

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE
FUZZY PARA INCUBADORA DE OVOS**

CARLOS EDUARDO BITES ROMANINI

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2009

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE
FUZZY PARA INCUBADORA DE OVOS**

Dissertação submetida à banca examinadora
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Agrícola na área de concentração de
Máquinas Agrícolas.

CARLOS EDUARDO BITES ROMANINI
Orientador: Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

R661d Romanini, Carlos Eduardo Bites
Desenvolvimento de um sistema de controle Fuzzy
para incubadora de ovos / Carlos Eduardo Bites
Romanini. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Nelson Luis Cappelli.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Ovo - Eclodibilidade. 2. Indústria avícola. 3.
Embrião de ave. 4. Simulação por computador. 5.
Dinâmica - Modelos matemáticos. I. Cappelli, Nelson
Luis. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade
de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Development of a fuzzy control system for chicken egg setter

Palavras-chave em Inglês: Egg - Hatchability, Poultry industry, Avian embryo,
Computer simulation, Dynamic - Mathematical
model

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

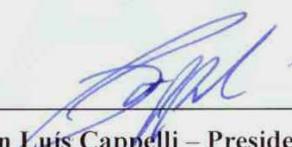
Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Flávio Vasconcellos da Silva, Irenilza de Alencar Nääs

Data da defesa: 27/02/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

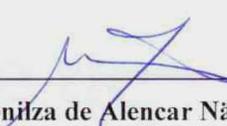
Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Carlos Eduardo Bites Romanini**, aprovada pela Comissão Julgadora em 27 de fevereiro de 2009, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



**Prof. Dr. Nelson Luís Cappelli – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp**



**Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva – Membro Titular
FEQ/Unicamp**



**Prof.^{da} Dr.^a Irenilza de Alencar Nääs - Membro Titular
Feagri/Unicamp**

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado primeiramente a Deus, que acompanhou toda a minha trajetória, sempre iluminando meu caminho e, assim, possibilitando a realização de todas as minhas conquistas.

Dedico também, aos meus pais Antônio Carlos Romanini e Zildete Bites Romanini, como uma forma de agradecimento pela criação e educação que me deram, com muita dignidade, visando à boa formação do meu caráter, sem medir esforços.

À minha grandiosa e querida família, representados em sua totalidade pelas minhas irmãs Ana Carla e Ana Claudia, todos os tios, primos, padrinhos e demais “parentes”, aos meus amigos de coração, dedico com imenso carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, de forma geral, a todos que diretamente ou indiretamente participaram e ajudaram na produção desta dissertação, de importância fundamental para minha formação pessoal e profissional.

À minha família que sempre apoiou meu estudo, também pela compreensão nos momentos em que estive ausente.

Ao meu orientador Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli, pela oportunidade, confiança e atenção. Ao Prof. Dr. Claudio Umezu pelos ensinamentos e amizade. Aos Professores que compuseram à banca examinadora de meu exame de qualificação e de defesa da dissertação, pelas críticas sempre construtivas e valiosas contribuições Lique, Flavio, Irenilza, Bárbara e Isabel.

Agradeço especialmente a Prof. Irenilza, por quem tenho grande respeito e admiração, pelos ensinamentos, convivência e amizade. Aos colegas da Pós-graduação da Feagri, funcionários, docentes e discentes, em nome da Prof. Daniella, pela ajuda e atenção durante todo período do Mestrado.

Aos meus colegas do Laboratório de Instrumentação e Controle, que contribuíram de forma grandiosa para o desenvolvimento deste trabalho: Angel, Leonardo, Edson. A todos meus colegas do laboratório de Ambiência pela amizade sincera.

À minha namorada Marcinha, pela dedicação, compreensão, amor e paciência nas etapas mais complicadas deste período;

À CASP (em nome do Virgini, Baú e Bueno) e Perdígão (em nome do Felipe Kroetz e Fabrício), pessoas e empresas que acreditaram na minha proposta e mobilizaram esforços para realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Justificativa e Relevância do Estudo	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo geral	3
1.3.2 Objetivos específicos	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Panorama Geral do Mercado Avícola	5
2.2 Incubação de Ovos	6
2.2.1 Conceitos gerais sobre a incubação	6
2.2.2 Princípios da fisiologia embrionária	7
2.2.3 Energia térmica na incubação	9
2.2.4 Trocas mássicas no processo de incubação	11
2.2.5 Bio-respostas embrionárias	13

2.3 Automação e Controle de Processos	17
2.3.1 Sistemas de controle de bioprocessos	17
2.3.2 Teoria dos conjuntos fuzzy	18
2.3.3 Controladores fuzzy	19
2.3.4 Estrutura de controle fuzzy	21
2.3.5 Identificação, projeto e sintonia de controladores fuzzy	25
2.3.6 Aplicações dos sistemas de controle fuzzy	29
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 Etapa I – Estudo Prático Experimental da Incubadora	31
3.1.1 Objetivo e justificativa	32
3.1.2 Características da incubadora	33
3.1.3 Detalhamento dos ensaios experimentais	36
3.1.4 Identificação da dinâmica e modelagem	40
3.2 Etapa II – Estudo Teórico do Sistema	42
3.2.1 Objetivo e justificativa	42
3.2.2 Arquitetura e elementos da simulação	43
3.2.3 Validação computacional do sistema de controle	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1 Comportamento Dinâmico Climático na Incubadora	54
4.2 Modelos Matemáticos Simplificados da Incubadora	64

4.3 Sistemas de Inferência fuzzy	66
4.3.1 Configuração de set point da incubadora	66
4.3.2 Controle climático da incubadora	69
4.4 Simulação Computacional da Incubadora	73
4.4.1 Modelo de simulação	74
4.4.2 Resultados da simulação	77
5. CONCLUSÃO	86
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de desenvolvimento embrionário e padrões de temperatura do embrião ao longo do período de incubação (Adaptado de BOERJAN, 2006).	8
Figura 2. Estrutura de um controlador fuzzy e suas partes constituintes	23
Figura 3. Parte interna da incubadora utilizada durante o estudo prático experimental.	33
Figura 4. Carrinhos utilizados no interior da incubadora.	36
Figura 5. Detalhe da bandeja de ovos utilizada nos carrinhos da incubadora.	36
Figura 6. Metodologia para identificar a dinâmica do sistema, mediante excitações das variáveis de entrada (elementos atuadores) e reações temporais das variáveis de saída (TBS e TBU).	41
Figura 7. Principais elementos e características da simulação computacional do estudo	44
Figura 8. Diagrama de blocos característico da incubadora como sistema multivariável	46
Figura 9. Produção de calor metabólico e perda de calor por evaporação de um ovo durante a incubação. (Adaptado de French, 1997).	47
Figura 10. Temperatura de ovos de perus incubados a 37,5 °C (Adaptado de French (1997)).	48
Figura 11. Aplicação da conservação de energia para o volume de controle de um ovo, em um determinado instante de tempo.	49
Figura 12. Estrutura geral do controlador fuzzy PI utilizado.	52
Figura 13. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da temperatura de bulbo seco para uma excitação na atuação da resistência de aquecimento.	55
Figura 14. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da umidade relativa do ar para uma excitação na atuação da resistência de aquecimento.	55
Figura 15. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da temperatura de bulbo seco para uma excitação na atuação da serpentina de resfriamento.	56
Figura 16. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da umidade relativa do ar para uma excitação na atuação da serpentina de resfriamento.	57
Figura 17. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da temperatura de bulbo seco para uma excitação na atuação do bico aspersor de umidificação.	58
Figura 18. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da umidade relativa do ar para uma excitação na atuação do bico aspersor de umidificação.	58
Figura 19. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da temperatura de bulbo seco para uma excitação na atuação do desumidificador.	59
Figura 20. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da umidade relativa do ar para uma excitação na atuação do desumidificador.	59
Figura 21. Curva de resposta experimental da temperatura de bulbo seco para uma excitação na atuação do soprador.	60

Figura 22. Curva de resposta experimental da umidade relativa do ar para uma excitação na atuação do soprador. _____	61
Figura 23. Curva de resposta experimental da temperatura de bulbo seco para uma excitação na atuação de fechamento do damper. _____	62
Figura 24. Curva de resposta experimental da umidade relativa do ar para uma excitação na atuação de fechamento do damper. _____	62
Figura 25. Estrutura do sistema fuzzy utilizado para gerar o valor de referência da temperatura do ambiente na incubadora. _____	67
Figura 26. Configuração das funções de pertinência das variáveis de entrada do sistema fuzzy _____	67
Figura 27. Configuração final das funções de pertinência da variável de saída do sistema fuzzy _____	68
Figura 28. Superfície de resposta do sistema de inferência fuzzy desenvolvido _____	69
Figura 29. Estrutura do sistema fuzzy utilizado para controle climático na incubadora _____	70
Figura 30. Configuração das funções de pertinência das variáveis de entrada do sistema fuzzy para controle climático na incubadora _____	71
Figura 31. Funções de pertinência das variáveis de saída do sistema de controle fuzzy _____	71
Figura 32. Exemplos de superfícies de resposta do sistema de inferência fuzzy; a) atuação na temperatura e b) atuação na umidade relativa do ar, em função de seus respectivos erros. ____	73
Figura 33. Vista da tela principal do programa computacional desenvolvido para simular o processo de incubação dos ovos na incubadora estudada. _____	74
Figura 34. Representação simplificada da estrutura de controle e automação do processo de incubação com os fluxos de informações e elementos de controle. _____	76
Figura 35. Vista do subsistema relativo ao controlador fuzzy do modelo computacional. ____	76
Figura 36. Comportamento da temperatura de casco dos ovos (T _{ovo}) e temperatura do ambiente na incubadora (T _{inc}), quando da transferência dos ovos para início da incubação. _	77
Figura 37. Simulação aproximada do comportamento da produção de calor embrionário na incubadora _____	78
Figura 38. Resultados finais obtidos na simulação para as variáveis de interesse no estudo __	79
Figura 39. Resultado gráfico do desempenho da temperatura do ovo, como principal variável controlada durante o estudo _____	80
Figura 40. Detalhamento dos resultados em torno do valor de interesse (região do set point da temperatura do ovo) _____	81
Figura 41. Sinal de intensidade de atuação para os sistemas de aquecimento e resfriamento do ambiente da incubadora durante o período de incubação. _____	82
Figura 42. Resultados obtidos por meio da simulação da perda de massa dos ovos influenciada pela umidade relativa do ar. _____	83

Figura 43. Demanda de potência de atuação para as linhas de aquecimento e resfriamento da incubadora. _____ 84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regras de analogia entre controle fuzzy e controladores convencionais _____	24
Tabela 2. Dimensões de incubadora modelo Ug 62 HT que foi utilizada no estudo (Fonte: Casp). _____	34
Tabela 3. Especificações técnicas da incubadora estudada (Fonte: Casp) _____	35
Tabela 4. Dados técnicos da incubadora relativos aos sistemas de umidificação e refrigeração do ar (Fonte: Casp). _____	35
Tabela 5. Roteiro de ensaios para identificação da dinâmica da incubadora _____	37
Tabela 6. Valores adotados para cálculos dos principais parâmetros da interação entre ovo e ambiente da incubadora _____	50
Tabela 7. Valores dos parâmetros de identificação dos sistemas, obtidos experimentalmente, de acordo com o caso estudado (Figura 6). _____	64
Tabela 8. Base de regras do sistema fuzzy. _____	69
Tabela 9. Base de regras composta pela incorporação dos conhecimentos especialistas e de experimentação. _____	72

RESUMO

Dentro do complexo econômico de produção de carnes, a avicultura se constitui na atividade mais dinâmica e o Brasil possui uma das mais desenvolvidas aviculturas comerciais do mundo. Diante das atuais exigências na qualidade e segurança do produto, a moderna indústria avícola brasileira tem progredido, essencialmente pela adoção crescente de novas tecnologias. Na cadeia toda, a incubação dos ovos representa a origem do processo, pois é responsável por transformar biologicamente ovos férteis em pintos de um dia de idade. Em escala industrial, utilizam-se máquinas incubadoras para reproduzir as condições naturais de incubação das aves, objetivando elevar, ao máximo, o índice de eclosão e a qualidade de nascimento dos pintos. Porém, o desenvolvimento embrionário no interior dos ovos é substancialmente afetado pelas condições ambientais da incubadora. Os embriões não são aptos para controlar as trocas térmicas e mássicas durante a incubação; assim, as principais variáveis ambientais que exercem influência no processo, como temperatura e umidade relativa do ar, necessitam ser criteriosamente ajustadas, pois manter as condições adequadas ao redor dos ovos é um ponto crítico de controle do processo. Conhecimentos das áreas de automação e controle são capazes de influenciar positivamente o rendimento na incubação, portanto, o sistema de controle deve garantir a estabilidade operacional para as condições do processo e suas variáveis, dentro de limites desejados. O controle *fuzzy* é o mais adequado, para processos que apresentam não-linearidades e comportamento transiente, uma vez que descrevem numa rotina, a experiência humana para controlar o processo. Diante desse contexto, propôs-se, no presente estudo, desenvolver uma arquitetura de automação composta por um sistema de controle *fuzzy*, para proporcionar um controle mais preciso das variáveis de interesse na incubação. O estudo foi desenvolvido em duas etapas, sendo: 1) ensaio experimental de identificação dinâmica e modelagem matemática de uma incubadora de estágio único; e 2) simulação do processo de incubação dos ovos. Foi desenvolvido um modelo computacional da incubadora composto pela representação matemática da incubadora, pelas interações de transferência de calor e massa entre os ovos e o ambiente e, pelo sistema de inferência *fuzzy* utilizado para controlar o processo de incubação. A simulação proporcionou a execução de diversos cenários operacionais da incubadora, possibilitando o ajuste adequado para o sistema de controle proposto. Obteve-se, como principal resultado o comportamento ao longo do tempo das seguintes variáveis: temperatura dos ovos e do ambiente, massa dos ovos, umidade relativa

do ar, produção de calor embrionária, detalhes da interação entre ovo e ambiente e as condições de atuação da incubadora estudada. Os resultados obtidos foram comparados aos valores de referência da literatura, indicando diferenças mínimas entre a temperatura dos ovos e o seu valor de referência. Os resultados relativos à massa de ovos tiveram desempenho abaixo do esperado e, para tal, o sistema de controle precisa receber ajustes. De maneira geral, foram obtidos conhecimentos técnicos mais apurados da incubação, que podem ser úteis para implementação real do sistema de controle desenvolvido.

Palavras Chave: Ovo – Eclodibilidade; Indústria avícola; Embrião de ave; Simulação por computador; Dinâmica - Modelos matemáticos.

ABSTRACT

Within the meat production economical complex broiler production is the most dynamic activity, and Brazil has one of the world most developed commercial broiler production. Facing today's needs in terms of quality and safety of the product, modern Brazilian poultry production has improved essentially by the increasing adoption of new technologies. In the whole chain eggs incubation represents the origin of the process; as it is responsible of transforming biologically fertile eggs into one day old chicks. In the industrial scale incubator machines are used to reproduce natural bird's incubation conditions with the objective of increasing at its maximum the hatching index as well birth quality of the broilers. However, the embryonic development inside the eggs is substantially affected by the environmental conditions within the incubator. Embryos are not apt to control heat or mass exchanges during incubation; then, the main ambient variables which influence the process such as air temperature and relative humidity need to be adjusted with criterion, as maintaining the adequate conditions around the eggs is a critical control point of the process. Knowledge on the automation and control areas is able to positively influence incubator efficiency; then, the control system must warrant operational stability for the process conditions as well as its variables, within certain wanted limits. *fuzzy* control is the most adequate use for the processes which present non-linearity and transient behavior, since it describes in a routine the human experience for controlling the process. In this context it was proposed in the present study to develop an automation architecture composed by a *fuzzy* control system in order to provide more precise control of the variables that are of interest on incubation. The study was developed in two stages, being 1) and experimental trial of dynamic identification and mathematical modeling of an incubator of single stage; and 2) process simulation of eggs incubation. It was developed a computer model of the incubator built from the mathematical representation of the incubator, the interaction of the heat and mass transfer between the eggs and the environment, and by the *fuzzy* inference system used for controlling the incubation process. Simulation led to built up various incubators operational scenarios providing the adequate adjustment for the proposed control. It was found as main result the behavior of the following variables along the time: eggs' and ambient temperatures, eggs mass, air relative humidity, embryonic heat production, details of the eggs and ambient, and the studied incubators performing conditions. The obtained results related to eggs mass were below the

expected, and for that the control system needs to be adjusted. Generally technical knowledge regarding incubation were achieved, and they may be useful for implementing a a real control system.

Keywords: Egg – Hatchability; Poultry industry; Avian embryo; Computer simulation, Dynamic - Mathematical model;

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O desenvolvimento da avicultura no Brasil ocorreu na região Sudeste a partir do final da década de 50, principalmente no Estado de São Paulo. Na década de 70 houve uma reorganização do complexo de carnes no Brasil e a atividade avícola se deslocou para a região Sul do país. Nos últimos anos, iniciou-se um movimento migratório do complexo agroindustrial avícola para os Estados do Centro-Oeste brasileiro, em função da acelerada expansão da produção de grãos nessas regiões.

O Brasil possui atualmente uma das mais desenvolvidas aviculturas comerciais do mundo. Diante do mercado globalizado e das exigências crescentes nos aspectos de qualidade e segurança do produto, a moderna indústria avícola brasileira tem progredido essencialmente pelos altos níveis tecnológicos e por sua competitividade.

O país dispõe de condições de produção diferenciadas das demais nações, além de um padrão de qualidade mundialmente destacado pelos programas de biossegurança e pelo rótulo de um país livre da Influenza Aviária. Por este motivo está se transformando em um dos grandes abastecedores mundiais de material genético avícola de avós, matrizes e frangos comerciais, sendo estimulado e favorecido principalmente pela ocorrência de problemas sanitários nos demais continentes.

A avicultura nacional possui capacidade de conter o êxodo rural, pois estimula a pequena propriedade e permite melhor distribuição de renda e incentivo aos produtores, seja na atividade comercial, ou na familiar, por meio dos sistemas de integração. O setor avícola possui importante papel social, pois contabiliza aproximadamente quatro milhões de empregos diretos.

No entanto, assim como demais setores da atividade agrícola e industrial brasileira, a avicultura carece de melhorias nas condições de transporte e construção de portos modernos, compatíveis com a qualidade dos produtos de exportação. Maiores investimentos em pesquisa e desenvolvimento são necessários, particularmente no fomento à geração de novas tecnologias, equipamentos e técnicas de gestão.

1.2 Justificativa e Relevância do Estudo

A incubação de ovos é a origem da cadeia de produção da avicultura, e por esse motivo, seus resultados afetam a rentabilidade de todo o segmento. Assim, o seu estudo e aprimoramento são imprescindíveis para a continuidade do desenvolvimento setorial.

Os incubatórios atuais almejam maximizar a eclodibilidade de ovos e aperfeiçoar o sincronismo de nascimento dos pintinhos, entretanto, ambos os fatores são consideravelmente afetados pelo micro-ambiente físico ao redor dos ovos. O índice de eclosão nas incubadoras comerciais existentes encontra-se próximo de 90%, sendo abaixo das expectativas, e por esse motivo deve ser maximizado. Diferenças no tempo de nascimento dos pintainhos de um mesmo lote afetam a qualidade do plantel e prejudicam o desempenho das aves no período pós-eclosão.

As fontes de energia, água e os nutrientes utilizados no desenvolvimento embrionário durante a incubação estão presentes no interior dos ovos no instante que são produzidos. Todavia, os ovos necessitam de aquecimento e movimentos periódicos de rotação para evitar a aderência do embrião à membrana interna da casca, além de favorecer o transporte de taxas adequadas de oxigênio do ar, vapor d'água, dióxido de carbono e calor.

Os embriões das aves não são aptos para controlar diretamente as trocas térmicas e mássicas durante o processo de incubação. Desta forma, as variáveis do micro-ambiente que influenciam a permeabilidade das cascas dos ovos, necessitam ser criteriosamente ajustadas em relação às demandas metabólicas embrionárias. As incubadoras devem propiciar o controle preciso da temperatura, umidade relativa do ar, fluxo de O₂, CO₂ e frequência de giro das bandejas de ovos.

Com a tendência atual do aumento da capacidade das incubadoras, fica mais difícil o controle preciso das variáveis do micro-ambiente ao redor dos ovos. Conseqüentemente, torna-se mais complicado manter a uniformidade no volume da incubadora, durante todo o período de incubação, prejudicando a produção.

Portanto, para se obter melhorias na eclodibilidade e sincronismo de nascimento dos pintainhos é preciso contribuir com o bom desenvolvimento embrionário. Os gradientes de

temperatura no volume da incubadora devem ser reduzidos, e a qualidade e distribuição do fluxo de ar, melhorados, pois somente pequenas variações das condições ideais de incubação são admitidas.

Uma arquitetura de automação composta por um sistema de controle *fuzzy*, fundamentado pela experiência de especialistas no domínio de aplicação, e associado a dispositivos capazes de mensurar aspectos diretamente relacionados ao embrião, é capaz de proporcionar um controle mais preciso das variáveis micro-ambientais ao redor dos ovos, com reflexos positivos nos resultados do processo de incubação.

Diante do contexto acima exposto, o presente trabalho corresponde a um estudo característico da área de engenharia aplicada a um bioprocessamento agroindustrial, sendo o processo caracterizado pela transformação biológica do ovo em pinto de um dia. Os conceitos de engenharia aplicados, neste caso, envolvem conhecimentos da área de automação e controle, inteligência artificial e transferência de calor e massa.

A maior contribuição, sobretudo, consiste em fornecer subsídios técnico-científicos, fundamentados metodologicamente, para o processo de incubação artificial de ovos. O conhecimento, fruto do resultado que se espera obter, deve favorecer aos anseios do crescente aumento da demanda por volume e qualidade dos produtos de origem avícola, bem como à expansão desse mercado pela busca constante por maior produtividade.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente estudo é contribuir para o incremento tecnológico da avicultura, por meio do desenvolvimento de um sistema de controle climático avançado para incubadoras, que operam em sistema de estágio único de incubação. Procurou-se desenvolver uma interface computacional para aprimorar os estudos relacionados à incubação, que fosse capaz de reunir aplicações de alguns conhecimentos multidisciplinares específicos das atividades das engenharias, para melhoria do desempenho do processo nas incubadoras.

