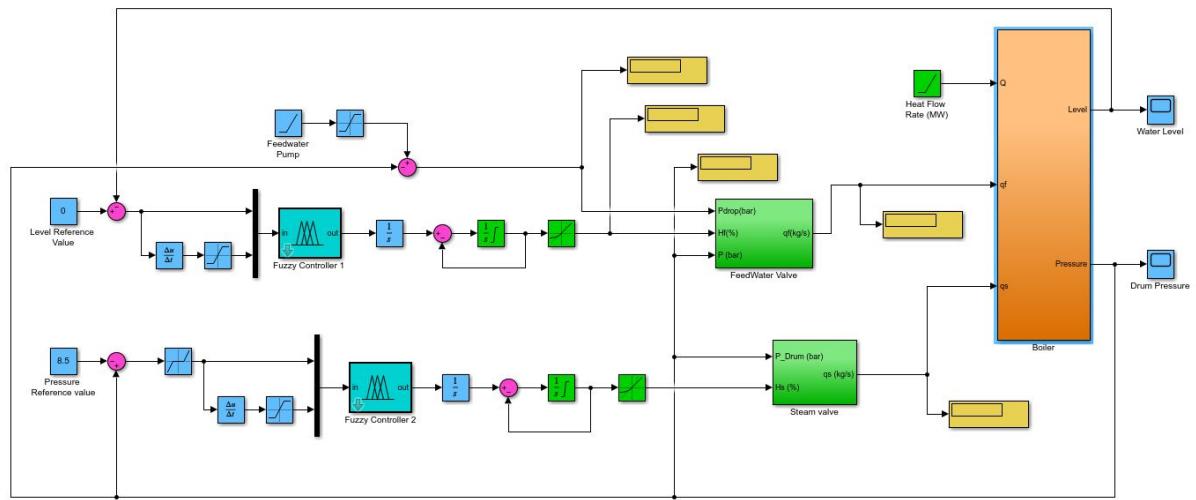
Para avaliação dos custos de cada indivíduo são utilizados os métodos do Índice Integral do Erro Absoluto (IAE), o Índice da Integral do Erro Absoluto Ponderado no Tempo (ITAE) e o Índice de *Goodhart*.

3.6 Implementação Simulink/Matlab

Para as simulações serão utilizados os *softwares* Matlab e Simulink. O modelo da caldeira é desenvolvido no simulink e por meio do bloco *S – Function* se conecta ao *workspace* do Matlab para realizar os cálculos das equações em espaço de estados. As válvulas e atuadores são desenvolvidos utilizando blocos disponíveis no Simulink conectados ao Matlab para solução das equações desenvolvidas no tópico de modelagem das válvulas. Para os controladores *Fuzzy*, é utilizado o bloco *Fuzzy Logic Controller* disponível no

Simulink e sua parametrização realizada no Matlab. Uma representação da simulação no Simulink com o modelo da caldeira, válvulas, atuadores e controladores é mostrado na figura 38.

Figura 38 – Implementação Simulink/Matlab



Fonte: Autor (2022).