1.3.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos do presente estudo:

- Conhecer o comportamento dinâmico climático real de uma incubadora de ovos comercial e reunir conhecimentos suficientes sobre seu funcionamento;
- Elaborar uma arquitetura de automação e controle de uma incubadora de estágio único, que faça uso de informações provenientes diretamente do desenvolvimento embrionário;
- Estabelecer uma base de conhecimento do processo de incubação, sustentada por um modelo empírico, e acrescido da experiência de especialistas, que possa ser útil ao estabelecimento das estratégias de controle climático na incubadora;
- Desenvolver uma plataforma de simulação, fiel ao processo físico real de incubação, para que estudos de diferentes estratégias de controle climático na incubadora sejam conduzidos;
- Obter, no campo da simulação, uma configuração satisfatória de um sistema de controle avançado para incubadoras de estágio único, considerando-se aspectos relacionados ao desenvolvimento embrionário.
- Disponibilizar os resultados finais obtidos da simulação computacional, para que estudos seqüenciais sejam conduzidos, de implementação das estratégias de controle em um protótipo físico real da incubadora de estágio único.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Panorama Geral do Mercado Avícola

Dentro do complexo de carnes, a avicultura se constitui na atividade mais dinâmica. Ela se destaca frente às demais atividades pelos resultados alcançados recentemente e pelas perspectivas futuras. Os registros de GODOY (2008), sobre os atuais estudos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), revelam algumas perspectivas para a produção, consumo e comércio internacional das carnes bovinas, suínas e, principalmente, de aves. De acordo com o autor o panorama traçado pela USDA revela que as carnes avícolas, representadas predominantemente pelos frangos, devem registrar um aumento relativo de sua participação no mercado de carnes. A previsão para o aumento em 2009 da produção de carne de aves é próxima de 12%, enquanto que as carnes bovinas e suínas devem decrescer 4,8% e 4,7% respectivamente, neste mesmo período.

Em 2009 espera-se que a produção mundial de carnes de frango alcance 74 milhões de toneladas, valor superior de 2,5 milhões sobre a previsão para o ano de 2008. A produção brasileira de carne de frango deve crescer 5% e alcançar o patamar de 11,4 milhões de toneladas.

GODOY (2008) transcreve uma comparação entre a evolução de produção norte-americana de carne de frango, com a do Brasil, nos últimos 14 anos. Enquanto EUA aumentaram sua capacidade em mais de 50% o Brasil registrou expansão próxima de 170% de 1995 até 2008. As projeções atuais são de que, após o crescimento registrado de 10% nas exportações das carnes avícolas em 2008, o aumento em 2009 será próximo de 3%. O Brasil, como maior exportador mundial, será o responsável por 43,3% das exportações mundiais.

Segundo GODOY (2008), relatando os dados da USDA de 2004 até 2008, o consumo de carnes avícolas é o que apresenta maior evolução, pois se expandiu à razão de 25,3% enquanto o de carne bovina evoluiu 4,6% e o consumo de carne suína de 6,2%, porém, ainda distante do patamar de consumo mundial da carne suína. O Brasil alcançou em 2008 a posição de quarto maior consumidor de carne de frango do mundo, com registro per capita de 38,5 kg.

O setor de produção de pintos de corte, responsável pelo insumo essencial da produção de carne de frango, possui suas expectativas atreladas aos números anteriores de

alojamento de matrizes de corte. Nos 12 meses anteriores ao mês de outubro de 2008 o volume de pintos produzidos totalizou cerca de 5 bilhões de cabeças, o que significou uma expansão da ordem 8% sobre o período anterior.

2.2 Incubação de Ovos

2.2.1 Conceitos gerais sobre a incubação

Existem dois conceitos sobre a incubação. A incubação de ovos pode ser do tipo natural, realizada em campo pelas próprias aves ao chocar os ovos, e do tipo artificial, realizada em escala industrial nos incubatórios, por meio do uso de incubadoras comerciais. Neste último caso, busca-se reproduzir situações próximas da condição natural de incubação das aves.

As incubadoras podem ser de estágio único ou múltiplo de incubação. Incubadoras de estágio múltiplo são as mais comuns e utilizadas nos incubatórios brasileiros. Nestas, o carregamento e transferência de ovos ocorrem em séries, conforme a idade dos ovos. Ovos em diferentes estágios de desenvolvimento produzem calor de forma distinta e, por essa razão, são intercalados na incubadora como uma tentativa de se aproximar do equilíbrio térmico.

Nas incubadoras de estágio único o carregamento e transferência dos ovos são realizados apenas uma vez cada. Esse procedimento possibilita maior controle das condições ambientais no interior da incubadora, uma vez que todos os ovos apresentam perfis semelhantes de produção de calor, por estarem no mesmo estágio de desenvolvimento embrionário. Para CALLEJO (2007) a incubadora de estágio único apresenta ainda algumas vantagens sanitárias e operacionais, pois após a transferência dos ovos ela fica vazia, o que permite sua higienização, desinfecção e práticas de manutenção.

O processo produtivo em incubatórios é constituído basicamente da entrada dos ovos incubáveis e sua posterior transformação biológica em pintainhos de um dia, com agregação de valores (GUSTIN, 2003). O primeiro incubatório artificial surgiu por volta de 1880 nos Estados Unidos, com a especialização dos setores em produção de pintainhos (FABRIS, 2000). A história da incubação artificial representa um dos capítulos mais importantes dentro do cenário da evolução da avicultura.

Importantes mudanças ocorreram na avicultura nas últimas três décadas. HULET (2007) registrou que, em 1980 um frango atingia 2 kg de peso corporal em aproximadamente 70 dias. A partir de 2002, o mesmo peso passou a ser alcançado em 40 dias. Esse desenvolvimento não foi acompanhado por mudanças no tempo de incubação dos ovos, que se manteve em 18 dias. Assim, o processo de incubação atual representa aproximadamente 30% do tempo total de produção dos frangos, desde a colocação dos ovos, enquanto que, na década de 1980, essa representação era de aproximadamente 25%.

Os parâmetros físicos, necessários para uma correta incubação, permanecem os mesmos desde o início da incubação industrial. Porém, houve evolução no conhecimento de como gerenciar os aspectos físicos mais importantes, tais como viragem dos ovos, ventilação, umidade, temperatura e as concentrações gasosas (CALIL, 2007). Assim, o sucesso da incubação envolve condições adequadas de manejo, considerando as pressões impostas às aves pelo ambiente e a somatório dos fatores biológicos e físicos.

2.2.2 Princípios da fisiologia embrionária

O processo de incubação deve ser entendido como uma perfeita simbiose entre os fenômenos bioquímicos e fenômenos físicos. Daí, a importância da compreensão da fisiologia embrionária (CALIL, 2007). No entanto, a fisiologia completa do desenvolvimento embrionário é tema extenso e de grande complexidade.

Resumidamente, pode-se afirmar que, todo o processo de desenvolvimento embrionário é dependente de reações bioquímicas, para transformação de substrato em energia para o desenvolvimento em três etapas distintas, conforme classificação esquematizada na Figura 1 (BOERJAN, 2006):

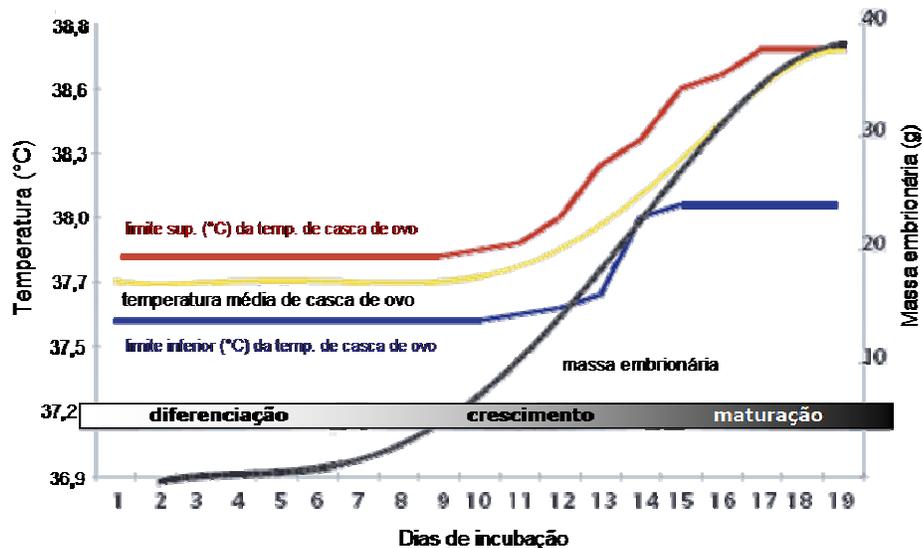


Figura 1. Curva de desenvolvimento embrionário e padrões de temperatura do embrião ao longo do período de incubação (Adaptado de BOERJAN, 2006).

- Diferenciação Celular: as células se tornam especializadas e inicia-se a formação dos órgãos vitais do embrião;
- Crescimento: cada grupo celular específico diferenciado inicia uma seqüência de multiplicação e crescimento que leva a formação de tecidos e órgãos;
- Maturação: com os tecidos e órgãos vitais formados inicia-se o estabelecimento de suas funções;

O embrião utiliza principalmente o substrato gema, para realização das conversões energéticas necessárias para as três etapas do desenvolvimento embrionário apresentadas. O desenvolvimento histológico pulmonar termina quando o embrião bica a casca. A passagem da respiração cório-alantóidea para a respiração pulmonar realiza-se gradativamente. Inicia-se próximo aos dezoito dias de idade, quando o embrião bica a câmara de ar, para produzir total mudança do tipo de respiração aos vinte e um dias, instante em que começa a bicar a casca (BOERJAN, 2006).

Entende-se que todas as reações necessárias para o desenvolvimento embrionário são dependentes de duas variáveis, uma física (temperatura) e outra bioquímica (enzimas), daí a importância da interação entre esses dois parâmetros. Todos os outros fatores físicos são

secundários e atuam sinergicamente com a temperatura, visto que a ação enzimática não pode ser controlada pelo homem (CALIL, 2007).

2.2.3 Energia térmica na incubação

De acordo com a literatura (MEIR e AR, 1987; SWANN e BRAKE, 1990), no processo de incubação de ovos, o desenvolvimento embrionário é substancialmente influenciado pelo micro-ambiente físico das incubadoras. Assim, a manutenção da temperatura ideal ao redor dos ovos é considerada um ponto crítico do processo (BURTON et al., 1989; VISSCHEDIJK, 1991; DECUYPERE e MICHELS, 1992). Define-se a temperatura ideal de incubação como aquela requerida para garantir a máxima taxa de eclosão (FRENCH, 1997). Contudo, DECUYPERE e MICHELS (1992) estabeleceram que a qualidade dos pintinhos também deve ser considerada. Desta forma, surgiu o termo eclodibilidade, como união dos dois conceitos, índice de eclosão com qualidade de nascimento dos pintinhos.

Segundo FRENCH (1997) muitas espécies de aves domésticas possuem como temperatura adequada de incubação, valores entre 37 e 38 °C. Pequenos desvios deste intervalo podem impactar no sucesso da eclodibilidade, no desenvolvimento embrionário (WILSON, 1991) e no sincronismo de nascimento dos pintainhos.

CALIL (2007) expõe diversos trabalhos científicos que comprovam a dificuldade no controle da temperatura embrionária de linhagens modernas. As incubadoras devem proporcionar o controle efetivo da temperatura no interior da máquina e garantir que a temperatura de desenvolvimento do embrião, permaneça dentro do intervalo ideal de incubação.

Os incubatórios mais modernos possuem dois principais objetivos: maximizar a eclodibilidade e melhorar o sincronismo de nascimento dos pintainhos, sendo esses dois fatores consideravelmente afetados pela temperatura e velocidade do ar ao redor dos ovos (FRENCH, 1997).

De acordo com VAN BRECHT et al. (2000) as variáveis temperatura e velocidade de ar não são homogeneamente distribuídas no volume das incubadoras. As obstruções causadas pelas bandejas e pelos ovos resultam em uma mistura imperfeita do ar, que afeta a qualidade e eficiência do processo.

A atual tendência no aumento da capacidade de ovos implica, cada vez mais, em dificuldades para se estabelecer o controle preciso da temperatura e velocidade do ar no volume da incubadora e ao longo do período de incubação. Tal característica dificulta a distribuição uniforme da temperatura para todos os ovos (VAN BRECHT et al., 2003).

FRENCH (1997) considera que a temperatura experimentada pelo embrião durante o desenvolvimento é dependente dos seguintes fatores: 1) temperatura da incubadora; 2) capacidade de troca de calor entre o ambiente da incubadora e o embrião; e 3) produção de calor metabólico do próprio embrião.

A perda de calor por evaporação (Hevap) é representada pela perda de água do ovo para o ambiente, enquanto que, a produção de calor embrionária, pode ser medida diretamente, ou conforme sugestões de ROMIJIN e LOKHURST (citado por FRENCH, 1997), medindo-se o consumo de O₂.

De acordo com TAZAWA e NAKAGAWA (1985) no início da incubação, a produção de calor embrionária (Hembrião) é insignificante, e assim, a temperatura do embrião, representada pela temperatura da casca do ovo (Tovo), é menor que a temperatura do ar da incubadora (Tmáquina), uma vez que, Hembrião é menor que Hevap. Contudo, no período final de incubação, Hembrião é significativamente maior que Hevap e, portanto, a Tovo é superior à Tmáquina. Estudos que utilizam medições diretas da Tovo indicam que este valor excede a Tmáquina no meio do período de incubação, a partir de nove dias. Durante a primeira metade do período de incubação, os ovos ganham calor proveniente do ar ao seu redor, enquanto que, durante a segunda metade do período de incubação, os ovos perdem calor para o ambiente.

Em incubadoras comerciais a situação é mais complicada, já que cada ovo está circundado por outros ovos que, podem (em incubadoras de estágio único) ou não (em incubadoras de estágio múltiplo), estar no mesmo estágio de desenvolvimento.

As incubadoras dispõem basicamente de uma unidade de condicionamento de ar para prover calor, ou retirá-lo, além de umidificador e ventilador, para circular o ar condicionado pelos ovos, antes de retornar para a unidade de condicionamento.

2.2.4 Trocas mássicas no processo de incubação

De acordo com LA SCALA JR. (2003) os nutrientes, as fontes de energia e a água, utilizados no desenvolvimento embrionário durante o processo de incubação estão presentes no interior dos ovos, tão logo estes são produzidos. Porém, os ovos necessitam de aquecimento e movimentos periódicos de rotação para evitar a aderência do embrião à parede interna do ovo. Além disso, é preciso prover aos ovos condições para o transporte de taxas adequadas de oxigênio do ar (O_2), vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) e calor (H), que são oriundos do metabolismo das células embrionárias durante as etapas do desenvolvimento.

Os embriões respiram por um processo espontâneo, sem gasto da energia metabólica embrionária, devido à diferença de concentração de moléculas. O gás move-se via poros da casca devido a um processo passivo denominado difusão, cujo princípio consiste da migração de uma concentração maior de moléculas na direção de menor concentração.

Menor concentração de O_2 no interior do ovo condiciona a obtenção de novas moléculas de O_2 vindas do exterior do ovo, onde a concentração molecular é superior. Concentração maior de CO_2 no interior do ovo faz as moléculas migrarem para o lado de fora, dependendo do gradiente de concentração molecular existente. O CO_2 começa a ser produzido pelo embrião durante a gastrulação e seu fluxo na incubadora influencia a produção (BOLELI, 2003).

Os processos de difusão especificados são governados pela quantidade e geometria dos poros presentes na casca do ovo que está disponível à passagem de moléculas e pela diferença de concentração molecular considerada (LA SCALA JR., 2003). Segundo o autor os poros são os únicos canais de comunicação gasosa entre o exterior (atmosfera) e as membranas embrionárias que se situam no interior da casca do ovo. Um ovo possui cerca de 10.000 poros que agregam uma área próxima de 2 mm^2 distribuídos sobre sua superfície. A quantidade de

poros, e suas dimensões, são estabelecidas durante a formação do ovo, e depois disso, permanecem sem modificações.

A pressão de vapor d'água no interior do ovo é maior do que aquela existente na atmosfera que envolve o ovo no processo de incubação (LA SCALA JR., 2003). Assim, os poros possibilitam também o movimento de moléculas de água através do processo de difusão, que resulta em um fluxo de H₂O para fora do ovo de forma contínua e controlada. Boa parte da energia necessária ao processo metabólico é retirada de reservas de gordura da gema e, para cada grama de gordura queimada, uma quantidade semelhante de vapor de H₂O é gerada. Assim, a quantidade relativa de H₂O dentro dos ovos durante o processo de incubação seria aumentada com o desenvolvimento embrionário, no entanto, a H₂O gerada acaba sendo eliminada para o ambiente através do processo de difusão, pelos poros da casca dos ovos.

Ao longo do período de incubação um ovo de 60 g captura aproximadamente 6 L de O₂, elimina 4,5 L de CO₂ e 11 L de vapor d'água. Devido à perda de H₂O, o ovo perde aproximadamente 12% do peso do ovo fresco no período considerado entre o início da incubação ao início da bicagem da casca do ovo (AR, 1991). Assim, o mesmo ovo passa a pesar em torno de 51 g e, descontando-se o peso da casca e da membrana respiratória, um pintinho recém-nascido proveniente deste ovo, deve pesar em torno de 39 g.

Os embriões no interior dos ovos não possuem a capacidade de controlar diretamente as trocas gasosas por difusão, entre o ambiente interno e externo ao ovo. Para LA SCALA JR. (2003) a permeabilidade ou a condutância da casca e das membranas para a troca de gases, devem ser criteriosamente ajustadas com relação às demandas metabólicas embrionárias.

Se a permeabilidade ou condutância da casca é considerada muito alta e, os ovos, com grande área de poros, o provimento de O₂ pode ser adequado para a demanda embrionária, porém, muita água pode ser perdida, levando-o a desidratação. Por outro lado, se a condutância é baixa e a espessura da casca do ovo é grande, o embrião pode ser sufocado, devido à falta de O₂, e até mesmo asfixiado, devido à alta concentração de CO₂, ou ainda, afogado, devido à quantidade de H₂O no interior do ovo, produzida pelo seu próprio metabolismo.

A quantidade de água perdida por um ovo é baixa no início do período de incubação, e tipicamente constante após os primeiros cinco dias. A captação de O₂ e a liberação de CO₂ aumentam com a evolução do desenvolvimento embrionário. Com o passar dos dias, no período de incubação, o gás entra para repor a água perdida e forma uma câmara de ar em uma

das extremidades do ovo. A câmara de ar aumenta até que seu tamanho ocupe aproximadamente 15% do volume interno do ovo, no final do período de incubação (LA SCALA JR., 2003).

2.2.5 Bio-respostas embrionárias

Temperatura é o fator mais importante que afeta o desenvolvimento embrionário (ROMANOFF, 1960), a eclodibilidade (DEEMING e FERGUSON, 1991; WILSON, 1991) e o desempenho após a eclosão (WILSON, 1991). Segundo GLADYS et al. (2000), outros fatores influenciam o desenvolvimento embrionário, como a linhagem da ave e também a idade das matrizes.

Conforme FRENCH (1997), as interpretações dos estudos que envolvem temperatura de incubação são difíceis, pois se costuma utilizar a temperatura da máquina de incubação, como aplicação de um tratamento ao ovo. Porém, a literatura demonstra que, a temperatura indicada no controle da incubadora pode ser significativamente diferente da temperatura do ar ao redor do ovo e da temperatura do próprio ovo. É possível que, dois estudos que utilizem diferentes sistemas de incubação possam aplicar o mesmo tratamento de temperatura de incubação, mas podem diferir dos resultados de temperatura do embrião.

Estudos realizados por MAULDIN e BUHR (1995) demonstraram que, a temperatura registrada ao redor dos ovos, diferiu da temperatura de operação da incubadora. Temperaturas máximas foram normalmente registradas em ovos no final do período de incubação e estiveram entre 0,4 e 3,1 °C acima da temperatura de operação da incubadora. A conclusão desses estudos sugere que, a maioria das incubadoras comerciais, não é capaz de manter uniformidade de temperatura ao redor dos ovos incubados, principalmente devido a desigualdades no fluxo de ar dentro da máquina.

FRENCH (1997) concluiu que, os estudos relacionados à temperatura de incubação, devem levar em conta a temperatura experimentada pelo embrião. Além disso, muitas pesquisas têm sido conduzidas em pequenas incubadoras que comportam centenas de ovos, nas quais a diferença entre temperatura de incubação e experimentada pelo embrião, podem não

diferir muito. Contudo, incubadoras comerciais contêm milhares de ovos, e os resultados dessas pesquisas podem não ser aplicados a situações práticas, a não ser que se utilize um padrão comum de temperatura de ovo.

A medida da temperatura interna do ovo é problemática, pois provoca danos na integridade estrutural da casca do ovo e torna-se um risco de contaminação por bactérias. A alternativa é efetuar medidas da temperatura da superfície da casca do ovo, resultando em diferenças mínimas entre a temperatura interna e da superfície da casca (SOTHERLAND et al., 1987).

FRENCH (1997) sugere que seja investigada em pesquisas, a relação entre temperatura de casca de ovo e o sucesso da eclodibilidade conseqüente. LOURENS et al. (2006) considera que a temperatura constante de casca de ovo em 37,8 °C pode ser utilizada para monitorar outras respostas metabólicas embrionárias, mais diretas, tais como a produção de calor ou produção de CO₂. O monitoramento das bio-respostas embrionárias a fatores externos, durante a incubação, podem prover importantes informações sobre a condição atual e a situação futura do processo de incubação (BAMELIS et al., 2005).

De acordo com MEIJERHOF e VAN BEEK (1993) a temperatura do ar não é simplesmente igual à temperatura embrionária e estas podem variar de forma independente. Segundo LOURENS et al. (2005) as medidas da temperatura do embrião requerem métodos destrutivos que influenciam o desenvolvimento embrionário e a eclodibilidade. Portanto, o uso da temperatura da superfície da casca do ovo, pode solucionar este problema. Para MEIJERHOF e VAN BEEK (1993) a temperatura da casca de ovo é afetada pela produção e transferência de calor embrionária, da qual a temperatura da incubadora é um dos fatores influenciadores.

Segundo LOURENS et al. (2005), como a temperatura de casca de ovo pode variar, independentemente da temperatura da incubadora, os fatores que influenciam a produção e/ou transferência de calor devem ser analisados, para obtenção de condições adequadas de incubação. O controle da incubação, baseando-se apenas no controle da temperatura da incubadora, pode causar resultados insatisfatórios, devido à influência descontrolada na temperatura de casca dos ovos. Neste caso, a variação da temperatura de casca de ovo pode ser responsável por variações indesejadas do desenvolvimento embrionário e do crescimento dos pintainhos, nos galpões de produção.

LOURENS (2001) encontrou uma média de temperatura de casca de ovo de 37,8 °C em incubadoras comerciais de estágio único, embora flutuações de aproximadamente 5 °C foram observadas, dependendo do estágio de desenvolvimento e da posição do ovo na máquina.

Estudos, investigando o efeito da temperatura de incubação na eclodibilidade de frangos, foram revisados por WILSON (1991). Diversas conclusões relacionadas a esses estudos foram sumarizadas por FRENCH (1997), sendo:

- A temperatura contínua adequada para incubação está entre 37 e 38 °C, embora a eclosão seja possível entre 35 e 40,5 °C;
- Os embriões são mais sensíveis às temperaturas altas, do que baixas;
- O efeito da exposição à temperatura inadequada depende da intensidade do desvio da faixa de temperatura ideal e do tempo dessa exposição;
- Os embriões parecem ser mais sensíveis às variações de temperatura da faixa considerada ideal, no início do período de incubação, do que no final do período.

Além disso, alguns estudos sugerem que a temperatura ideal para incubação pode diferir entre as linhagens de frango e ovos de diferentes tamanhos (DECUYPERE, 1994; CHRISTENSEN et al., 1994).

Para YAHAV et al. (2004) e COLLIN et al. (2005) a combinação da Tovo, do período de exposição e do tempo de exposição, determinam o impacto dos tratamentos de Tovo no desenvolvimento embrionário. Os resultados, encontrados por LOURENS et al. (2006), demonstram que o período da exposição dos tratamentos de temperatura demonstrou ser uma importante regra em relação às respostas dos embriões. A produção de calor foi mais significativamente alterada pela variação da Tovo no início do período da incubação (6,5 dias até 9,5 dias), do que no restante do período de incubação e, mais do que isso, a Tovo teve um efeito notável na produção de calor.

LOURENS et al. (2005) estudou o efeito da temperatura de casca do ovo, tendo a temperatura da máquina de incubação como método de controle. Os resultados, demonstraram que, ovos sujeitos a temperaturas inferiores a 37,8 °C durante a primeira semana de incubação,

requisitaram maiores temperaturas da máquina de incubação nas duas semanas seguintes, devido à baixa produção de calor, característico da etapa inicial de incubação. Além disso, diferentes perfis de temperatura de casca de ovo, durante a primeira semana de incubação, influenciaram também o controle da temperatura corporal dos pintainhos, durante a primeira semana pós-eclosão.

LOURENS et al. (2005) concluíram que, diferentes grupos de ovos requerem diferentes temperaturas do ar da incubadora, para incubar ovos sob a mesma temperatura de casca de ovo. Variações relativamente pequenas da temperatura de casca dos ovos resultaram na redução da produção de calor, retardamento do desenvolvimento embrionário, aumento da taxa de mortalidade embrionária tardia, aumento da percentagem de pintainhos de segunda categoria, redução da eclodibilidade, redução do crescimento pós-eclosão e redução na habilidade dos pintainhos em manter a temperatura retal na primeira semana pós-eclosão.

Embora a umidade relativa do ar seja um fator importante do processo de incubação, esta não é considerada tão crítica como a temperatura, pois sua variação no interior da incubadora é mais tolerável. De acordo com NEVES (2005) a umidade relativa do ar na incubadora afeta a taxa de produção de calor metabólico do embrião, a relação entre o peso do ovo e o peso do pintainho, a elasticidade da membrana da casca para eclosão e, o desenvolvimento embrionário, especificamente na cicatrização umbilical e capacidade pulmonar.

Segundo DECUYPERE et al. (2003), se a umidade relativa do ar for muito baixa, a perda de água será excessiva, atrasando a eclosão e muitos embriões, mesmo em pleno desenvolvimento, não irão eclodir. Por outro lado, se for alta, os embriões tenderão a eclodir precocemente sem alcançar o máximo desenvolvimento.

BOERJAN (2006) sugere que o processo de incubação seja detalhadamente controlado, devido às suas diversas interferências. Porém, a automação dos incubatórios, prática com potencial para amenizar as perdas, não é totalmente aplicada, devido à deficiência na avaliação de novas tecnologias no setor. Segundo LOURENS et al. (2006), o desenvolvimento de um sistema de controle, para o processo de incubação de ovos, deve ser capaz de reconhecer e corrigir possíveis variações de respostas embrionárias metabólicas de forma rápida, frente às variações suaves de temperatura.

2.3 Automação e Controle de Processos

2.3.1 Sistemas de controle de bioprocessos

A automação e o controle de processos podem influenciar significativamente o rendimento e a qualidade final de produtos. No caso de bioprocessos, torna-se necessário a aplicação de metodologias operacionais, capazes de assegurar de modo estável e reprodutível uma produtividade máxima, com um mínimo de custos (LEITE, 2007).

Sob a óptica da produção industrial em larga escala, a otimização, automação e controle em processos biotecnológicos têm sido muito almejadas. No entanto, o volume de aplicações de sistemas de controle em bioprocessos, especialmente os mais avançados, ainda é pouco representativo.

Em geral, os sistemas de controle possuem como principal objetivo garantir a estabilidade operacional, para as condições dos processos e suas variáveis, dentro de limites desejados, estabelecidos previamente (LEITE, 2007). Os sensores são os elementos responsáveis pelas medidas de valores das variáveis dos processos, que são, então, comparados aos valores alvos. A partir da diferença de valores entre as variáveis dos processos e os valores desejados, se inicia uma ação contínua e automatizada, visando reduzir a zero os desvios ocorridos.

De acordo com LEITE (2007), a qualidade em um sistema de controle é medida pela capacidade em proporcionar um desvio mínimo da variável de processo, como resultado de uma perturbação qualquer, retomando a condição de funcionamento pré-estabelecida, em um mínimo intervalo de tempo. Tal condição afeta os rendimentos do processo. O objetivo econômico de se obter altos rendimentos justifica a introdução de novos conceitos de monitoramento e controle nos bioprocessos. Busca-se assegurar a reprodutibilidade e confiabilidade dos sistemas e, reduzir os custos energéticos, aperfeiçoar a supervisão e melhorar a qualidade dos produtos finais.

PEREIRA FILHO (1999) considera o controle de processos como uma das áreas com grande potencial para a introdução desses novos conceitos, em especial as aplicações dos componentes de inteligência computacional, como as redes neurais artificiais (FILETI, 1996;

PEDROSA, 1998) e os controles *fuzzy*. Tais componentes procuram desenvolver alguma forma de inteligência, similar à exibida por determinados sistemas biológicos.

SERRA (2005) acredita que as técnicas de inteligência computacional são basicamente oriundas da teoria dos conjuntos *fuzzy*, das redes neurais artificiais e da computação evolutiva. Elas consistem basicamente de programas computacionais capazes de processar dados numéricos e/ou informações lingüísticas, cujos parâmetros podem ser ajustados a partir de exemplos, até mesmo na ausência de modelos matemáticos.

Segundo LEITE (2007), a tarefa de descrever processos biológicos, através de modelos matemáticos convencionais para sistemas de otimização e controle, é difícil devido à natureza complexa desses processos e às quantidades insuficientes, inadequadas e imprecisas das informações. SERRA (2005) considera que, a atual necessidade de engenheiros lidarem com problemas cada vez mais complexos, têm possibilitado via técnicas de inteligência computacional, o controle de sistemas de processos dinâmicos reais difíceis de serem modelados matematicamente.

De acordo com HORIUCHI e KISHIMOTO (2002), recentemente nota-se, em bioprocessos, um grande incremento na utilização de controladores adaptativos, na aplicação de algoritmos baseados em conhecimento, na utilização da lógica *fuzzy* e das redes neurais.

2.3.2 Teoria dos conjuntos *fuzzy*

Na teoria clássica de conjuntos, um determinado elemento possui apenas duas possibilidades, pertencer ou não a um conjunto. Na teoria dos conjuntos *fuzzy*, desenvolvida por ZADEH (1965), um conjunto não apresenta limites bem definidos. Um elemento pode pertencer a dois conjuntos ao mesmo tempo. A transição entre pertencer ou não a um conjunto *fuzzy* está em uma faixa gradual entre zero (0 - totalmente não membro) e um (1 - totalmente membro).

HORIUCHI e KISHIMOTO (2002) consideram os conjuntos *fuzzy*, como uma ferramenta matemática capaz de tratar informações qualitativas e expressões lingüísticas. FERREIRA e PARANHOS (2004) definem a lógica *fuzzy*, como um instrumento que

possibilita reproduzir um modelo do raciocínio humano, especialmente o caráter aproximado e qualitativo. Alguns autores (LUNA HUAMANÍ, 2003; LEITE, 2007) consideram a lógica *fuzzy*, como uma ferramenta capaz de capturar informações vagas que, em geral, estão descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação pelos computadores.

Mais detalhes sobre lógica *fuzzy*, operadores lógicos, conjuntos *fuzzy* e mecanismos de inferência, podem ser obtidos em WANG (1996), PEDRICZ e GOMIDE (1998) e ALMEIDA e EVSUKOFF (2003).

2.3.3 Controladores *fuzzy*

A representação de sistemas, através de modelos é muito importante para, entre outros fatores, se estabelecer estratégias de controle adequadas. As teorias de controle clássico e moderno apresentam limitações de desempenho, quando o processo apresenta alta complexidade, onde não-linearidades e o comportamento transiente estão presentes (PINHEIRO, 2000; LEITE, 2007). Em projetos de controladores *fuzzy*, não é necessário conhecer o modelo matemático do processo a ser controlado (DRIANKOV et al., 1996).

O controle *fuzzy* utiliza-se de regras lógicas no algoritmo de controle, com a intenção de descrever numa rotina a experiência humana, intuição e heurística, para controlar um processo (LEITE, 2007). A principal idéia dos algoritmos baseados na lógica *fuzzy* é imitar o raciocínio humano, para controlar processos de difícil modelagem fenomenológica ou de grande transitoriedade (PEREIRA FILHO, 1999). SERRA (2005) considera que os sistemas de controle *fuzzy* são usados para formular o conhecimento humano, que por sua vez, podem ser classificados em duas categorias:

- Conhecimento objetivo: conhecimento usado na formulação de problemas de engenharia definido por meio de equações matemáticas;
- Conhecimento subjetivo: conhecimento que representa informações lingüísticas (regras, informações do especialista, especificações de projeto), geralmente impossíveis de serem descritas de forma quantitativa.

De acordo com SERRA (2005), a característica principal do uso dos controladores *fuzzy* nas duas últimas décadas deve-se à capacidade que possuem em apresentar grande robustez, adaptabilidade e versatilidade, pois incorporam conhecimentos que outros sistemas nem sempre conseguem acomodar.

Em sistemas convencionais, equações complexas são processadas em seqüência e, se houver um erro em qualquer delas, o resultado final, solução da equação é questionável. Já num controlador *fuzzy*, cada regra é processada individualmente. Assim, o efeito no resultado final, é mínimo. Portanto, uma falha parcial do sistema pode não deteriorar significativamente o desempenho do controlador (SHAW e SIMÕES, 1999).

PEREIRA FILHO (1999) sumariza algumas discussões sobre as principais vantagens e desvantagens do uso dos controladores *fuzzy*:

Vantagens

- Não necessita de um modelo matemático do processo;
- Permite implementar o conhecimento e a experiência de um especialista humano por meio de regras lingüísticas compreensíveis;
- Possibilita controlar processos não lineares;

Desvantagens

- Não há padronização no processo de aquisição do conhecimento humano e de estabelecimento das regras;
- Existe dificuldade no ajuste das funções de pertinência e estabilidade do sistema, pois em geral o modelo é desconhecido.

O mesmo autor justifica o uso de controladores *fuzzy* em seu estudo. O processo estudado é transiente. As variáveis de estado não apresentam valor constante ao longo do tempo, além de não-linearidade. Tais características prejudicam o desempenho de controladores por retroalimentações tradicionais, pois apresentam parâmetros fixos e não conseguem manter bom desempenho ao longo do processo. Para PINHEIRO (2000), os

controladores *fuzzy* têm-se mostrado mais eficiente que os controladores clássicos, em aplicações como esta, em que não se dispõe de informações detalhadas do sistema. Contudo, se o modelo matemático do sistema existir, este pode ser usado para simulação e para testes da estratégia de controle (PEREIRA FILHO, 1999).

A estrutura dos controladores *fuzzy* permite a modelagem de uma larga classe de sistemas dinâmicos. Além do que oferece maior flexibilidade no projeto de controle de alto desempenho, com certo grau de transparência. Isto se deve às características de incorporar conhecimento do especialista humano, que facilita a interpretação e análise das regras do problema em questão, de forma qualitativa (SERRA, 2005).

2.3.4 Estrutura de controle *fuzzy*

De acordo com LUNA HUAMANÍ (2003), os sistemas de controle *fuzzy* se classificam como sistemas *fuzzy* estáticos e sistemas *fuzzy* recorrentes. Os sistemas *fuzzy* estáticos realizam processamento direto das informações. Os sistemas *fuzzy* recorrentes possuem memória e são capazes de representar um comportamento dinâmico.

PINHEIRO (2000) considera que os sistemas de controle *fuzzy* se classificam em controladores *fuzzy* convencionais e adaptativos. Os controladores *fuzzy* convencionais são usados em processos complexos não lineares e variantes no tempo, onde se conhece a ordem dessas variações. O uso de controladores *fuzzy* adaptativos é mais adequado em processos onde essas variações são desconhecidas. Além disso, outros tipos de controladores *fuzzy* são aqueles que incorporam estruturas de redes neurais, de sistemas de controle não lineares e algoritmos genéticos.

Para WANG (1994), os sistemas de controle *fuzzy* podem ser classificados em três tipos:

- Sistemas *fuzzy* puros: formado por uma base de regras do tipo “se” (antecedente) “então” (conseqüente), e um mecanismo de inferência *fuzzy*;

- Sistemas *fuzzy* funcionais (TAKAGI e SUGENO, 1985). Este sistema tem como principal diferença do sistema *fuzzy* puro, o cálculo da saída, que é computada como uma função da entrada;
- Sistemas *fuzzy* com fuzzificador e defuzzificador: Este sistema foi inicialmente proposto por MANDANI (1974). O mecanismo de fuzzificação mapeia valores reais em subconjuntos *fuzzy* e a defuzzificação faz exatamente o inverso;

De acordo com PEDRICZ e GOMIDE (1998), as representações dos sistemas *fuzzy* podem ser realizadas de diversas formas. Os autores destacam a classificação dos modelos baseados em regras lingüísticas, pela facilidade em incorporar informações ou conhecimentos qualitativos nos modelos que representam. LEITE (2007) destaca as seguintes vantagens listadas por SHAW e SIMÕES (1999) dos controladores *fuzzy*, baseados em regras:

- O uso de variáveis lingüísticas similar ao pensamento humano facilita a discussão de idéias entre as pessoas;
- As regras de controle *fuzzy* são de fácil compreensão e o efeito ou resultado de cada regra pode ser facilmente interpretado;
- Todas as funções de controle associadas com uma regra podem ser testadas individualmente;
- São confiáveis e robustos, uma vez que permitem acrescentar, a qualquer momento, regras ao sistema;

GOMIDE e GUDWIN (1992) apresentam, conforme proposição de MANDANI (1974), a estrutura que constitui um controlador *fuzzy* (Figura 2).

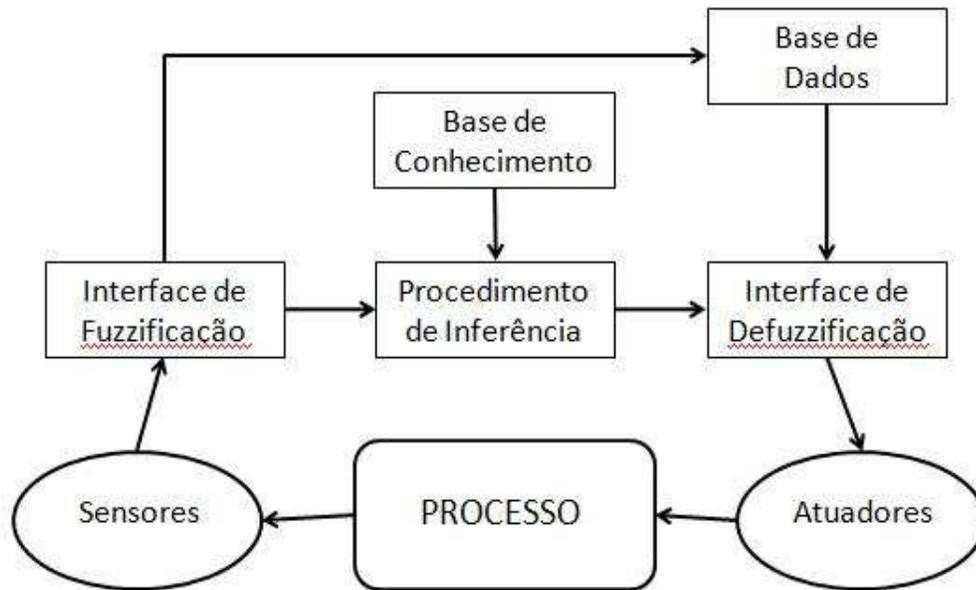


Figura 2. Estrutura de um controlador *fuzzy* e suas partes constituintes

- Interface de fuzzificação: é o mapeamento do domínio de entradas precisas (valores numéricos reais obtidos dos sensores) para valores de entradas *fuzzy*, definidos pelas funções de pertinência;
- Base de conhecimento: consiste da base de regras, em geral construída com o auxílio de especialistas, que caracteriza a estratégia de controle e suas metas;
- Base de dados: armazena as definições dos parâmetros das funções de pertinência e os fatores de escala a serem utilizados no controlador;
- Procedimento de inferência: processa os dados nebulosos de entrada junto com as regras, de modo a inferir as ações de controle *fuzzy*;
- Interface de defuzzificação: consiste na conversão da variável *fuzzy* produzida pela máquina de inferência em uma variável numérica, que atuará no processo de forma a regulá-lo;

ZADEH et al. (1997) considera como os principais mecanismos da estrutura do controlador *fuzzy* apresentada, as tarefas de fuzzificação, estabelecimento da base de conhecimento e defuzzificação. Para LEITE (2007), a estrutura apresentada na Figura 2 quando

bem assimilada é uma arma poderosa de simplificação, pois possibilita decisões rápidas e coerentes num ambiente de incertezas.

Uma importante característica dos sistemas *fuzzy* é sua capacidade em fornecer descrições da relação entre os sinais de entrada e saída, de um determinado sistema (YAGER e FILEV, 1994). No entanto, estes sistemas não possuem uma capacidade inerente de aprendizagem.

Segundo PINHEIRO (2000), os controladores *fuzzy* convencionais representados por regras lingüísticas, são largamente empregados em controle de processos, quando se dispõe de informações básicas das plantas controladas. Esses controladores são caracterizados por uma estrutura típica, a partir das informações do erro do sistema (diferença entre o valor de referência e a variável de processo) e da variação do erro. O controlador clássico proporcional-integral-derivativo (PID) pode ser representado por uma função linear do erro, da variação do erro e da segunda variação do erro. Os controladores *fuzzy* são não lineares, conforme demonstrado por JAGER (1995). Dependendo das variáveis consideradas na premissa das regras *fuzzy*, eles podem ser análogos aos controladores P, PI, PD e PID convencionais, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Regras de analogia entre controle *fuzzy* e controladores convencionais

Tipo de Regra <i>fuzzy</i>	P	I	D
Se o erro é _____ então a ação de controle é _____	X		
Se o erro é _____ então a variação na ação de controle é _____		X	
Se o erro é _____ e a variação do erro é _____ então a ação de controle é _____	X		X
Se o erro é _____ e a variação do erro é _____ então a variação na ação de controle é _____	X	X	
Se o erro é _____ e a variação do erro é _____ e a segunda variação do erro é _____ então a variação na ação de controle é _____	X	X	X

Um controle com estrutura *fuzzy*-PI é um controle prático que possui capacidade de remover o off-set da resposta em processos. Este tipo de controlador gera uma saída de controle incremental a partir do erro e da totalização do erro no tempo, sendo considerado um controle de velocidade. O controle *fuzzy*-PD gera saídas de controle a partir das entradas de erro e da variação do erro, sendo considerado controle de posição. O controlador *fuzzy*-PID

produz uma saída incremental a partir do erro, variação do erro e aceleração do erro (LI e GATLAND, 1996).

PINHEIRO (2000) verificou que, para ações lineares, os controladores *fuzzy* não justificam melhorias de desempenho, comparado aos controladores clássicos. No entanto, em sistemas dinâmicos, que apresentam variações devido a alterações de parâmetros ou não linearidades, a utilização de controladores *fuzzy*, que contenham comportamentos não lineares, pode produzir melhores resultados que os controladores lineares.

Os controladores *fuzzy* adaptativos/preditivos, conforme classificação estabelecida por PINHEIRO (2000) possuem a capacidade de compensar variações desconhecidas de um processo. Estes alteram os parâmetros do sistema, em função de variações na planta controlada. Possuem também a capacidade de lidar com incertezas e de agregar informações lingüísticas, por se tratar de um sistema *fuzzy*. Tais ações de adaptação modificam funções de pertinência, fatores de escala, ou mesmo regras durante o controle. Esses sistemas utilizam terminologia, métodos e estruturas semelhantes aos controladores adaptativos tradicionais. PINHEIRO (2000) apresenta ainda uma revisão com a evolução de diversos trabalhos desenvolvidos na área de controladores *fuzzy* adaptativos e preditivos.

Para LEITE (2007), os conjuntos *fuzzy* são mais adequados na descrição de uma função de controle apropriada, em comparação com as equações de controle PI e PID, considerando processos não-lineares. No entanto, considera que a maior desvantagem no controle *fuzzy* é a falta de métodos consagrados de projeto e o ajuste de um controlador de caráter geral.

2.3.5 Identificação, projeto e sintonia de controladores *fuzzy*

Técnicas de identificação de sistemas são largamente usadas no projeto de sistemas de controle. SERRA (2005) apresenta uma discussão da literatura existente sobre identificação de sistemas, principalmente sobre modelos e controladores descritos por equações matemáticas. No entanto, surgiram na literatura diversas abordagens para análises, identificação e controle

de sistemas dinâmicos não lineares e, um dos elementos chaves para essas aplicações, são os sistemas *fuzzy*.