4 Considerações parciais

Diante do que foi abordado até o momento, é notória a importância de estudos voltados para a área de processos industriais, mais especificamente, ao processo de geração de vapor. Presente em basicamente todo o tipo de indústria, as caldeiras desempenham papel significativo em seus processos. Por meio da realização de um controle robusto, é possível obter uma maior confiabilidade na operação dessas máquinas nos quesitos de aumentar a segurança operacional e a confiabilidade na redução do número de paradas inesperadas. Nas indústrias na atualidade, é comum utilizar os controladores do tipo PID para o controle das válvulas de alimentação de água e o controle da vazão de vapor, majoritariamente pela sua facilidade de aplicação. Porém, apesar da facilidade de uso, a sintonia desse tipo de controle depende diretamente da carga operacional da caldeira. Dessa forma, para um bom desempenho no controle das caldeiras ao utilizar controladores do tipo PID, ela deve operar em uma faixa de carga restrita a qual foi feita a sintonia dos seus controladores. Destarte, esse trabalho almeja utilizar controladores do tipo *fuzzy* aplicados no controle do nível de água e vazão de saída de vapor de uma caldeira e, ao mesmo tempo, avaliar a resposta do sistema perante uma variação de carga sem realizar diferentes sintonizações dos controladores. Ou seja, deseja-se realizar um controle que possibilite a caldeira trabalhar em diferentes tipos de demanda de carga com uma resposta rápida e precisa, evitando que ocorra problemas de nível de água baixo ou alto, evitando assim danos ao processo ou comprometendo a segurança operacional. Para a obtenção de um resultado robusto, faz-se uso da otimização dos controladores por meio de algoritmo genético. Por meio do uso do algoritmo genético é esperado que o controle apresente um bom resultado nas respostas das variações de carga com uma resposta rápida para atingir o *set – point*, sem *overshoot* e sem excessos no sinal de controle. Com os resultados obtidos até o momento, foi possível validar o modelo dinâmico da caldeira utilizado nesse trabalho por meio da avaliação do sinal de saída quando os sinais de entrada sofreram variações. As respostas do sistema para os diferentes testes realizados se demonstraram satisfatórias ao atingir a estabilidade após um determinado período de tempo após a variação do sinal de entrada. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados dos autores Astrom e Bell (2000) e os mesmos foram concordantes. Dessa forma, é esperado com o desenvolvimento do restante do trabalho a modelagem e sintonia dos controladores *fuzzy* aplicados ao modelo dinâmico da caldeira e otimizados por meio do algoritmo genético. Com isso, é desejado obter resultados satisfatórios para o controle da caldeira em diferentes níveis de carga.

5 Cronograma

- a) Leitura e elaboração de resenhas de artigos relacionados à área de controle de caldeiras.
- b) Pesquisa sobre modelos dinâmicos de caldeiras.
- c) Desenvolvimento de um modelo dinâmico de uma caldeira para controle.
- d) Validação do modelo desenvolvido.
- e) Pesquisa e elaboração de texto referente ao histórico do uso do vapor.
- f) Pesquisa e elaboração de texto referente ao referencial teórico utilizado no trabalho.
- g) Elaboração da metodologia a ser apresentada para qualificação.
- h) Qualificação do mestrado.
- i) Desenvolvimento do modelo de simulação completo.
- j) Implementação dos controladores *Fuzzy*.
- k) Realização de testes empíricos para os valores das funções de pertinência.
- l) Desenvolver código do algoritmo genético para otimização dos controladores.
- m) Otimizar os parâmetros dos controladores.
- n) Análise dos resultados obtidos.
- o) Defesa da dissertação.

Quadro 1 – Cronograma para o desenvolvimento da dissertação.

	2022						2022				2023		
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar
a)													
b)													
c)													
d)													
e)													
f)													
g)													
h)													
i)													
j)													
k)													
l)													
n)													
o)													

Fonte: Autor.

Referências

- ACADEMY, E. *Usando algoritmos genéticos em redes neurais*. Acesso em: 22/05/2022. Disponível em: <<https://iaexpert.academy/2020/08/09/usando-algoritmos-geneticos-em-redes-neurais/>>. Citado na página 44.
- ANDRADE, M.; JACQUES, M. A. P. Estudo comparativo de controladores de mamdani e sugeno para controle do tráfego de interseções isoladas. *Transportes*, v. 16, n. 2, p. 24–31, 12 2008. An optional note. Citado na página 43.
- ASTROM, K. J.; BELL, R. D. Drum-boiler dynamics. *Automatica*, p. 363–378, 2000. Citado 12 vezes nas páginas 20, 21, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58 e 59.
- BABCOCK, G. I. Controlling boiler swell and shrink. *Publicação própria*, p. 1–5, 5 2007. Citado na página 14.
- BBC. *James Watt (1736 - 1819)*. 2014. Disponível em: <https://www.bbc.co.uk/history/historic_figures/watt_james>. Citado na página 11.
- BBC. *Thomas Newcomen (1663 - 1729)*. 2020. Disponível em: <https://www.bbc.co.uk/history/historic_figures/newcomen_thomas.shtml>. Citado na página 11.
- BEGA, E. A. *Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras*. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciênciac, 2003. Citado 5 vezes nas páginas 24, 25, 26, 27 e 28.
- BELLIS, M. *The History of Steam Engines*. 2020. Disponível em: <<https://www.thoughtco.com/history-of-steam-engines-4072565>>. Citado na página 10.
- BORZELLIERI, R. A. *PERFORMANCE EVALUATION OF CONTROL METHODS ON THE WATER SIDE OF DRUM BOILERS*. Dissertação (Mestrado) — Temple University, 2019. Citado na página 21.
- BRASIL. *Portaria N° 1.082, de 18 de dezembro de 2018. NR-13 Caldeiras, Vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento*. 2018. Disponível em: <https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NRNR-13.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- BRITANNICA. *AEOLIPILE*. 2020. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/aeolipile>>. Citado na página 9.
- BRITANNICA. *Denis Papin: British physicist*. 2020. Disponível em: <<https://www.britannica.com/biography/Denis-Papin>>. Citado na página 10.
- BRITANNICA. *Heron of Alexandria: Greek mathematician*. 2020. Disponível em: <<https://www.britannica.com/biography/Heron-of-Alexandria>>. Citado na página 9.
- BRITANNICA. *Pressure cooker*. 2020. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/pressure-cooker>>. Citado na página 10.
- CAVALCANTE, M. S. F. F. *Otimização de controladores Fuzzy tipo-2 intervalares utilizando meta-heurísticas*. Dissertação (Mestrado) — UFRN, Natal - RN, 6 2017. Citado na página 47.

- DINAKARAN, C. Temperature and water level control in boiler by using fuzzy logic controller. *International Journal of Electrical Power System and Technology*, v. 1, n. 1, p. 27–37, 2015. Citado na página 19.
- ELGUINDY, A. *Drum-boiler control performance optimization using an observer-based state-feedback controller within MATLAB/Simulink environment*. Dissertação (Mestrado) — Institut für Automatisierungstechnik (IAT), 2013. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- ENGENHARIA, R. *História do vapor*. 2016. Disponível em: <<http://www.rmvapor.com.br/site/paginas/historia/>>. Citado na página 9.
- FAHMILIA et al. The new method to determine the value of speed droop for subcritical coal fire power plant in order to contribute to primary frequency control of power system. *Procedia Engineering*, n. 170, p. 496–502, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- FOLGER, T. *Steam Power: Still Moving Us, Even in the 21st Century*. 2019. Disponível em: <<https://www.discovermagazine.com/the-sciences/steam-power-still-moving-us-even-in-the-21st-century>>. Citado na página 13.
- FRAZAO, D. *James Watt*. 2021. Disponível em: <<https://www.ebiografia.com/jameswatt/>>. Citado na página 11.
- GEEKSFORGEEKS. *Fuzzy Logic Introduction*. Disponível em: <<https://www.geeksforgeeks.org/fuzzy-logic-introduction/>>. Citado na página 30.
- HISTORY. *Richard Trevithick introduces his “Puffing Devil”*. 2009. Disponível em: <<https://www.history.com/this-day-in-history/richard-trevithick-introduces-his-puffing-devil>>. Citado na página 12.
- HOLMGREN, M. X *Steam, Thermodynamic properties of water and steam*. 2022. [Https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9817-x-steam-thermodynamic-properties-of-water-and-steam](https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9817-x-steam-thermodynamic-properties-of-water-and-steam). MATLAB Central File Exchange. Citado na página 59.
- JARKOVSKY, J. et al. A steam generator dynamic mathematical modelling and its using for adaptive control systems testing. In *Preprints IFAC symposium on power systems modelling and control applications*, 1988. Citado na página 16.
- KIM, H.; CHOI, S. A model on water level dynamics in natural circulation drum-type boilers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, p. 786–796, 2005. Citado na página 21.
- KWATNY, H. G.; BERG, J. Drum level regulation at all loads. In *Preprints IFAC 12th world congress*, v. 3, p. 405–408, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- LIU, X.; KONG, X. Nonlinear fuzzy model predictive iterative learning control for drum-type boiler–turbine system. *Journal of Process Control*, p. 1023–1040, 6 2013. Citado na página 19.
- MANDANI, E. H. Application of fuzzy algorithms for the control of a dynamic plant. *Proc. IEE*, n. 121, p. 1585–1588, 12 1974. Citado na página 19.