As metodologias de identificação e controle inteligente empregam técnicas motivadas por sistemas biológicos, inteligência humana e uso de linguagem natural, regras, redes semânticas ou modelos qualitativos. Identificação e controle *fuzzy* são exemplos típicos de técnicas que fazem uso de conhecimento humano e de processo dedutivo. De acordo com DRIANKOV et al. (1996), as maneiras básicas para se gerar controladores *fuzzy* são:

- Interrogar operadores do processo;
- Transpor experiência de especialistas para uma representação qualitativa do controle;
- Derivar estratégias de controle a partir da identificação de modelos;
- Usar técnicas da teoria de sistemas de controle;

SERRA (2005) considera que, uma abordagem prática para projetar sistemas de controle, seja a partir de testes experimentais. O sistema dinâmico é submetido a um sinal de entrada que conduz a uma resposta particular, obtendo-se os parâmetros do modelo usados no projeto do controlador. Algumas situações, no entanto, exigem o conhecimento das equações matemáticas do modelo. Nestes casos, os modelos podem ser utilizados para simulação, predição, melhor entendimento dos mecanismos intrínsecos ao sistema dinâmico e diagnóstico de falhas.

LEITE (2007) considera a definição dos conjuntos *fuzzy* correspondente às variáveis de entrada e às variáveis de saída, como um aspecto importante no projeto e desenvolvimento de controladores *fuzzy*, pois, o desempenho do sistema de inferência, dependerá do número de conjuntos e de sua forma. YAGER e FILEV (1994) e JAGER (1995) recomendam, para simplificação e unificação do projeto de controladores *fuzzy*, o uso de universos de discursos normalizados, tanto das variáveis de entrada quanto de saída.

A literatura sobre controladores *fuzzy* cita diversos tipos de funções de pertinência, para tratamento dos dados de entrada e saída. Algumas lineares, como as funções triangulares, trapezoidais ou monotônicas e outras não lineares, como as funções gaussianas (DRIANKOV

et al., 1996). JAGER (1995) analisou a influência do formato das funções de pertinência e, para ele, as funções de pertinência trapezoidais apresentam uma lenta convergência ao fator de referência, o que pode ou não ser aceitável, dependendo do tipo de sistema.

A grande maioria dos trabalhos utiliza as funções de pertinência lineares, em especial as triangulares, devido principalmente à facilidade de manuseio e a velocidade de cálculo das áreas envolvidas no processo de defuzzificação (PEREIRA FILHO, 1999). LUNA HUAMANÍ (2003) utilizou a função de pertinência do tipo gaussiana na implementação de sistemas *fuzzy* adaptativos, enquanto que, nas estruturas *neurofuzzy* foram utilizadas funções de pertinência triangulares, visto que estas fornecem um bom desempenho a um baixo custo computacional.

PINHEIRO (2000) demonstra que, controladores *fuzzy* convencionais, com ações lineares, foram obtidos quando se usou partições uniformes nas funções de pertinência. Utilizando-se funções de pertinência triangulares, simétricas e de larguras iguais, são obtidas leis de controle equivalentes às de compensadores lineares clássicos. Quando as funções de pertinência não possuem partições uniformes (larguras diferentes), o comportamento do controlador *fuzzy* foi não linear, pois os ganhos são alterados em função da magnitude dos sinais de entrada.

Para JAGER (1995), o uso de funções de pertinência não lineares, introduz um caráter não linear ao controlador. Contudo, existem outras maneiras de acrescentar características não lineares ao controlador. Cita-se a partição do universo de discurso das variáveis de entrada, alterações das regras *fuzzy* que representam o conhecimento, ou ainda, a escolha do tipo apropriado de operação para o conector. TRANSCHEIT (2003) exemplifica algumas proposições *fuzzy*, combinando-as por meio de diferentes operadores, como os conectivos lógicos ‘e’ e ‘ou’, e o operador de implicação ‘se ... então’.

SHAW e SIMÕES (1999) consideram que a saída do sistema torna-se mais suave com o aumento da quantidade de variáveis lingüísticas. Assim, a transição de um estado para o outro se torna menos abrupta. No entanto, essa maior quantidade aumenta a possibilidade do modelo, em operação, tornar-se instável.

De acordo com a literatura (JAGER, 1995; LEITE, 2007) o método de defuzzificação mais utilizado é o do centro de gravidade. Este calcula o centro da área composta pela união de das contribuições de todas as regras, enquanto os graus de pertinência são utilizados como pesos, para o cálculo de uma média ponderada. Porém, outros métodos de defuzzificação

também são referenciados, como critério dos máximos, média dos máximos e bissetor da área. Segundo COX (1995), a preferência pelo método do centro de gravidade deve-se principalmente à sua propriedade em fornecer saídas *fuzzy* que provocam ações suaves de mudanças, para os próximos passos dos sistemas de controle.

Conforme afirmações de LEITE (2007), os controladores *fuzzy* possuem desempenho superior aos controladores convencionais, devido à natureza heurística, fornecendo tratamento de não linearidade, quando sintonizados de forma adequada. Todavia, para PEREIRA FILHO (1999), a sintonia de um controlador *fuzzy* é um procedimento mais difícil do que a sintonia de um controlador convencional. A razão para tal é de que o controlador *fuzzy* é um sistema extremamente flexível, cujo comportamento é determinado por um grande número de parâmetros que definem as funções de pertinência, a operação de inferência *fuzzy* e a defuzzificação.

Não existe um método padrão para sintonia de controladores *fuzzy*. PINHEIRO (2000) defende que a sintonia pode ser realizada com modificações nas funções de pertinência, nos fatores de escala das variáveis e até mesmo por alterações nas regras. Também são utilizados procedimentos por meio de analogias com outros sistemas, heurística, tentativa e erro, sendo este o método mais usual.

PEREIRA FILHO (1999) cita que, alguns resultados bem sucedidos de sintonia, são obtidos da combinação de conhecimentos sobre o sistema a ser controlado e do uso de analogias entre os controladores *fuzzy* e os controladores PID clássicos. PROCYK e MANDANI (1979) sugerem alguns procedimentos para sintonia de controladores *fuzzy*, baseados nos fatores de escala e limites de erro:

- Valores pequenos de limites para o erro resultam em boa resposta do sistema (pequeno erro em regime permanente e pequeno tempo de resposta), mas levam à instabilidade;
- Convergências rápidas são alcançadas quando se trabalha com valores menores dos limites para o erro e a variação do erro;
- Pequenos valores do limite da variação da ação aumentam o tempo de resposta e o valor da integral do erro quadrático;

No entanto, PEREIRA FILHO (1999) afirma que a eficiência da sintonia, baseada principalmente nos fatores de escala, é prejudicada pelas características contraditórias que estes fatores exercem sobre os diferentes índices de medida de desempenho.

2.3.6 Aplicações dos sistemas de controle *fuzzy*

Segundo LUNA HUAMANÍ (2003), o objetivo geral dos sistemas *fuzzy* é combinar de forma efetiva, tanto a informação numérica como a lingüística, para obter sistemas eficientes e aplicáveis em diversas áreas do conhecimento, como a economia, computação, engenharia e medicina.

Nos últimos anos, as aplicações da teoria dos conjuntos *fuzzy*, formulada inicialmente por ZADEH (1965), tem destacado soluções para problemas complexos e mal conhecidos. Por este motivo, não admitem tratamento por métodos baseados na lógica clássica. Assim, tem sido possível modelar e resolver situações tradicionalmente consideradas intratáveis, especialmente no controle de processos biotecnológicos (PINHEIRO, 2000; LEITE, 2007).

Diversas aplicações práticas que envolvem a lógica *fuzzy* estão referenciadas na literatura. Cada autor apresenta aplicações voltadas para sua área de interesse. LEITE (2007) destaca a utilização da lógica *fuzzy* pelos japoneses, pois cerca de 30% dos artigos publicados sobre esse assunto são de origem japonesa (FERREIRA e PARANHOS, 2004).

HORIUCHI e KISHIMOTO (2002) relatam que grandes empresas obtiveram bons resultados com aplicações em seus bioprocessos. Não houve maiores dificuldades em transpor o desenvolvimento dos sistemas de controle *fuzzy* da escala piloto para escala comercial, apenas pequenas modificações nas regras de controle e funções de pertinência, se fizeram necessárias. Além disso, foram obtidas significativas melhorias na estabilidade dos processos, produtividade e qualidade dos produtos.

PEREIRA FILHO (1999) utilizou controladores *fuzzy* para resolver os problemas do processo de destilação em batelada. Foram aplicados os conceitos da lógica *fuzzy* e do conhecimento de um especialista humano, para desenvolver um controlador baseado em regras do tipo “se-então”, incluindo o conhecimento do operador, na automação do processo.

PINHEIRO (2000) apresenta uma relação de diversos trabalhos, com aplicações de conjunto *fuzzy* em sistemas de controle, desenvolvidos sob diferentes enfoques, como projeto, estabilidade, sintonia, condições de robustez e comparações com controladores clássicos.

SERRA (2005) faz referência a uma lista de aplicações dos sistemas *fuzzy*. Para o autor, existe uma ampla aceitação na comunidade acadêmica e na indústria em aplicações de identificação e controle de sistemas dinâmicos. A aceitação se atribui principalmente ao desenvolvimento da teoria dos conjuntos *fuzzy*, às inúmeras possibilidades práticas e ao grande sucesso comercial das aplicações,

Para HIROYUKI e KOBAYAZHI (2000), existem muitos trabalhos de especialistas tornando possível a implementação da inferência *fuzzy* e sua aplicação em bioprocessos e isso permitirá o uso extensivo dessa metodologia, tão logo os novos sistemas *fuzzy* sejam estabelecidos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste item da dissertação, descrevem-se os recursos materiais e os procedimentos metodológicos adotados na condução do presente estudo, desenvolvidos em duas etapas distintas (Etapa I e Etapa II) que envolveram a execução de atividades práticas e teóricas. A primeira fase do estudo, denominada Etapa I, consistiu em se desenvolver uma investigação experimental de uma incubadora comercial, do tipo estágio único de incubação. A fase do estudo relativa à Etapa II foi conduzida computacionalmente em laboratório, com o intuito de simular o processo real de interação existente entre os ovos e o ambiente da incubadora estudada. Ambas as etapas deste estudo estão detalhadamente descritas a seguir.

3.1 Etapa I – Estudo Prático Experimental da Incubadora

Desenvolveu-se, nesta primeira etapa metodológica, um estudo experimental, conduzido em condições de campo, de modelagem matemática e identificação da dinâmica de uma incubadora comercial de estágio único de incubação. As atividades foram desenvolvidas em parceria com duas empresas que possuem atuação no segmento de avicultura, quais sejam: 1) Casp S.A. Indústria e Comércio; 2) Perdigão Agroindustrial S.A.

A Casp é uma empresa brasileira que está presente no mercado de equipamentos para avicultura, suinocultura e armazenagem de grãos há mais de 70 anos. A sede da companhia fica localizada no município de Amparo, SP. Especificamente no segmento de incubação, a empresa é líder, com participação expressiva próxima de 90% no mercado nacional. Tradicionalmente, a empresa possui uma linha completa de incubadoras de estágio múltiplo de incubação, porém, atualmente possui projetos pilotos de implantação de incubadoras de estágio único, objeto de avaliação do presente estudo.

A Perdigão é uma das maiores empresas de alimentos do mundo. A companhia foi fundada em 1934 e atualmente possui plantas industriais em oito estados brasileiros, além de representações em vários países. Em relação à avicultura, a companhia possui expressiva participação nos segmentos de congelados e industrializados e, para tal, conta com ampla e

estruturada rede de produção, que compreende um grande número de incubatórios e granjas. Um dos lemas que sustentou o crescimento da empresa é a inovação, o que possibilitou a convergência de idéias, para que o presente estudo fosse conduzido nas instalações do incubatório de avós da Perdigão, no município de Rio Claro, SP.

3.1.1 Objetivo e justificativa

A Etapa I deste estudo foi desenvolvida com a finalidade de se fazer a identificação da dinâmica e modelar matematicamente a incubadora de estágio único modelo Ug 62 HT de fabricação da empresa Casp. Esta incubadora foi investigada, quando de sua operação no incubatório de avós da empresa Perdigão, com o intuito de se obter avanços no conhecimento relacionado à área de automação e controle aplicado ao processo de incubação dos ovos.

A tarefa de modelagem foi conduzida no sentido de se estabelecer uma representação da estrutura da incubadora, por meio de um modelo com linguagem matemática apropriada. Considerou-se a modelagem como a tarefa primária para o estudo do comportamento dinâmico das variáveis envolvidas no processo de incubação.

A identificação dinâmica em si, correspondeu ao método que foi utilizado para se obter os valores das variáveis de interesse para o estudo, necessários para a elaboração do modelo da incubadora. A condução do estudo foi inteiramente baseada no pressuposto central da teoria da dinâmica de sistemas, considerando-se que, o comportamento dinâmico característico da incubadora é uma consequência de sua própria estrutura.

O estudo foi conduzido prioritariamente com a incubadora vazia, sem a carga dos ovos, uma vez que dessa forma, eliminaram-se os riscos de afetar o processo de produção e influenciar negativamente os resultados produtivos do incubatório. Dados relativos ao processo de incubação, com a carga real de ovos, também estiveram disponibilizados. Porém, não houve nenhum tipo de interferência e, tais dados, foram úteis apenas como um conjunto de informações complementares, para melhor entendimento do processo.

3.1.2 Características da incubadora

Utilizou-se, como o principal recurso material do estudo, a incubadora da Casp modelo Ug 62 HT (Figura 3).



Figura 3. Parte interna da incubadora utilizada durante o estudo prático experimental.

Especificamente, efetuou-se a verificação do comportamento dinâmico desta incubadora sem a carga de ovos. Procederam-se alguns ensaios experimentais, para se verificar a capacidade dos elementos atuadores da incubadora, considerando-se a necessidade de aquecimento e resfriamento ao longo dos dias de incubação. As dimensões da incubadora estudada estão na Tabela 2.

Tabela 2. Dimensões de incubadora modelo Ug 62 HT que foi utilizada no estudo (Fonte: Casp).

Item	Dimensão
Largura	4,24 m
Comprimento	3,68 m
Altura	2,37 m
Área	15,60 m ²
Volume	36,98 m ³

A incubadora estudada é caracterizada por ter sido construída em móvel germinado modular, constituído por painéis com isolamento térmico de uma espuma rígida de poliestireno estendido (EPS), com espessura de 50 mm e revestido interna e externamente com placas de plástico, reforçado por fibra de vidro, com superfície lisa e acabamento fosco na cor bege. Além disso, as paredes da incubadora são estruturadas por perfis de alumínio extrudado, responsáveis pelo acabamento e vedação do equipamento.

A incubadora possui sistemas de aquecimento, ventilação, renovação do ar, viragem dos ovos, umidificação, desumidificação e refrigeração. O aquecimento é realizado por um banco de resistências elétricas que se constitui no elemento aquecedor. A refrigeração ocorre por meio da circulação de água no interior da serpentina, caracterizada por uma tubulação de cobre, com função de trocador de calor. Para o sistema de viragem dos ovos utilizam-se grades deslizantes resistentes à corrosão, acionadas por motor elétrico. A umidificação do ambiente é realizada por um bico aspersor de água, enquanto que a extração de água do ar úmido é feita por meio da condensação, usando-se um aparelho desumidificador. O sistema de ventilação é composto por um ventilador com pás em aço inox, acionado por polia-correia para homogeneização do ar ambiente. A renovação do ar, com a característica de auxiliar a oxigenação no equipamento, ocorre por meio de *dampers* (aberturas) que permitem o contato com o ar externo (sala de incubação) e também pelo soprador, que é basicamente uma ventoinha que força a entrada do ar através dos *dampers* na incubadora. As Tabelas 3 e 4 apresentam algumas especificações técnicas da incubadora estudada.

Tabela 3. Especificações técnicas da incubadora estudada (Fonte: Casp)

Potência Elétrica	Potência Max. Absorvida	Potência Instalada
Resistência trifásica do aquecedor	7.000 W	1 x 4.000 W 1 x 3.000 W
Motor da ventilação trifásico IV pólos	2.600 W	3 CV
Motor da viragem trifásico IV pólos	520 W	0,5 CV
Motor do soprador trifásico IV pólos	370 W	0,33 CV
Bobina de instrumentos e sinalizadores	400 W	400 W
Potência total	10.890 W	

Tabela 4. Dados técnicos da incubadora relativos aos sistemas de umidificação e refrigeração do ar (Fonte: Casp).

Umidade		Vazão de ar para refrigeração	Vazão de água para a serpentina (l/h)
Água (l/h)	Ar (NI/h)	Pressão de entrada nos reguladores (lb/pol ²)	Máximo e reaproveitável (temperatura ideal 18 C e pressão 50 lb/pol ²)
8	2100	70	300

O modelo de incubadora utilizado possui capacidade para alojar um total de 61920 ovos, distribuídos igualmente em 12 carrinhos com 60 bandejas plásticas de 86 ovos cada. As Figuras 4 e 5 ilustram tais equipamentos.



Figura 4. Carrinhos utilizados no interior da incubadora.



Figura 5. Detalhe da bandeja de ovos utilizada nos carrinhos da incubadora.

O interior da incubadora foi instrumentado com três sensores eletrônicos de temperatura (circuitos integrados) LM-50¹ para medir a temperatura de bulbo seco, além de um sensor de bulbo úmido, para se fazer o acompanhamento e leitura das condições climáticas ambientais no interior da incubadora. Os sensores utilizados fazem parte dos componentes que acompanham a incubadora, quando de sua aquisição.

3.1.3 Detalhamento dos ensaios experimentais

Além dos registros, ao longo do tempo, da temperatura de bulbo seco (TBS) e temperatura de bulbo úmido (TBU), também foram registrados os valores da temperatura e umidade relativa do ar no ambiente externo à incubadora (sala de incubação), caracterizado como um ambiente fechado com sistema de controle de temperatura e umidade (25°C e 60%,

¹ LM50 SOT-23 Single- Supply Centigrade Temperatura Sensor. <http://www.national.com/mpf/LM/LM50.html>

respectivamente). Esses dados relativos à sala de incubação deram suporte ao entendimento da mistura psicrométrica do ar que é inserido na incubadora, a partir do ambiente externo, quando ocorrido.

Por meio do sistema supervisor e de interface com a incubadora, programou-se fazer o registro da leitura de ambos os sensores (TBS e TBU) ao longo do tempo, com amostragem a cada 10 segundos. Os dados foram coletados, armazenados e exportados para posterior processamento em uma planilha de cálculos.

A partir da verificação e teste do funcionamento dos sensores, estabeleceu-se um roteiro simplificado para execução dos ensaios experimentais da incubadora. Cada um dos elementos atuadores da incubadora foi manipulado individualmente e, seus efeitos, nas leituras de TBS e TBU, foram registrados. A Tabela 5 apresenta um sumário da metodologia de realização dos ensaios.

Tabela 5. Roteiro de ensaios para identificação da dinâmica da incubadora

Ensaio	Descrição	Resistores	Serpentina	Damper / Soprador	Bico Aspersor	Desumidificador
1	Aquecimento	manipulado	desligado	fechado	desligado	desligado
2	Resfriamento	máximo	manipulado	aberto	desligado	desligado
3	renovação de ar	máximo	desligado	manipulado	desligado	desligado
4	Umidificação	máximo	desligado	aberto	manipulado	desligado
5	desumidificação	máximo	desligado	fechado	desligado	manipulado

Cada um dos ensaios, apresentados na Tabela 5, teve como principal objetivo apresentar evidências de como as respostas do sistema, no caso temperaturas de bulbo seco e úmido, dependem das entradas, ou seja, os elementos atuadores. Os ensaios característicos de manipulação, de cada um dos elementos atuadores, estão descritos na seqüência.

Em todos os ensaios realizados buscou-se reproduzir ao máximo a condição operacional cotidiana da incubadora. Assim, a máquina incubadora foi preenchida com os carros e bandejas de ovos, que foram mantidos na posição horizontal, porém sem a carga de ovos. O sistema de ventilação foi mantido ligado durante todo o período, já que sua função principal é distribuir melhor o ar ambiente com o intuito de se manter a homogeneidade. A lâmpada interna da incubadora foi desligada e procurou-se trabalhar em condições climáticas próximas da faixa de trabalho da incubadora.

- Resistência de Aquecimento

Os testes referentes ao aquecimento do ambiente na incubadora por meio da atuação dos elementos aquecedores, neste caso, o banco de resistências, foram conduzidos em dois momentos distintos com características diferenciadas. Inicialmente testou-se a atuação dos aquecedores mediante uma potência de 30% das resistências, por um período de 10 minutos. O segundo teste teve como característica verificar o comportamento ambiental na incubadora mediante a atuação das resistências em 90% de sua potência, por um período de tempo de 5 minutos. Com essa metodologia, estando todos os outros atuadores desligados, se estabeleceu uma condição para verificar a resposta dinâmica da planta do sistema, no caso de atuação para aquecimento.

- Serpentina de Resfriamento

Os testes relativos ao resfriamento do ambiente, pela atuação da serpentina, foram conduzidos assim que se estabeleceu uma condição de estabilidade no ambiente da incubadora, oportunamente em valores de temperatura considerados altos, buscando-se refletir a real necessidade de sua atuação que, no processo de incubação, ocorre principalmente no último estágio de desenvolvimento embrionário. Dessa forma os testes foram realizados com os *Dampers* em uma condição de abertura máxima (90°) e foi estabelecida uma função do tipo degrau no tempo de atuação da serpentina de resfriamento, que partiu do tempo $t = 0$ (desligada) até uma situação de tempo t , que foi de 9 minutos para o primeiro teste e de 15 minutos para o segundo teste.

- *Dampers/Soprador*

Os ensaios conduzidos de abertura dos *dampers* foram feitos quando se obteve estabilidade do sistema, ou seja, quando não se notava mais nenhum tipo de mudança brusca no comportamento dos registros de temperatura e umidade relativa do ar. Inicialmente, programou-se um degrau na área de abertura do damper, passando de 0° para 65°, posteriormente de 65° para 90° (posição de máxima abertura). Na seqüência, outros testes foram efetuados, como o fechamento do damper (passando de abertura de 90 para 0) e vice-versa. Dessa forma, todas as condições de contorno, abertura e fechamento do damper, bem como uma condição intermediária (níveis de abertura entre 0 e 90), fizeram parte do estudo. Em relação ao soprador, os testes realizados se configuraram pela atuação do soprador, quando os *dampers* estavam em posição de máxima abertura, por tempos distintos de atuação, sendo 5 e 20 minutos.