- MBX. *Caldeiras industriais: Conheça seus principais tipos*. 2021. Disponível em: <<https://blog.mbxmaquinas.com.br/caldeiras-industriais-principais-tipos/>>. Citado na página 14.
- MCDONALD, J. P.; KWATNY, H. G. A mathematical model for reheat boiler-turbine-generator systems. In *Proceedings of IEEE*, n. 70, 1970. PES winter power meeting. Citado na página 16.
- MELLO, F. M. *CONTROLE NEBULOSO (“FUZZY”) APLICADO À COMBUSTÃO EM CALDEIRAS A BAGAÇO DE CANA*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018. Orientador: PROF. DR. RUY DE SOUSA JÚNIOR. Citado na página 20.
- MENEGHETTI, F. U. A. Controle inteligente. *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*, 2004. Apostila. Citado na página 29.
- NA, M. G. Design of a stem generator water level controller via the estimation of the flow errors. *Annals of Nuclear Science and Engineering*, n. 22, p. 367–376, 1995. Citado na página 19.
- NA, M. G.; NO, H. C. Design of an adaptive observer-based controller for the water level of steam generators. *Nuclear Engineering and Design*, n. 135, p. 379–394, 1992. Citado na página 17.
- NICHOLSON, H. Dynamic optimisation of a boiler. *Proceedings of IEE*, n. 111, p. 1479–1499, 1964. Citado na página 15.
- OSMAN, N. M. *To investigate the model and control for the boiler- and steam-heated coil systems*. Dissertação (Mestrado) — Murdoch University, 2018. Citado na página 21.
- PARRY et al. Recent progress in sg level control in french pwr plants. in proceedings of international conference on boiler dynamics and control in nuclear powerstations. *British Nuclear Energy Society*, p. 81–88, 1995. Citado na página 15.
- PELUSI, D. et al. Control of drum boiler dynamics via an optimized fuzzy controller. *International Journal of Simulation Systems, Science and Technology*, v. 17, n. 33, 2016. Citado na página 20.
- PUCSP. *O conceito "Fuzzy"*. 2004. Disponível em: <<https://www.pucsp.br/~logica/Fuzzy.htm>>. Citado na página 29.
- RICCI, T. *Richard Trevithick*. 2012. Disponível em: <<https://www.asme.org/topics-resources/content/richard-trevithick>>. Citado na página 12.
- SAMSON. *Application Notes for Valve Sizing*. [S.l.], 2012. Citado na página 22.
- SARCO, S. *The Steam and Condensate Loop Book*. [S.l.]: Spirax Sarco, 2011. ISBN 978-0-9550691-5-4. Citado 6 vezes nas páginas 62, 63, 64, 65, 66 e 67.
- SARCO, S. *Water level in steam boilers*. 2020. Disponível em: <<https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/the-boiler-house/water-levels-in-steam-boilers>>. Citado na página 14.

- SCIENTIA73. *Why Heron's Aeolipile Is One of History's Greatest Forgotten Machines.* 2020. Disponível em: <<https://www.scientia73.com/why-herons-aeolipile-is-one-of-historys-greatest-forgotten-machines/>>. Citado na página 9.
- SIMOES, M. G.; SHAW, I. S. *Controle e modelagem Fuzzy.* 2. ed. [S.l.]: Blucher, 1999. Citado 18 vezes nas páginas 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42 e 43.
- SONAWANE, R. R.; MEDEWAR, P. G.; MUNJE, R. K. Fuzzy logic based boiler drum level control with gui. *Proceedings of INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMMUNICATION AND ENERGY SYSTEMS*, 1 2016. Citado na página 20.
- THOMPSON, F. T. *A dynamic model for control of a drum type boiler system.* Tese (Doutorado) — University of Pittsburg, 1964. Citado na página 16.
- TLV. *Principais Aplicações para Vapor.* 2022. Disponível em: <<https://www.tlv.com/global/BR/steam-theory/principal-applications-for-steam.html>>. Citado na página 13.
- TOGAWA. *Uso do vapor na indústria.* 2018. Disponível em: <<https://togawaengenharia.com.br/uso-do-vapor-na-industria/>>. Citado na página 13.
- UNICAMP. *Watt, James (1736-1819).* 1996. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/person/watt.htm>>. Citado na página 11.
- WIHELM, V. Tópicos especiais de pesquisa operacional i. *Universidade Federal do Paraná.* Notas de aula. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- ZADEH, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *ibid*, p. 28–44, 1973. SMC-3. Citado na página 19.
- ZHANG, H.; ISHIKAWA, M. Performance improvement of hybrid real-coded genetic algorithm with local search and its applications. *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, p. 1171–1176, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 69.