- Bico Aspersor para Umidificação

Os ensaios relativos à umidificação do sistema foram efetuados de acordo com a programação de tempo que o bico aspersor inseriu água no interior da incubadora. Foram realizadas quatro repetições sequenciais de testes na medida em que o sistema atingia a estabilidade. Os ensaios foram conduzidos, com os *dampers* abertos na posição de máxima abertura, por um tempo de 1 minuto cada teste. O procedimento de umidificação com uso de bico aspersores, buscou reproduzir a condição de umidificação, geralmente presente no final do período de incubação quando o ambiente precisa ser resfriado e umidificado até certa condição.

- Desumidificador

O procedimento de desumidificação geralmente ocorre na incubadora no início do processo de incubação, ao longo dos primeiros dias. Assim, os testes foram conduzidos com os *Dampers* em posições fechadas (0°) e sob uma condição estável de temperatura e umidade. Aplicou-se um degrau de 7 minutos referente ao tempo em que o aparelho desumidificador ficou ligado.

3.1.4 Identificação da dinâmica e modelagem

No presente estudo, para se identificar a dinâmica do ambiente na incubadora frente à operação dos elementos atuadores, utilizou-se o método da identificação computacional, que envolveu a análise dos dados das variáveis do processo e a modelagem matemática do comportamento observado experimentalmente, de acordo com a literatura da área de controle e automação (OGATA, 2003; BAZANELLA e SILVA JR., 2005; CAMPOS e TEIXEIRA, 2006) A modelagem teve como objetivo obter a função de transferência do sistema sob estudo, por meio das relações entre a transformada de Laplace da função resposta, neste caso, representada pelas temperaturas de bulbo seco e úmido, e a transformada de Laplace da função excitação, caracterizada pelos elementos atuadores.

Assim, como descrito nos ensaios realizados, inicialmente estudou-se o comportamento climático dinâmico na incubadora, sem a interferência de um elemento controlador. Tal procedimento se configurou pela operação da incubadora em sistema de malha aberta. Provocou-se uma interação com a incubadora, por meio da obtenção das respostas temporais das variáveis TBS e TBU a um estímulo na forma de degrau de cada um dos elementos de atuação, conforme ensaios apresentados na Tabela 5.

O fluxograma da Figura 6 serve como exemplo para sintetizar, para apenas dois dos elementos atuadores na incubadora, resistência de aquecimento e bico aspersor de água, a metodologia experimental aplicada para se fazer a identificação das características da incubadora. O procedimento apresentado na Figura 6 foi repetido para todos os elementos de atuação na incubadora.

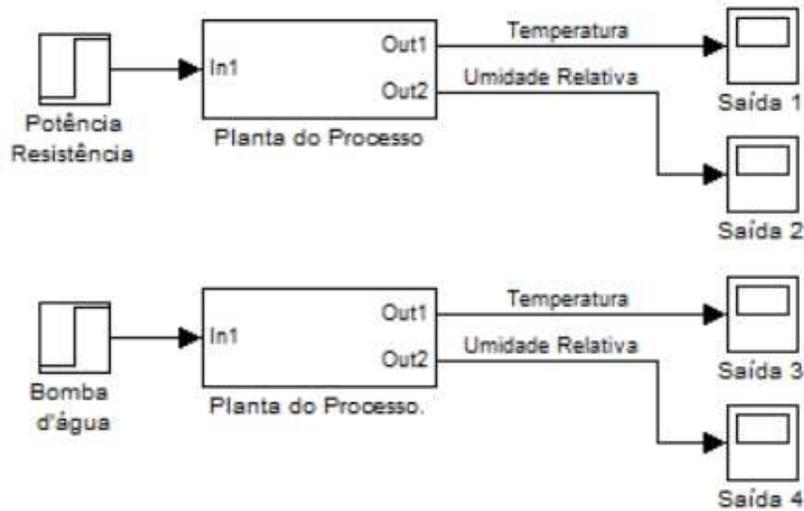


Figura 6. Metodologia para identificar a dinâmica do sistema, mediante excitações das variáveis de entrada (elementos atuadores) e reações temporais das variáveis de saída (TBS e TBU).

Os dados relativos ao processo foram adquiridos pelos sensores, registrando-se em formato numérico, a interação mútua entre a temperatura e umidade do ar, ao longo do tempo. Utilizou-se a representação gráfica do comportamento do sistema, para se obter os parâmetros das funções de transferência. A modelagem foi desenvolvida inicialmente considerando-se T como uma variável de saída e u de entrada, que pode ser representado conforme a equação diferencial de primeira ordem (Equação 1). Definir os termos das equações

$$\tau \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = K * u(t) \quad (\text{Equação 1})$$

Na seqüência aplicou-se a transformada de Laplace na Equação 1 para se ter a dinâmica do processo representada com uma função de transferência de 1ª ordem, conforme Equação 2.

$$\frac{T(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (\text{Equação 2})$$

Assim, a solução no tempo para um degrau unitário na variável $u(t)$ foi obtida com:

$$T(t) == K * (1 - e(-t / \tau)) \quad (\text{Equação 3})$$

Contudo, utilizou-se um modelo um pouco mais completo, acrescentando-se também o parâmetro chamado “tempo morto” do sistema. Assim, chegou-se a Equação 4, que representa

a função de transferência característica de um sistema de primeira ordem com atraso, que na prática, é muito usada para sintonia de controladores do tipo PID.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} * \exp(-\theta * s) \quad (\text{Equação 4})$$

Diante deste desenvolvimento matemático, identificaram-se os parâmetros para estabelecimento do modelo de 1ª ordem da dinâmica da incubadora, com os parâmetros denominados “ganho do processo” (K), a “constante de tempo” (τ) e o “tempo morto” (θ). A Equação 4 é caracterizada por uma generalização do modelo e representou uma abstração matemática simplificada do processo real estudado, uma vez que não é possível incorporar todas as características da incubadora no modelo.

3.2 Etapa II – Estudo Teórico do Sistema

A Etapa II do presente estudo correspondeu ao desenvolvimento de uma plataforma computacional, capaz de simular o processo real de incubação dos ovos na incubadora de estágio único, modelada anteriormente. O desenvolvimento computacional foi conduzido nas dependências do Laboratório de Instrumentação e Controle da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. Foram aplicadas técnicas e conhecimentos das linguagens computacionais para elaboração de um programa, utilizando-se um ambiente particular de programação, o *software* Matlab®.

3.2.1 Objetivo e justificativa

As atividades pertinentes à Etapa II tiveram como finalidade principal o desenvolvimento de uma plataforma computacional, capaz de servir como instrumento adequado para a obtenção de um projeto sistemático do sistema de controle climático da incubadora, visando à melhoria geral de seu desempenho, no campo da simulação do processo.

As atividades se constituíram em interpretar e analisar a modelagem da incubadora, conduzida na etapa metodológica anterior e seus complementos. Acrescentaram-se elementos

que fazem referência a alguns conceitos e princípios da área de transferência de calor e massa, particularmente no entendimento da interação que ocorre entre os ovos e o ambiente da incubadora. Também foram acrescentados elementos referentes à área de inteligência artificial, tratando-se especificamente do desenvolvimento do sistema de controle, com uso da inferência *fuzzy*.

A simulação computacional se traduziu na obtenção de soluções, para as equações que representaram a incubadora e as interações que existem entre esta e os ovos, com significativos efeitos no desenvolvimento embrionário, quando do processo físico real. Foi adotada a simulação como procedimento metodológico pelo reconhecimento de sua praticidade, rapidez, versatilidade, custo operacional reduzido e elevada segurança.

3.2.2 Arquitetura e elementos da simulação

A descrição da arquitetura de controle e simulação, proposta para o presente estudo, requer o esclarecimento sobre algumas terminologias que foram utilizadas, conforme as definições de OGATA (2003).

O sistema sob estudo, denominado incubadora, caracterizou-se por um conjunto de componentes atuadores que executaram ações de maneira integrada, com o objetivo de modificar as condições ambientais para incubação dos ovos. O processo estudado foi o da incubação de ovos em estágio único. Tal processo foi caracterizado por uma série de modificações graduais nas condições ambientais da incubadora, com o objetivo de se obter condições de referência para a temperatura da casca e para a massa dos ovos, ao longo do período de 18 dias de incubação.

O sistema de controle, alvo central do presente trabalho, se constituiu de uma combinação de diferentes componentes, com destaque para o sistema de inferência *fuzzy*. O sistema de inferência *fuzzy* desenvolvido, representado pela aplicação de técnicas da teoria dos conjuntos *fuzzy*, foi responsável pela orientação das ações de controle no processo.

As variáveis de maior interesse controladas no estudo foram: temperatura da superfície de casca dos ovos (Tovo) e a massa dos ovos (Movo). As variáveis manipuladas, que

se constituíram em grandezas modificadas pelo controlador, para afetar o valor das variáveis controladas, foram: temperatura do ar no interior da incubadora (T_{inc}) e a umidade relativa do ar (UR_{ar}).

Os distúrbios foram caracterizados como os elementos que afetaram o valor das variáveis de interesse, neste caso, consideraram-se a produção de calor embrionária sensível e latente e suas características de permeabilidade e condutância térmica, além das condições ambientais do ar da sala de incubação, referente ao ambiente externo à incubadora.

Realizou-se um controle com realimentação, também denominado de malha fechada. Desta forma, as operações de controle foram realizadas, mesmo com a presença dos distúrbios, sempre com a tendência de minimizar continuamente o erro, existente entre os valores obtidos da temperatura da casca dos ovos (T_{ovo}), massa dos ovos (M_{ovo}) e os valores das entradas de referência, neste caso, *set point* da temperatura dos ovos ($SP_{T_{ovo}}$) e *set point* da massa dos ovos ($SP_{M_{ovo}}$). A Figura 7 mostra um esquema dos principais elementos da simulação.



Figura 7. Principais elementos e características da simulação computacional do estudo

No processo metodológico de desenvolvimento da arquitetura de simulação desenvolveram-se três sistemas considerados chaves para reprodução das condições reais da incubação, que contemplaram três elementos principais, sendo: 1) incubadora, a qual foi representada por um conjunto de modelos matemáticos; 2) interação entre os ovos e o

ambiente, baseado nos princípios da transferência de calor e massa; 3) sistema de controle *fuzzy*, baseado nos conceitos da lógica *fuzzy*. Depois de estabelecidos de forma individual, houve uma integração múltipla dos elementos, que proporcionou obter o modelo final de simulação do processo. Na seqüência, apresentam-se detalhes relacionados aos três elementos chaves da simulação, acima citados.

1) Incubadora

De posse dos modelos matemáticos, representativos da dinâmica do processo de variação climática na incubadora e, traduzidos por um conjunto de equações, cuja solução representa uma aproximação para o seu comportamento, avaliaram-se distintos cenários operacionais de atuação na incubadora. Verificou-se, de forma aproximada, o comportamento das variáveis relativas ao ambiente na incubadora, representadas por TBS e TBU, sem a carga de ovos, sob a ação de diferentes perturbações e ações de controle, sem a necessidade de submeter o processo real a estas condições.

O principal desafio relacionado ao estabelecimento do modelo da incubadora, para se desenvolver a simulação, consistiu em definir a melhor estrutura de controle para o processo, cuja característica é de um sistema multivariável.

Dentro do ambiente Simulink/Matlab[®], a linguagem de programação utilizada foi gráfica, em forma de blocos, e desta forma, a Figura 7 apresenta o diagrama de blocos característico do elemento relativo à incubadora, usado na arquitetura da simulação, cujas funções de transferência $G_{21}(s)$ e $G_{12}(s)$ representam as interações entre a temperatura e umidade relativa do ar.

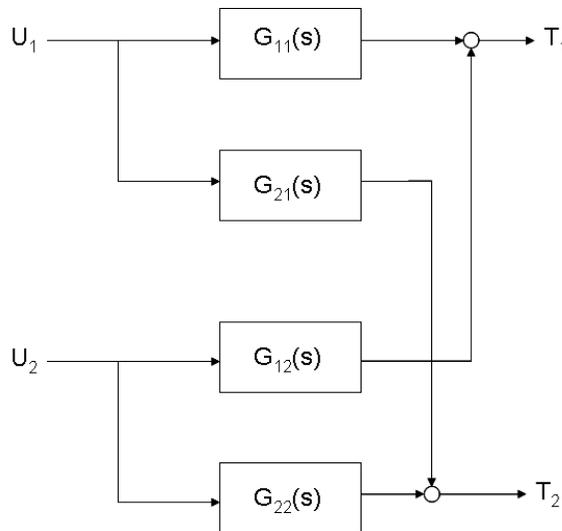


Figura 8. Diagrama de blocos característico da incubadora como sistema multivariável

2) Interação entre ovos e ambiente:

Para simular a interação entre os ovos e o ambiente, pelo processo de transferência de calor (INCROPERA et al., 2008), a consideração inicial foi, sob o ponto de vista de engenharia, reconhecer que se tratava de um problema dependente do tempo, o que o caracterizou em uma condição de regime não-estacionário, ou transiente, com as condições de contorno alteradas constantemente.

O desafio se constituiu em desenvolver um procedimento capaz de determinar a dependência da distribuição da temperatura do ovo no tempo, e ao mesmo tempo, determinar a transferência de calor entre o ovo e o ambiente ao seu redor, baseando-se nas informações apresentadas por FRENCH (1997, apud ROMIJN e LOKHORST, 1960) e LOURENS et al. (2006), conforme Figura 8, relativas à produção de calor metabólico no desenvolvimento embrionário ao longo dos 18 dias de incubação. Dessa forma, conhecia-se à princípio, a temperatura do ovo, em função, única e exclusivamente, de sua geração de calor interno.

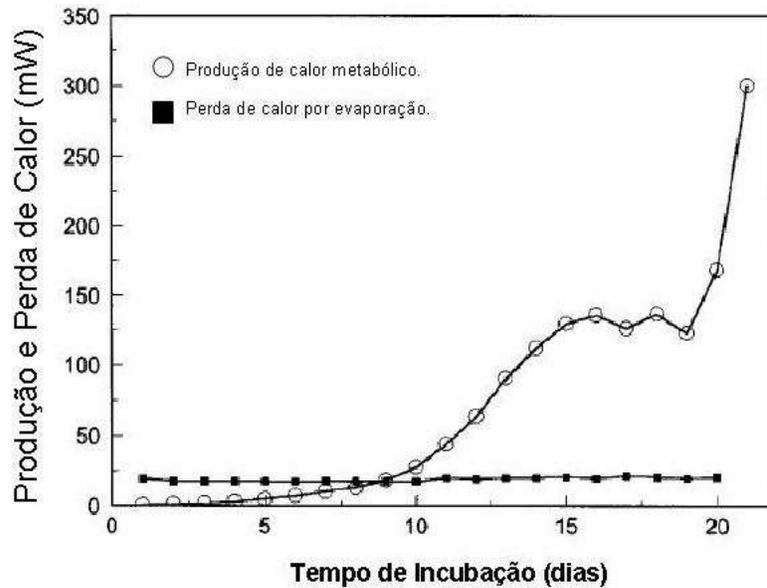


Figura 9. Produção de calor metabólico e perda de calor por evaporação de um ovo durante a incubação. (Adaptado de French, 1997).

Como a natureza do procedimento de incubação está diretamente relacionada às considerações e conhecimentos acerca deste processo, foi necessário que se adotassem algumas simplificações, para se trabalhar com o ovo no campo da simulação computacional. Desta forma, os gradientes de temperatura no interior do ovo foram totalmente desprezados. Tal condição também foi considerada, baseando-se nas informações da literatura (TAZAWA e NAKAGAWA, 1985), que encontraram que, a temperatura medida na casca, pode ser assumida como a temperatura do embrião, conforme validação publicada por FRENCH (1997) (Figura 9).

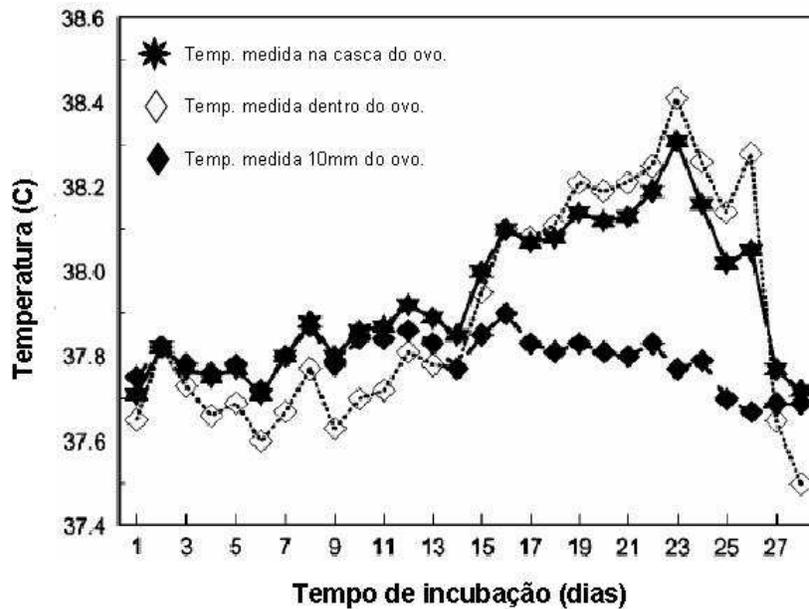


Figura 10. Temperatura de ovos de perus incubados a 37,5 °C (Adaptado de French (1997)).

Assumiu-se que a transferência de calor por radiação é pequena, pois todas as superfícies dentro da máquina de incubação possuem temperaturas muito próximas, dentro de um intervalo entre 1 e 2 °C, acima ou abaixo da temperatura de superfície dos ovos. FRENCH (1997, apud KASHKIN, 1961). Portanto, definiu-se que o método principal de transferência de calor, no caso da interação entre ovo e ambiente da incubadora, ocorre por convecção forçada.

As simplificações utilizadas possibilitaram, no campo da transferência de calor, o uso do método denominado capacidade concentrada, para se determinar a variação da temperatura do ovo com o tempo. A essência deste método esteve fundamentada na consideração de que a temperatura do ovo é espacialmente uniforme em qualquer instante de tempo, durante o processo de transferência do calor.

Ao se desprezar os gradientes de temperatura no ovo, o problema deixou de ser enquadrado na equação característica de calor e a resposta transiente da temperatura foi determinada pela formulação de um balanço global de energia no ovo, que relacionou a taxa da perda de calor, na superfície do ovo, por processo convectivo e a variação da energia interna do ovo. O procedimento adotado significou representar o volume do ovo como um sistema de conservação de energia, conforme Figura 10.

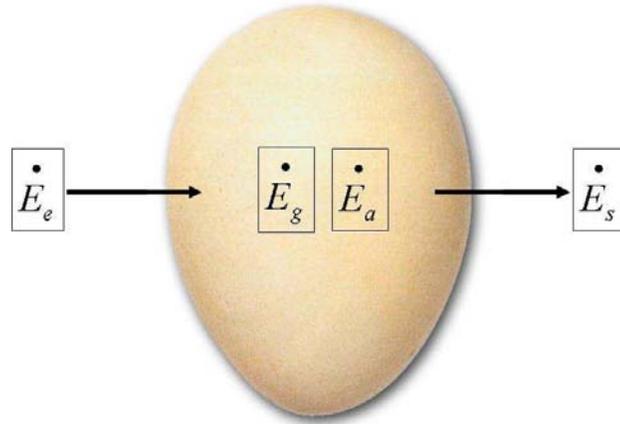


Figura 11. Aplicação da conservação de energia para o volume de controle de um ovo, em um determinado instante de tempo.

Matematicamente, a relação de conservação de energia apresentada na Figura 10, assumiu a forma da Equação 5, quando utilizada para um intervalo de tempo Δt .

$$E_e + E_g - E_s = \Delta E_a \quad (\text{Equação 5})$$

Pela relação da Equação 5, considerou-se que as quantidades de energia que entram e são geradas, atuam de forma a aumentar a energia armazenada no interior do ovo, enquanto que a energia que sai, atua de forma inversa, ou seja, diminuir a energia armazenada. A transição de energia é um fenômeno que ocorre na superfície do ovo, sendo ainda proporcional à área da superfície do ovo.

Aplicaram-se, ao balanço geral de energia do ovo, as Equações 6 e 7, representando a transferência de calor por convecção, que ocorre na interface ovo-ambiente e a transferência de calor por condução, que ocorre no interior do ovo, respectivamente.

$$q'' = h * A_s * (T_{ovo} - T_{ambiente}) \quad (\text{Equação 6})$$

$$Q = \rho * V * c * \left(\frac{dT}{dt}\right) \quad (\text{Equação 7})$$

Efetuando-se as integrações necessárias a partir de uma condição inicial de tempo $t = 0$ e $T(0) = T_i$, obtiveram-se as Equações 8 e 9, utilizadas para calcular a temperatura alcançada pelo ovo em um determinado tempo, a partir da interação com a temperatura ambiente da incubadora e a variação da energia interna proporcionada ao ovo, respectivamente.

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp\left[-\left(\frac{h * A_s}{\rho * V * c}\right) * t\right] \quad (\text{Equação 8})$$

$$Q = (\rho * V * c) * \theta_i * \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)\right] \quad (\text{Equação 9})$$

onde,

$$\tau_i = \left(\frac{1}{h * A_s}\right) * (\rho * V * c) \quad (\text{Equação 10})$$

Os valores dos parâmetros considerados para efetuação dos cálculos forma obtidos na literatura da área e são apresentados de forma simplificada na Tabela 6.

Tabela 6. Valores adotados para cálculos dos principais parâmetros da interação entre ovo e ambiente da incubadora

<i>Descrição do item</i>	<i>Valor adotado</i>	<i>Unidade</i>
Calor específico do ovo (c)	3900	J / kg K
Coeficiente convectivo (h)	20	W / m ² K
Área do ovo (A _s)	7900*10 ⁻⁶	m ²
Volume do ovo (V)	6*10 ⁻⁶	m ³
Número de ovos (n)	61920	unidades
Massa de ar na incubadora	25	kg
Calor específico do ar	1000	J / kg K

O elemento responsável pela interação entre o ovo e ambiente, utilizado para desenvolver a simulação no ambiente Simulink/Matlab[®], configurou-se como um bloco, em que foram inseridas as equações matemáticas, anteriormente apresentadas.

Já o processo de transferência de massa entre o ovo e o ambiente da incubadora, ocorre devido a uma diferença de concentração do vapor d'água nos dois ambientes. O gradiente da concentração é o responsável por fornecer potencial, para que a transferência do

vapor d'água ocorra. As equações utilizadas para tal procedimento são análogas aquelas apresentadas para a transferência de calor por convecção.

3) Sistema de controle *fuzzy*

A princípio, poderia se fazer uso de qualquer tipo de sistema de controle, para melhorar as condições operacionais, especialmente as condições climáticas, nas incubadoras de ovos. Contudo, um sistema de controle *fuzzy*, como parte dos chamados sistemas inteligentes, são capazes de fornecerem respostas apropriadas à situações específicas do problema, em função de uma determinada entrada.

Como a solução para os problemas específicos da incubação, muitas vezes são desconhecidos, ou então, depende do conhecimento especialista dos operadores das incubadoras, usou-se a lógica *fuzzy* para se incorporar o raciocínio humano e a imprecisão, para inferir conclusões ao processo.

Dois sistemas de inferência *fuzzy*, com funções distintas, foram construídos. O primeiro deles, foi o responsável por gerar os valores de referência para a temperatura ambiente da incubadora (Tinc), a partir da diferença obtida entre os valores da temperatura de casca dos ovos (Tovo) e sua referência (SP Tovo). Não existe conhecimento preciso disponível na literatura corrente, em relação às condições ideais de operação da incubadora, quando se considera o ovo como um elemento ativo do sistema de controle, especialmente para o controle da massa dos ovos.

O procedimento adotado consistiu em se estabelecer um intervalo de confiança para a temperatura do ambiente, cuja variação fosse aceitável, do ponto de vista dos seus efeitos finais no sucesso da incubação. Mais do que isso, provocou-se uma relação entre a temperatura do ambiente da incubadora e a temperatura experimentada pelo embrião, tendo como base um sistema de inferência *fuzzy*.

O segundo sistema de inferência *fuzzy* desenvolvido se caracterizou como um controlador das condições climáticas do ambiente na incubadora e, considerou principalmente, conhecimentos vagos e imprecisos acerca da mistura psicrométrica do ar. Estabeleceu-se uma implicação *fuzzy* entre a condição de referência e os valores medidos, para as variáveis temperatura e umidade relativa do ar na incubadora.

A estrutura escolhida para se desenvolver o sistema de controle *fuzzy*, para as condições climáticas da incubadora, foi a de um controlador *fuzzy* proporcional integral, também denominado *fuzzy* PI, conforme Figura 11.

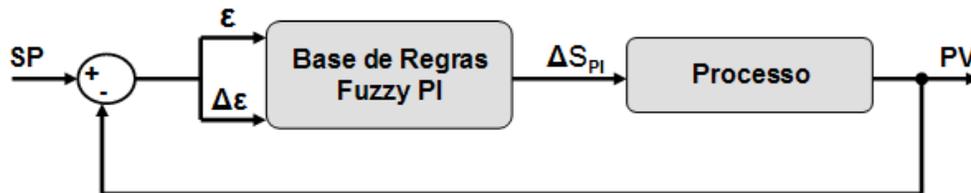


Figura 12. Estrutura geral do controlador *fuzzy* PI utilizado.

O desenvolvimento do projeto de ambos os sistemas *fuzzy*, acima citados, considerou a proposição de MANDANI (1974) com a presença de mecanismos de fuzzificação e defuzzificação. O modelo dos controladores desenvolvidos foi baseado em regras lingüísticas, condição que permitiu a incorporação das informações disponibilizadas na base de conhecimento do processo, de forma similar ao pensamento humano.

Na seqüência, ocorreu a definição dos conjuntos *fuzzy*, pela determinação das funções de pertinência correspondentes ao intervalo, que os valores das variáveis de entrada e saída do sistema poderiam assumir. O passo seguinte consistiu na escolha do tipo apropriado de operação do sistema de controle *fuzzy*, especificamente da aplicação dos conectivos lógicos e dos operadores de implicação, além da definição de um conjunto de regras.

A base de conhecimento dos sistemas *fuzzy*, foi estabelecida por meio do uso do conhecimento prévio, que se obteve do modelo empírico da incubadora, obtido experimentalmente e, de forma complementar, com conhecimentos provenientes de especialistas do processo.

O método de defuzzificação utilizado no controlador foi o do centro de gravidade, devido principalmente à sua propriedade em fornecer saídas *fuzzy* que provocam ações suaves de controle.

Por se tratar de uma tarefa complexa, devido aos múltiplos ajustes simultâneos necessários, a simulação referente aos sistemas de controle *fuzzy* foram desenvolvidas em um processo iterativo de tentativa e erro, para efeito de sintonia dos controladores. A medida que foram identificadas possibilidades de minimização do erro, devido a um desempenho

insatisfatório, a sintonia dos controladores foram realizadas por modificações nas funções de pertinência dos valores de entrada e saída do sistema. Em situações que se fizeram necessárias, foram providenciadas alterações no conjunto de regras, que dão suporte ao mecanismo de inferência do controlador.

Cada alteração provocada na configuração dos controladores, foi seguida por um teste via simulação, para observação do novo comportamento do processo, frente à estratégia de controle aplicada.

3.2.3 Validação computacional do sistema de controle

A validação dos controladores, bem como do modelo de simulação integral proposto, foi realizada por meio da verificação e análise dos critérios de desempenho, característico de um sistema de controle por métodos qualitativos e quantitativos do comportamento das variáveis do processo, além de indicadores de desempenho do processo de incubação, quando comparados às informações da literatura.

As análises quantitativas corresponderam à observação geral do comportamento das variáveis controlada e manipulada do processo. As análises qualitativas corresponderam às características de desempenho, especificadas em termos e grandezas no domínio do tempo, como tempo de atraso, tempo de subida, instante do pico, sobre-sinal máximo e tempo de acomodação. Foram ainda analisados os valores representativos do desenvolvimento embrionário obtidos via simulação e comparou-se com as exigências de desempenho disponíveis na literatura.

A partir da observação desses parâmetros, procedeu-se uma breve reflexão dos resultados obtidos computacionalmente, com demais tipos de sistema de controle atualmente praticados em incubadoras de estágio único.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item da dissertação são apresentados os principais resultados obtidos no presente estudo, considerando-se a aplicação da metodologia anteriormente descrita e apresentada. Procurou-se evidenciar os resultados obtidos, sejam estes favoráveis ou não ao que se propôs, de acordo com uma perspectiva do que se esperava obter. Considera-se que a apresentação e descrição dos resultados obtidos se constituem na maior contribuição que o presente estudo pode fornecer ao tema explorado. Desta forma, à medida que se faz uma referência ao procedimento metodológico adotado, apresentaram-se os resultados mais importantes e, ao mesmo tempo, foram feitas discussões baseando-se nos conhecimentos prévios, especialmente os disponíveis na literatura.

4.1 Comportamento Dinâmico Climático na Incubadora

Assim como descrito na metodologia experimental, o procedimento inicial para realização do estudo consistiu em identificar o comportamento dinâmico da incubadora, sem a carga de ovos. Os ensaios realizados na incubadora foram resumidamente apresentados na Tabela 5 e, posteriormente, detalhados na descrição da metodologia. Registrou-se o comportamento das variáveis temperaturas de bulbo seco (TBS) e bulbo úmido (TBU) ao longo do tempo. Foram feitas transformações nos valores das variáveis obtidas, como por exemplo, a conversão de unidades das temperaturas de Fahrenheit para Celsius e o cálculo dos valores de umidade relativa no interior da incubadora, aplicando-se equações psicrométricas apropriadas.

Os resultados gráficos, obtidos para as curvas de resposta das variáveis de interesse, condicionadas à excitação dos elementos atuadores da incubadora, operada sem a presença de um sistema de controle (malha aberta), estão apresentados na seqüência.

As Figuras 13 e 14 apresentam as reações da temperatura e umidade relativa do ar na incubadora, respectivamente, ao longo do tempo, quando a resistência de aquecimento foi manipulada. Para construção das Figuras 13 e 14 utilizou-se a curva de resposta característica do sistema a uma potência de atuação de 30%, uma vez que, durante a repetição dos ensaios

para outro valor de potência, houve interferência externa no processo e os resultados foram influenciados e, por consequência, descartados.

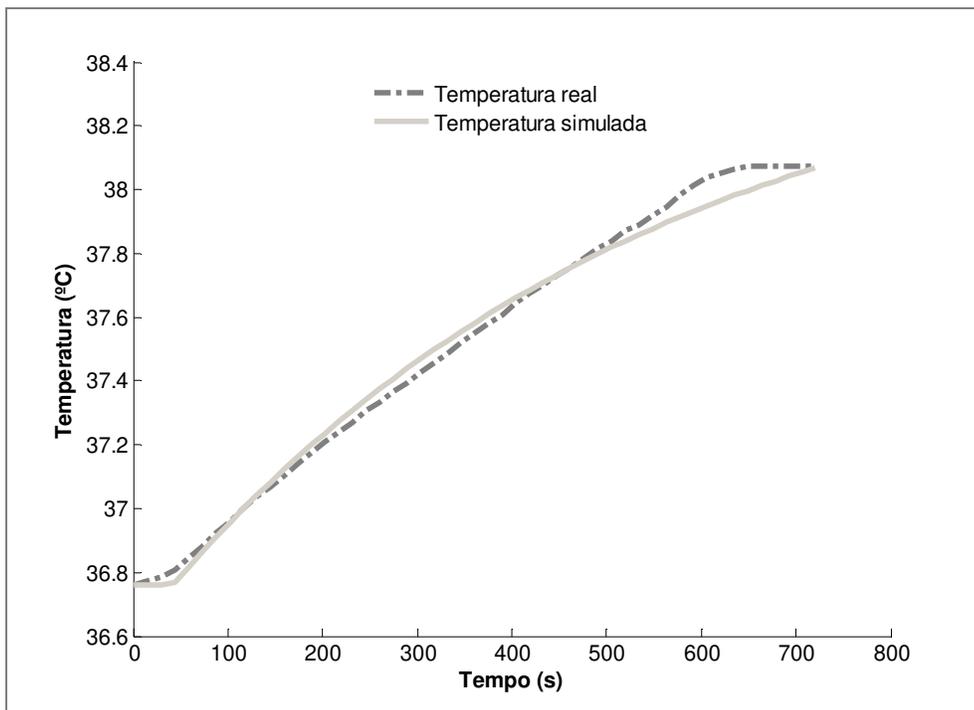


Figura 13. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da temperatura de bulbo seco para uma excitação na atuação da resistência de aquecimento.

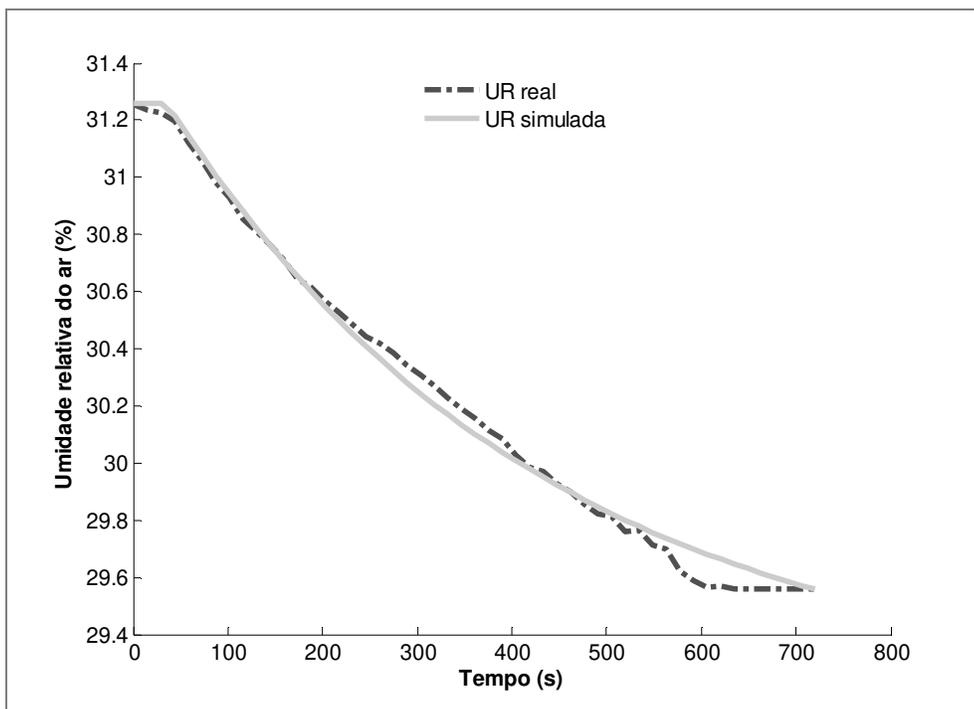


Figura 14. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da umidade relativa do ar para uma excitação na atuação da resistência de aquecimento.

Os resultados apresentados nas Figuras 13 e 14 permitiram, a princípio, inferir a capacidade de elevação da temperatura ambiente na incubadora, sem a carga de ovos, com o uso do sistema de aquecimento.

De forma análoga, porém, com um comportamento inverso ao comportamento de reposta ao aquecimento, apresenta-se nas Figuras 15 e 16, os resultados gráficos obtidos das reações das variáveis ambientais, à manipulação na atuação da serpentina, considerado o elemento predominante do sistema de resfriamento da incubadora.

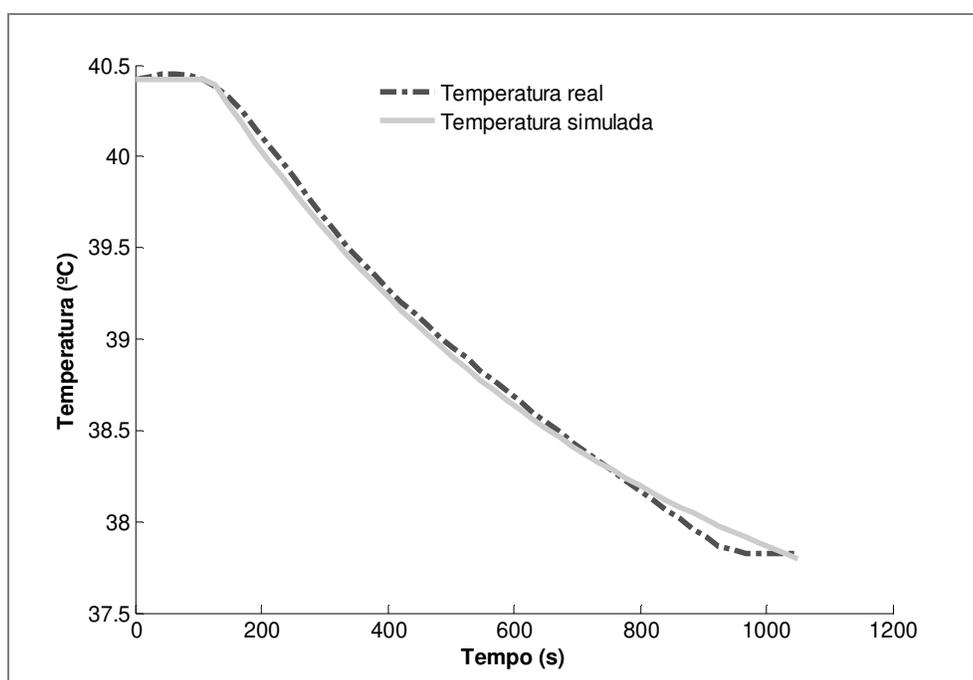


Figura 15. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da temperatura de bulbo seco para uma excitação na atuação da serpentina de resfriamento.

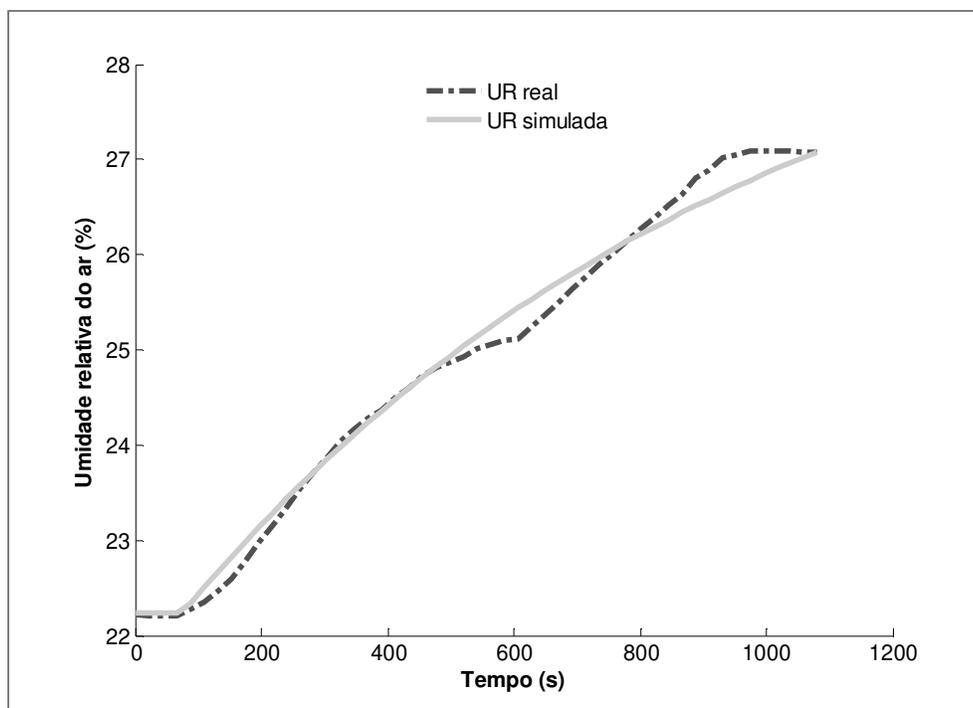


Figura 16. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da umidade relativa do ar para uma excitação na atuação da serpentina de resfriamento.

Efetuarão-se três repetições de identificação da dinâmica da incubadora para o sistema de resfriamento. Os resultados gráficos, apresentados nas Figuras 15 e 16, correspondem à apenas um dos ensaios experimentais conduzidos. Os demais ensaios tiveram comportamentos similares.

Com a identificação das respostas dinâmicas da temperatura e umidade relativa do ar para perturbações nos sistema de aquecimento e resfriamento da incubadora, criou-se um conhecimento inicial das prováveis capacidades e limitações operacionais da incubadora para efeito do controle da temperatura de casca dos ovos, sendo esta considerada a variável com maior capacidade de influência nos resultados de incubação, de acordo com CALIL (2007).

Complementarmente, foram obtidos os resultados da dinâmica ambiental da incubadora, frente às atuações nos mecanismos de umidificação e desumidificação. Tais condições estão relacionadas, primariamente, ao controle da massa dos ovos, variável esta que atua secundariamente à temperatura, para garantir o sucesso da incubação. CALIL (2007) considerou que a principal variável de influência física na incubação é a temperatura e que as demais variáveis, como umidade relativa do ar, agem de forma complementar. As Figuras 17 e

18 apresentam as curvas de reação das condições climáticas da incubadora, para perturbações na atuação do bico aspersor de umidificação do ambiente.

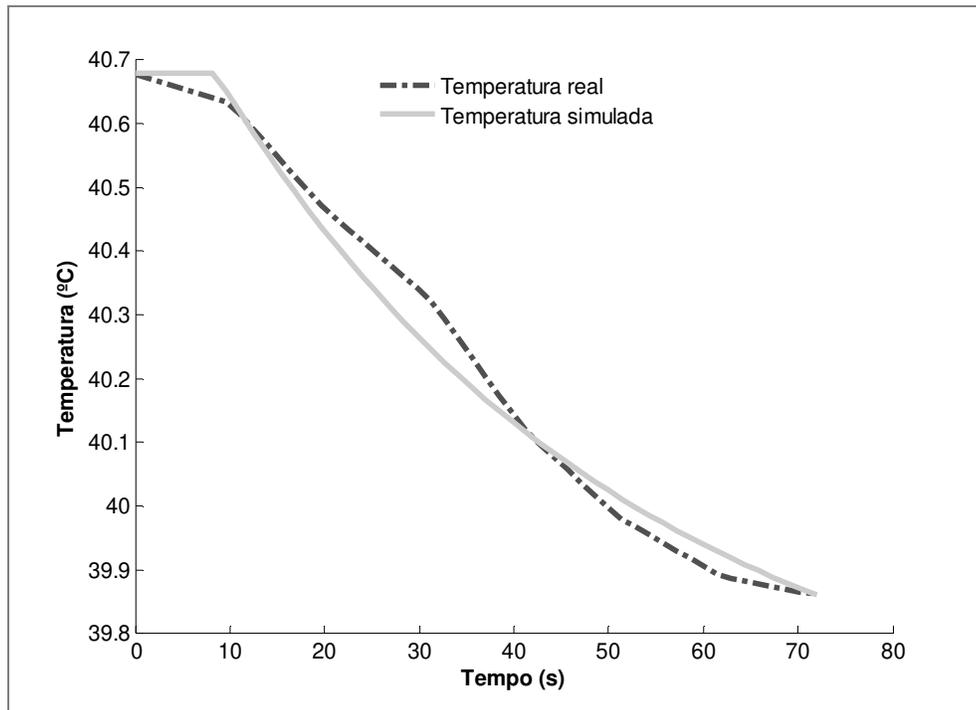


Figura 17. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da temperatura de bulbo seco para uma excitação na atuação do bico aspersor de umidificação.

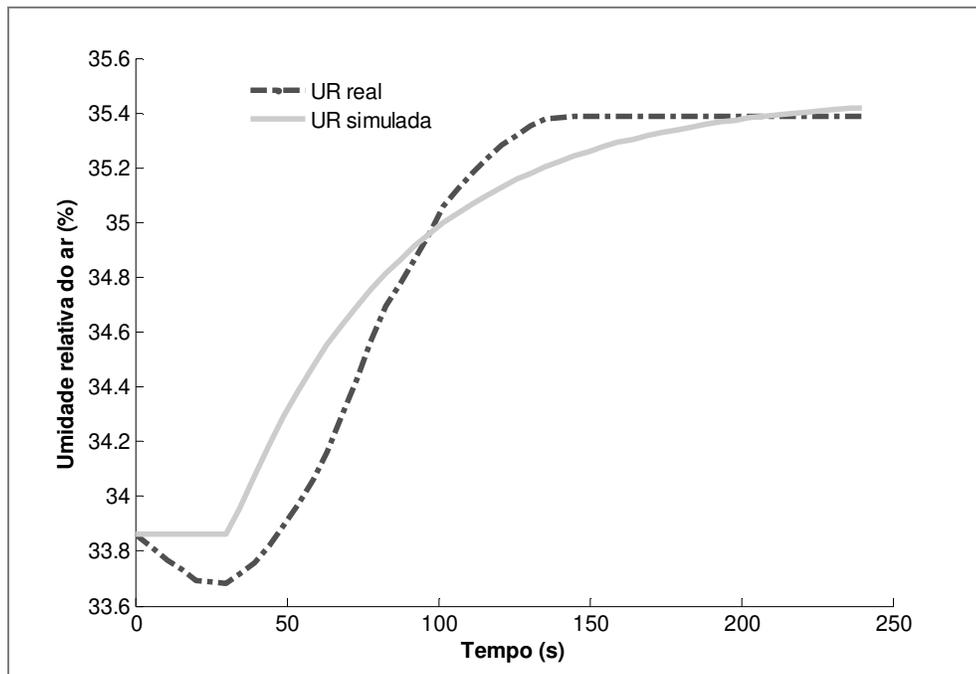


Figura 18. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da umidade relativa do ar para uma excitação na atuação do bico aspersor de umidificação.

As Figuras 19 e 20 correspondem aos resultados da temperatura do ar e umidade relativa do ar em função da variação na atuação do aparelho desumidificador do ambiente.

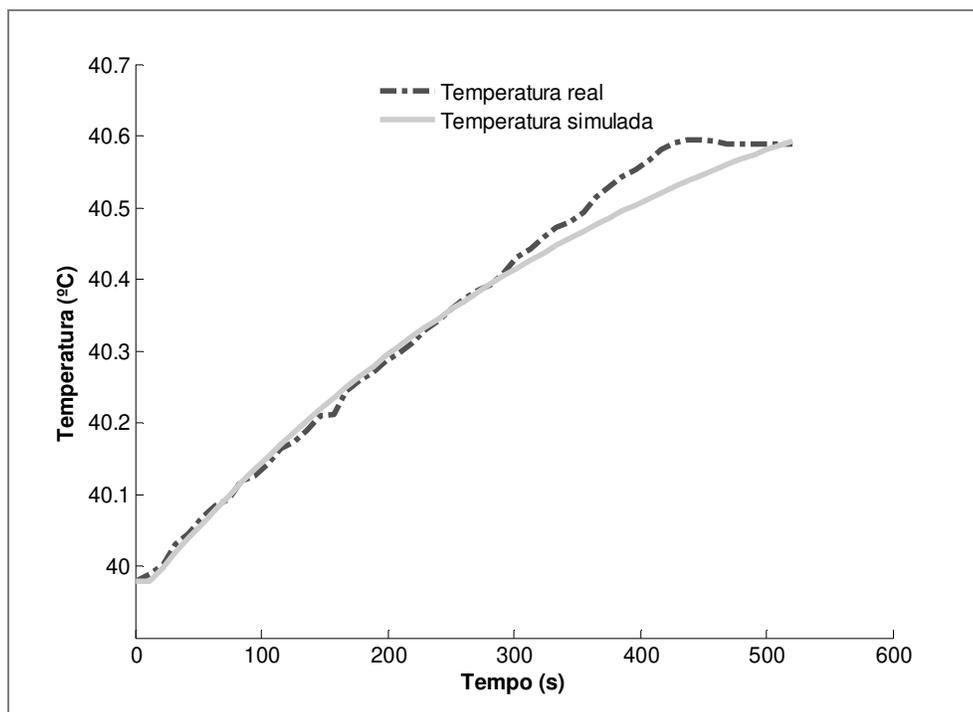


Figura 19. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da temperatura de bulbo seco para uma excitação na atuação do desumidificador.

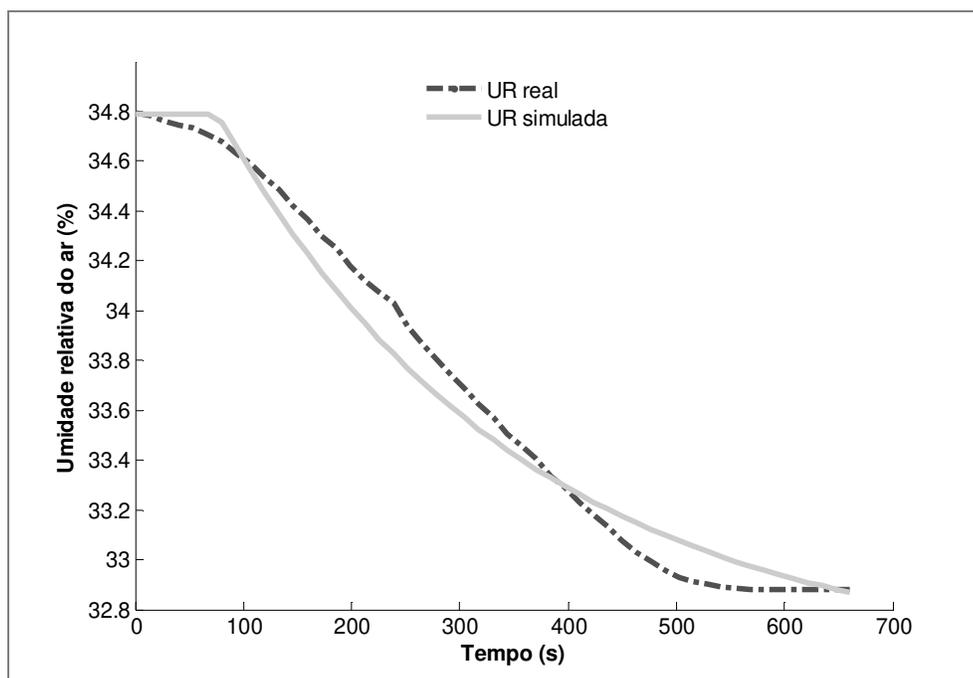


Figura 20. Curvas de respostas (experimental e de ajuste) da umidade relativa do ar para uma excitação na atuação do desumidificador.

Em situações de operação da incubadora, quando existe a necessidade de se elevar a concentração de oxigênio, no ar da incubadora, apela-se, para o uso da renovação forçada de ar. De forma complementar, o mecanismo de renovação de ar auxilia o controle ambiental. Para tanto, faz-se uso do elemento atuador, denominado de soprador de ar.

Considerando-se tal necessidade, avaliou-se a capacidade de influência da atuação do soprador nas condições ambientais da incubadora. Os resultados da dinâmica, obtidos experimentalmente, estão apresentados nas Figuras 21 e 22.

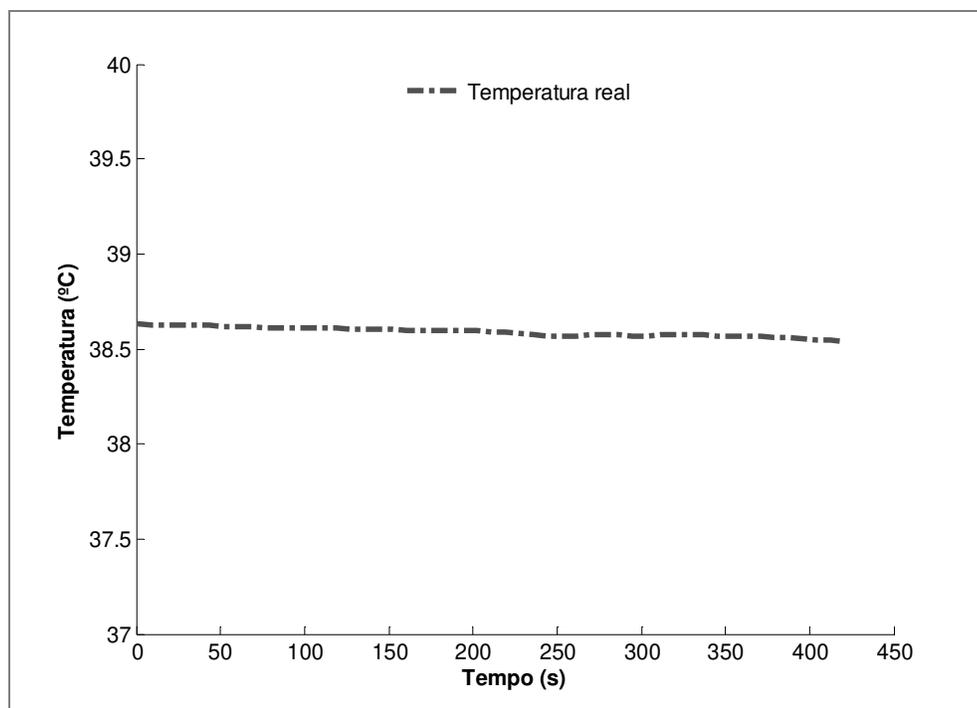


Figura 21. Curva de resposta experimental da temperatura de bulbo seco para uma excitação na atuação do soprador.

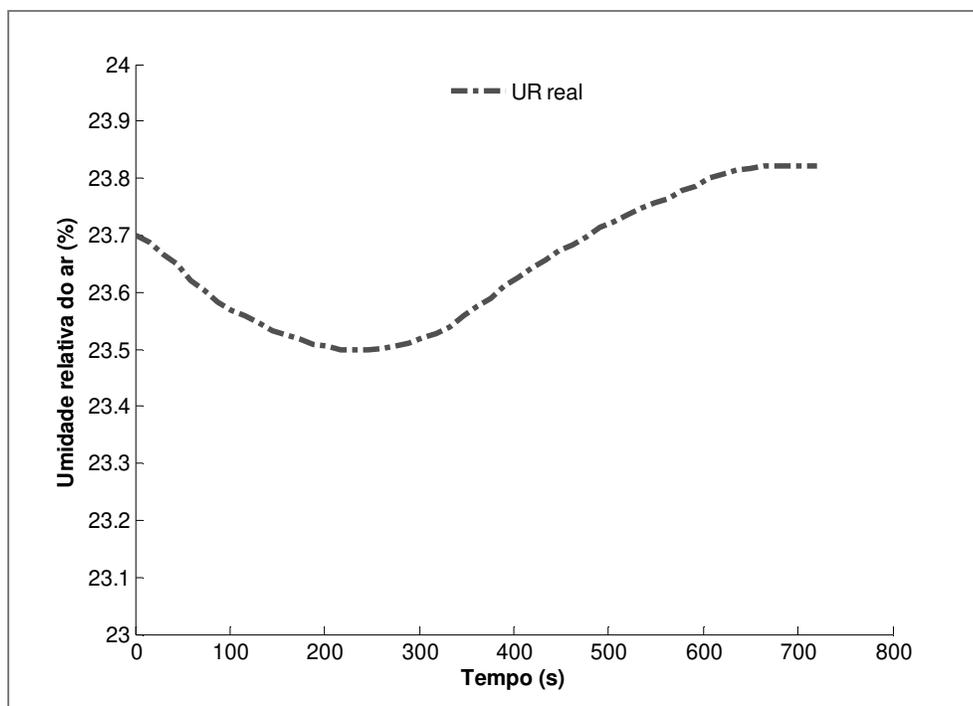


Figura 22. Curva de resposta experimental da umidade relativa do ar para uma excitação na atuação do soprador.

Por fim, se estabeleceram os valores das respostas dinâmicas da temperatura e umidade relativa do ar, em função de variações no ângulo de abertura dos *dampers*. Apresenta-se nas Figuras 23 e 24, os resultados obtidos dos ensaios da variação negativa no ângulo de abertura do *damper*, passando do nível máximo (90°) até o nível mínimo (0°), que correspondeu ao fechamento da abertura de contato com o ar da sala de incubação.

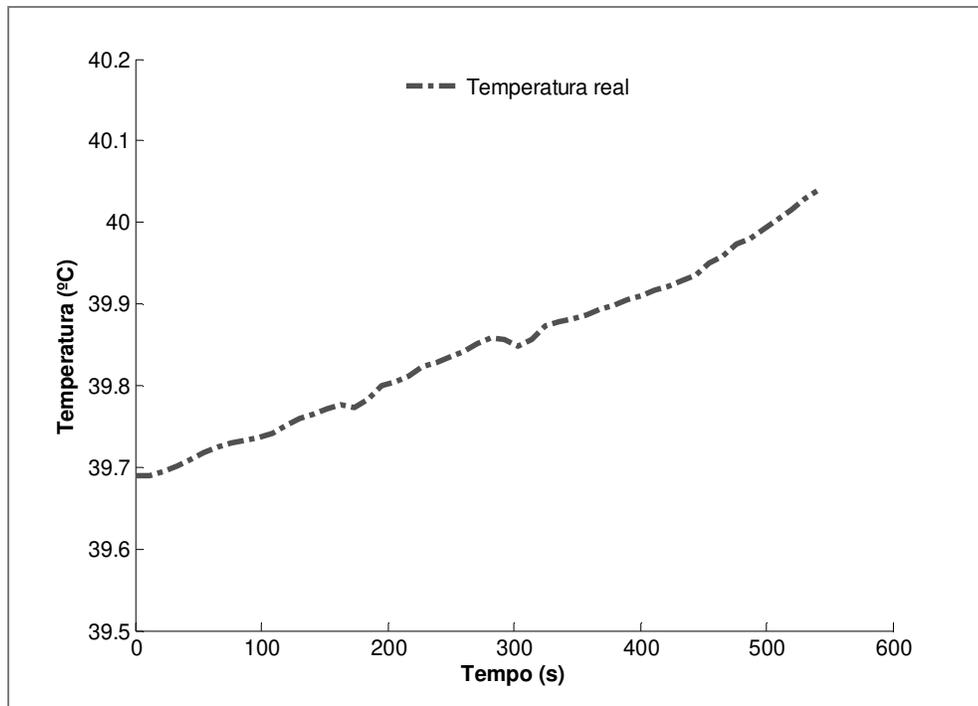


Figura 23. Curva de resposta experimental da temperatura de bulbo seco para uma excitação na atuação de fechamento do *damper*.

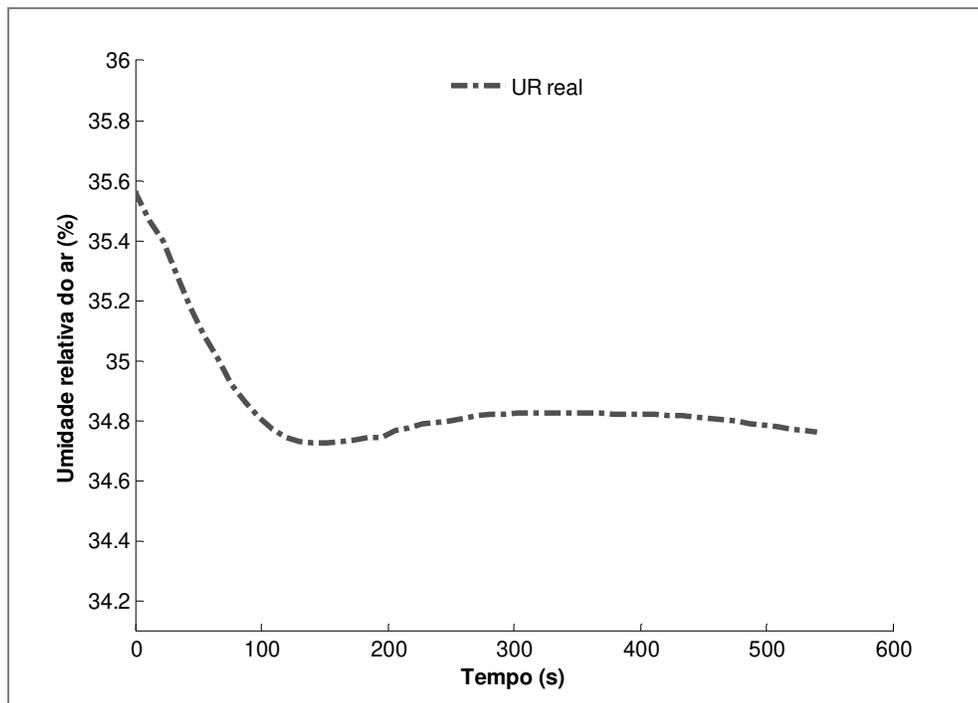


Figura 24. Curva de resposta experimental da umidade relativa do ar para uma excitação na atuação de fechamento do *damper*.

Também foram conduzidas repetições destes ensaios, para ângulos distintos de abertura dos *dampers*. No entanto, os resultados obtidos foram semelhantes aos resultados apresentados nas Figuras 22 e 23.

Analisando-se os resultados obtidos e apresentados, conforme as Figuras de 12 até 23, nota-se diferenças na magnitude dos efeitos de cada elemento atuador, sobre as variáveis de interesse. Quando se compara, simultaneamente, as variações provocadas, na temperatura do ar e na umidade relativa do ar, percebe-se que as atuações do soprador e da área de abertura dos *dampers* apresentaram magnitudes poucos expressivas. Perturbações no soprador não foram capazes de variar a temperatura em um décimo do valor inicial e a umidade, pouco mais de três décimos. O mesmo tipo de avaliação pode ser feito a atuação dos *dampers*, com uma eficiência ligeiramente superior, especialmente para a umidade.

Tais resultados foram interpretados como uma situação inesperada e, por consequência, atribui-se a esses elementos, a característica de elementos de distúrbio pouco significativos no modelo. Considerou-se, a partir de então, a exclusão dos efeitos da atuação dos *dampers* e soprador, sobre as respostas do estudo, sendo excluídos da modelagem matemática. Fundamentalmente, as atuações nos elementos aqui excluídos (soprador e *dampers*), se dão por necessidades e características da qualidade do ar na incubadora. Tal fato reforçou a idéia da exclusão dos elementos por medidas de simplificação, uma vez que não foi objeto de estudo avaliar e controlar o nível de O₂ e CO₂ na incubadora, embora estes sejam parâmetros importantes de controle no processo de incubação.

MEIJERHOF (2007) apontou a demanda de ar fresco para suprir a necessidade de oxigênio (O₂) de um embrião é de aproximadamente 0,07 m³/h/kg. VAN GOLDE et al. (1998) demonstraram que na metade da incubação a disponibilidade de O₂ foi um fator limitante para o desenvolvimento do embrião. LOURENS et al. (2007) encontraram que níveis abaixo de 15% podem ser letais, e sua influência é maior nos últimos dias da incubação onde o ovo precisa de mais oxigênio.

4.2 Modelos Matemáticos Simplificados da Incubadora

Durante os ensaios experimentais foram conduzidas algumas repetições dos procedimentos de teste. A partir das configurações das respostas, ao longo do tempo, das variáveis ambientais na incubadora, considerando-se as repetições efetuadas, foram determinadas as funções de transferência características da planta para cada situação do ensaio experimental apresentado na Tabela 5. Desta forma, foi obtido um conjunto de modelos matemáticos da incubadora, conforme Equação 4, anteriormente apresentada. Os resultados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Valores dos parâmetros de identificação dos sistemas, obtidos experimentalmente, de acordo com o caso estudado (Figura 6).

Elementos de atuação	Saídas	Valores dos parâmetros		
		Ganho (K)	Constante de tempo (τ), em segundos	Tempo morto (θ), em segundos
Resistência	<i>Temperatura</i>	6	522	41
	<i>Umidade</i>	-7	396	35
Serpentina	<i>Temperatura</i>	-3,5	672	120
	<i>Umidade</i>	7,2	900	73
Umidificador	<i>Temperatura</i>	-1,1	43,8	8
	<i>Umidade</i>	1,6	57	30
Desumidificador	<i>Temperatura</i>	0,9	420	12
	<i>Umidade</i>	-2,2	282	75

Os modelos obtidos para cada situação específica do estudo, cujos parâmetros foram mostrados na Tabela 6, são considerados tipo caixa-preta, pois o interesse em avaliá-los está nas relações existentes entre os atuadores (entradas) e o ambiente (saídas) na incubadora e, não propriamente dito, no mecanismo interno do mesmo.

Os valores médios dos parâmetros da Tabela 6, característicos de um sistema de 1ª ordem com atraso, foram obtidos pelo método de ajuste das curvas, entre os valores reais e simulados, das variáveis de interesse. Contudo, embora repetições tenham sido conduzidas para eliminação do erro experimental, não foram conduzidos para todos os casos, ciclos de variações positivas e negativas da variável manipulada, o que de certa forma, converge aos resultados uma representação, ainda que fiel ao sistema, não a considerada a mais propícia.

Analisando-se os resultados da Tabela 6, percebe-se que, a resistência possui os maiores valores em módulo de ganho do processo (K) para as condições de temperatura e umidade, o que significa que, o elemento de controle responsável pelo aquecimento, possui maior poder de influência, levando-se em consideração as respostas comportamentais da temperatura e umidade relativa do ar. Isso implica que, quando da necessidade de aquecimento do ambiente, faz-se a atuação sobre este elemento, porém com uma carga de atuação relativamente baixa, já que a intensidade dos efeitos é significativa.

A constante de tempo (τ) caracterizou o tempo, a partir do início da perturbação no elemento atuador, descontado o tempo morto (Θ), que as saídas levaram para atingir 63% da variação total, até entrar novamente no regime permanente. A atuação no elemento de umidificação apresentou os menores valores para este parâmetro considerando-se a temperatura e umidade. Tal resultado evidencia a rápida variação das variáveis controladas, quando água é jogada na incubadora por aspersão, tendo como efeito, um decréscimo na temperatura e elevação da umidade.

Os valores de tempo morto (Θ) do sistema representaram o tempo decorrido, a partir do início da perturbação nos elementos atuadores, que as variáveis de saída levam para reagir. Tal parâmetro, em cada situação estudada, esteve relacionado ao tempo necessário para que a perturbação transitasse dentro do processo e afetasse a temperatura e umidade do ar. Os resultados, mostrados na Tabela 6, apontam para a serpentina como o elemento de atuação com maior tempo morto, o que é perfeitamente justificável por se tratar de um sistema indireto de troca térmica, tipo trocador de calor.

Até o momento da obtenção dos resultados de identificação da dinâmica da incubadora, o sistema sob estudo, atuou como uma função, que a princípio, não se conhecia. Com as realizações dos ensaios experimentais, estabeleceu-se uma aproximação matemática, satisfatória para esta função, representada pelos modelos matemáticos da incubadora (Equação

4 com valores dos parâmetros da Tabela 6). Tal procedimento facilitou o entendimento da natureza do estudo e aumentou a sensibilidade em relação à escolha das condições mais propícias de operação da incubadora, quando do estabelecimento da base de conhecimento das estratégias de controle.

4.3 Sistemas de Inferência *fuzzy*

Assim como descrito na metodologia do presente estudo, foram utilizados dois sistemas de inferência *fuzzy* com objetivos distintos. Ambos os resultados obtidos, para a configuração dos sistemas, são apresentados e discutidos na seqüência.

4.3.1 Configuração de set point da incubadora

O primeiro dos sistemas *fuzzy* desenvolvidos foi responsável por gerar os valores de referência para a temperatura do ar na incubadora (SP Tinc), a partir dos valores obtidos entre a diferença (erro Tovo) existente nos valores medidos da temperatura da casca do ovo (Tovo) e o valor de *set point* (SP Tovo), além de sua derivada (derro Tovo). A Figura 25 apresenta a configuração geral do sistema *fuzzy* estabelecido. Tratou-se de um sistema do tipo Mandani com duas entradas e uma saída.

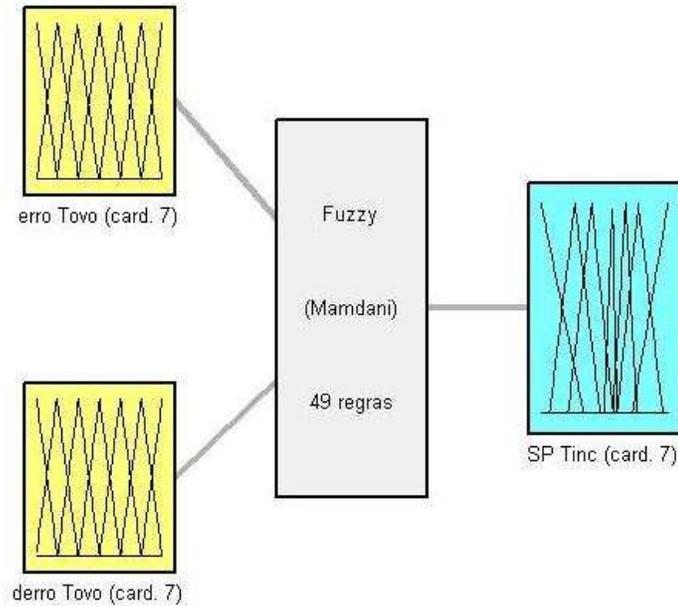


Figura 25. Estrutura do sistema *fuzzy* utilizado para gerar o valor de referência da temperatura do ambiente na incubadora.

As configurações finais das funções de pertinência são apresentadas nas Figuras 26 e 27. A Figura 26 corresponde às funções de pertinência dos valores de entrada do sistema, normalizadas para um intervalo do universo de discurso de -1 até 1. Tal configuração se ajusta as recomendações de YAGER e FILEV (1994) e JAGER (1995), para uso de universos de discurso normalizados para simplificação e unificação do projeto.

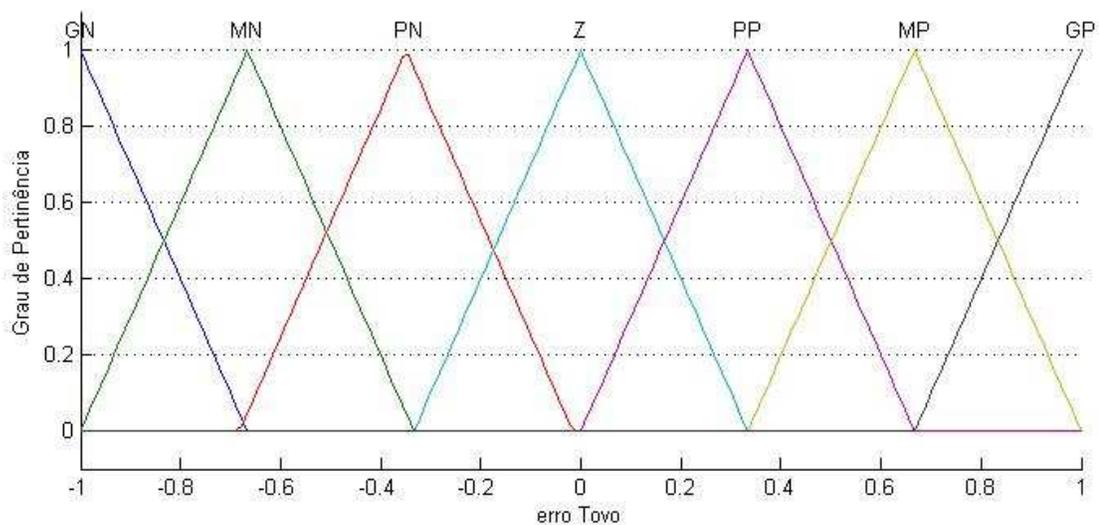


Figura 26. Configuração das funções de pertinência das variáveis de entrada do sistema *fuzzy*

A Figura 27 mostra a configuração final dos valores da saída do sistema *fuzzy*. Os valores, assumidos pelo universo de discurso de cada função de pertinência triangular, foram estabelecidos a partir do conhecimento especializado no processo, fundamentado pela literatura da área de incubação. Por exemplo, pelas conclusões de VAN BRECHT et al. (2003), de que a temperatura do ar na incubadora pode variar entre 36,7°C e 38,9°C.

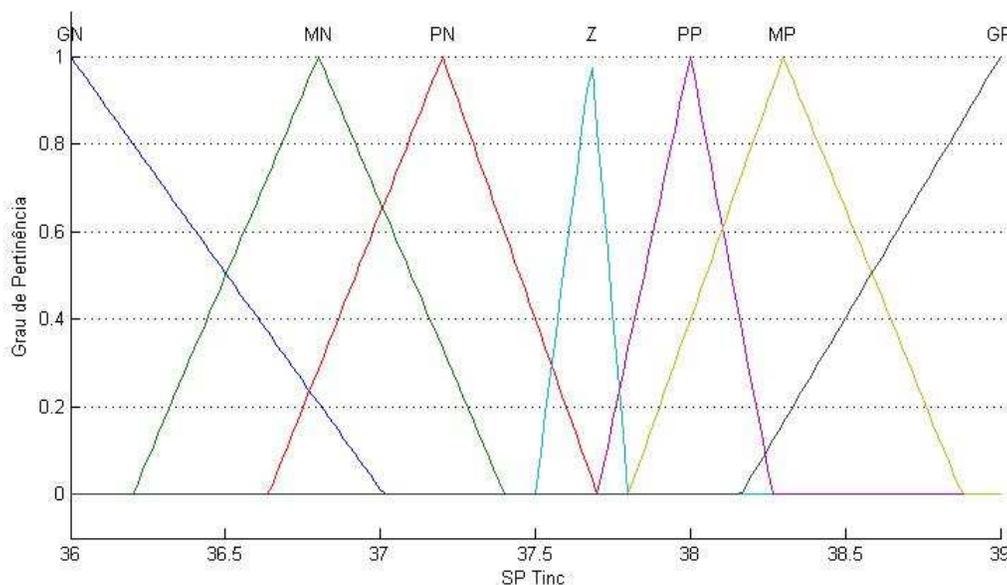


Figura 27. Configuração final das funções de pertinência da variável de saída do sistema *fuzzy*

Os resultados obtidos estão de acordo com as indicações práticas propostas por SHAW e SIMÕES (1999), em que o número de conjuntos *fuzzy* lingüísticos, cardinalidade próxima de sete, apresentaram maior precisão, porém, com uma demanda computacional mais significativa.

Os resultados finais obtidos para as funções de pertinência, mostrados nas Figuras 26 e 27, registram o uso de funções triangulares, concordando com a grande maioria dos sistemas *fuzzy*, devido principalmente à facilidade de manuseio e a velocidade de cálculo das áreas envolvidas no processo de defuzzificação, conforme enunciado por PEREIRA FILHO (1999).

A Tabela 8 apresenta matriz da base de regras que fundamentou a tomada de decisão utilizando o sistema *fuzzy*.

Tabela 8. Base de regras do sistema *fuzzy*.

		Erro						
		GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GP
Δerro	GP	ZR	PP	MP	GP	GP	GP	GP
	MP	PN	ZR	PP	MP	GP	GP	GP
	PP	MN	PN	ZR	PP	MP	GP	GP
	ZR	GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GP
	PN	GN	GN	MN	PN	ZR	PP	MP
	MN	GN	GN	GN	MN	PN	ZR	PP
	GN	GN	GN	GN	GN	MN	PN	ZR

Os resultados obtidos para o sistema *fuzzy* em questão, encontram-se na Figura 28, que corresponde à superfície de resposta do sistema em função das entradas.

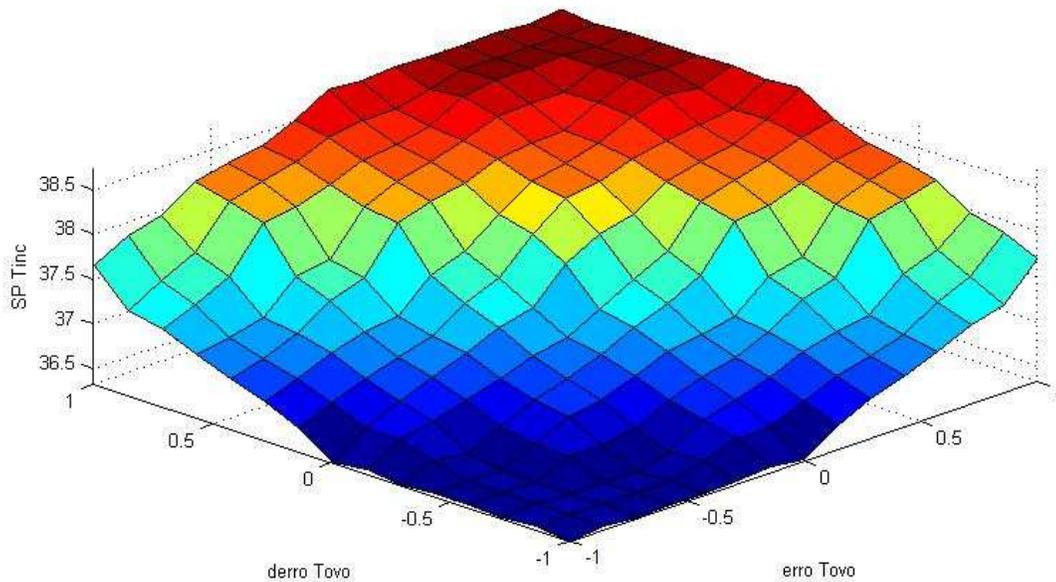


Figura 28. Superfície de resposta do sistema de inferência *fuzzy* desenvolvido

4.3.2 Controle climático da incubadora

Desenvolveu-se também um sistema de inferência *fuzzy* para controle climático da incubadora. O sistema desenvolvido apresentou a configuração mostrada na Figura 29.

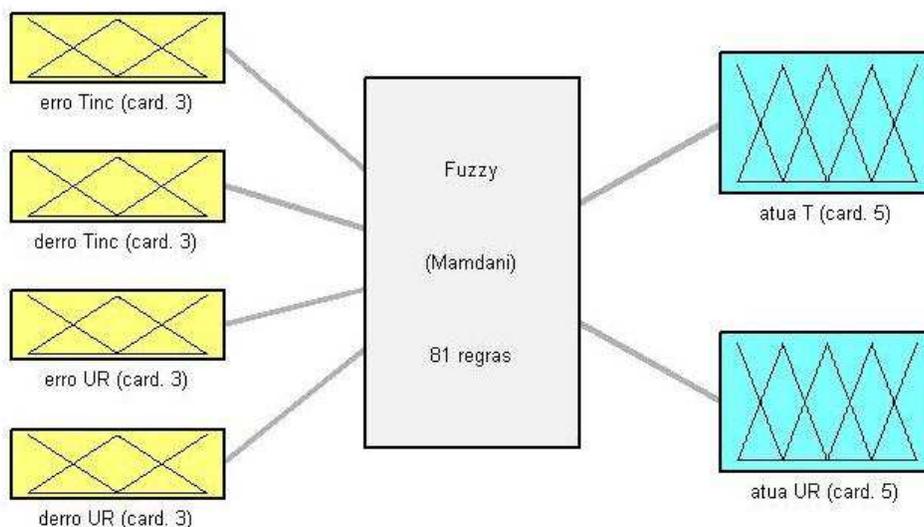


Figura 29. Estrutura do sistema *fuzzy* utilizado para controle climático na incubadora

Apresentam-se, na seqüência, as principais características do sistema *fuzzy* climático desenvolvido, cujas configurações finais obtidas são as mesmas para o sistema *fuzzy* anterior.

Os conjuntos *fuzzy* foram combinados fazendo-se uso dos operadores max-min. Os números de entrada *fuzzy* foram obtidos utilizando-se o operador mínimo, que fez uso do conector operacional lógico “e”, responsável pela intersecção dos conjuntos ativados pelas regras. Assim, quando da agregação de informações *fuzzy*, o valor assumido foi o valor mínimo entre os conjuntos selecionados.

Na operação de composição das respostas *fuzzy* de cada regra, utilizou-se o operador “max” com o elemento conectivo correspondente “ou”, que promoveram a união dos conjuntos *fuzzy* ativados pelas regras inferidas.

O método de defuzzificação adotado foi o do centro de gravidade, que foi o responsável pelo cálculo do centróide da área composta pela combinação dos conjuntos *fuzzy* de contribuição das regras. Tal configuração, obtida para o método de defuzzificação, é defendida por COX (1995), devido à sua propriedade em fornecer saídas *fuzzy* que provocam ações suaves de controle. SHAW e SIMÕES (1999) apresentam em maior detalhe, configurações similares aos resultados obtidos para os sistemas *fuzzy* desenvolvidos no presente estudo.

Atribui-se como vantagem geral dos resultados evidenciados, a robustez dos sistemas com as características expostas, fator que também foi evidenciado por LEITE (2007), na apresentação dos seus resultados.

As funções de pertinência para o sistema de controle *fuzzy* climático desenvolvido são apresentadas nas Figuras 30 e 31 e a base de regras desenvolvida com o suporte de um especialista é mostrada na Tabela 9.

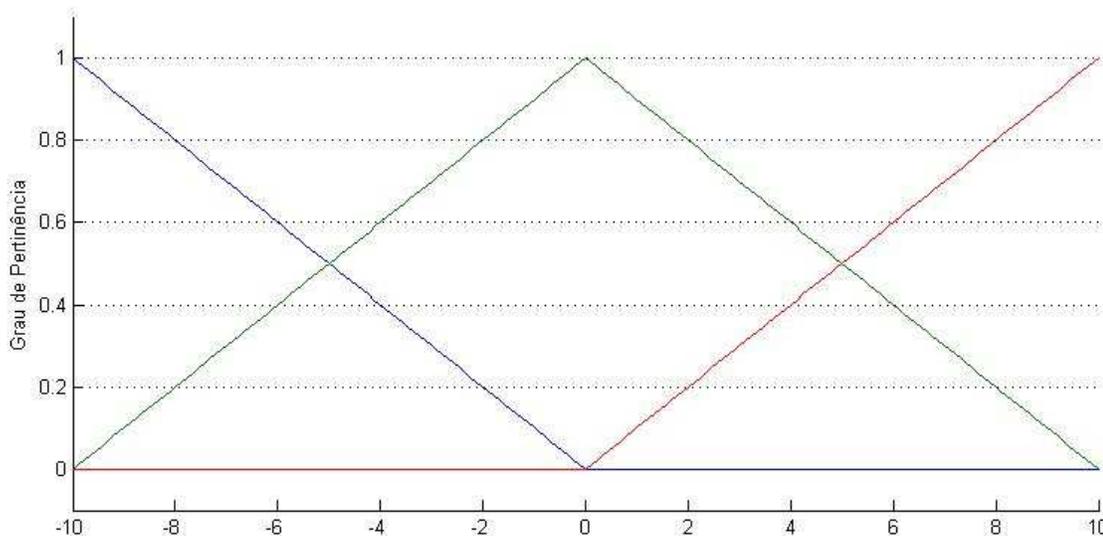


Figura 30. Configuração das funções de pertinência das variáveis de entrada do sistema fuzzy para controle climático na incubadora

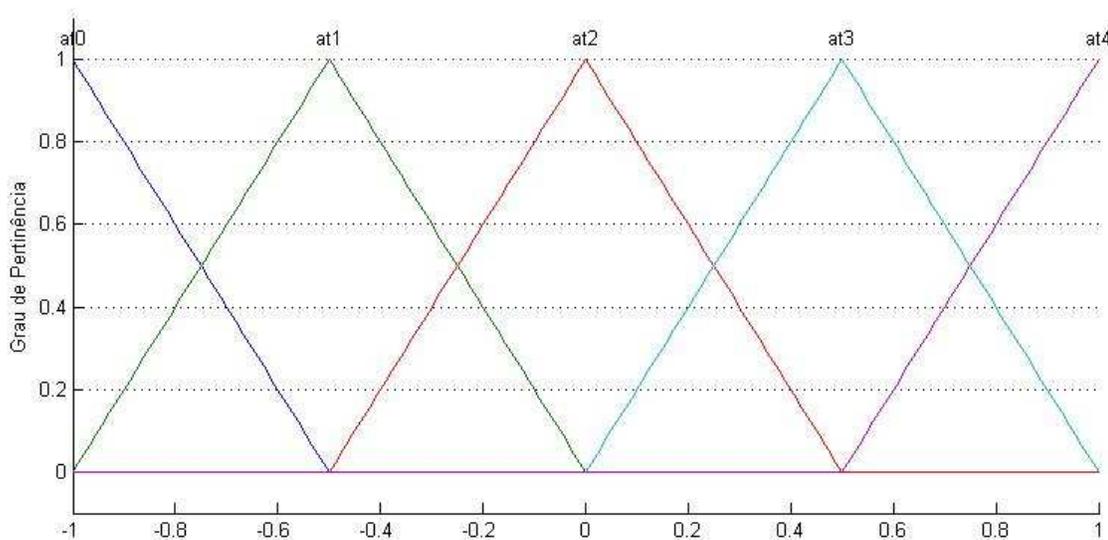


Figura 31. Funções de pertinência das variáveis de saída do sistema de controle fuzzy

Tabela 9. Base de regras composta pela incorporação dos conhecimentos especialistas e de experimentação.

Erro		-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1
	Var. Erro	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
-1	-1	AT0-AU0	AT0-AU1	AT0-AU2	AT1-AU0	AT1-AU0	AT0-AU0	AT3-AU0	AT4-AU0	AT4-AU0
-1	0	AT0-AU0	AT0-AU0	AT0-AU0	AT2-AU0	AT1-AU0	AT0-AU0	AT3-AU0	AT4-AU0	AT4-AU0
-1	1	AT0-AU0	AT0AU0	AT0-AU0	AT1-AU0	AT1-AU0	AT2-AU0	AT3-AU0	AT4-AU0	AT4-AU0
0	-1	AT0-AU1	AT0-AU2	AT0-AU2	AT0-AU0	AT0-AU0	AT0-AU1	AT2-AU0	AT3-AU1	AT4-AU2
0	0	AT0-AU0	AT0-AU1	AT0-AU1	AT0-AU0	AT0-AU0	AT0-AU0	AT1-AU0	AT2-AU0	AT4-AU2
0	1	AT0-AU0	AT0-AU1	AT0-AU2	AT0-AU0	AT0-AU0	AT0-AU0	AT1-AU0	AT2-AU0	AT4-AU2
1	-1	AT0AU2	AT0-AU2	AT0-AU2	AT0-AU0	AT0-AU0	AT0-AU0	AT1-AU1	AT2-AU1	AT4-AU2
1	0	AT0-AU1	AT0-AU1	AT0-AU2	AT0-AU1	AT0-AU1	AT0-AU1	AT1-AU1	AT3-AU1	AT4-AU2
1	1	AT0-AU2	AT0-AU2	AT0-AU3	AT0AV1	AT0-AU2	AT0-AU1	AT1-AU1	AT2-AU1	AT4-AT3

As mesmas análises e considerações utilizadas para as funções de pertinência *fuzzy* anteriormente apresentadas, valem para o sistema de controle climático *fuzzy*. Porém, os melhores resultados foram obtidos com cardinalidade inferior, uma vez que o trabalho de estabelecimento da base de regras foi dificultado com o uso de um sistema multivariável na entrada e saída da inferência *fuzzy*.

A base de regras mostrada na Tabela 9 relaciona os níveis do erro e variação do erro (-1, 0 e 1) aos diferentes níveis de atuação na temperatura (AT) e umidade (AU) simultaneamente, de acordo com uma base de conhecimento previamente estabelecida.

Os resultados, obtidos para o sistema *fuzzy*, seriam representados por uma superfície de resposta multidimensional, construída a partir de uma combinação múltipla das entradas e saídas, que excede a capacidade humana de análise. Portanto, apresenta-se como exemplo na Figura 32a e b, os resultados de apenas duas faces da superfície de resposta multidimensional, consideradas as de maior importância.

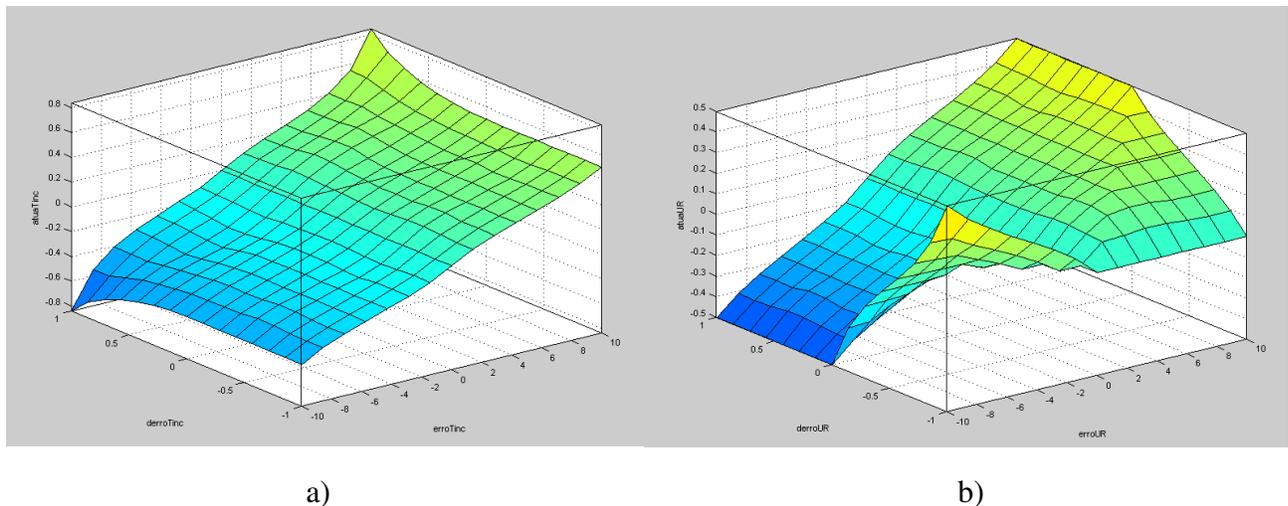


Figura 32. Exemplos de superfícies de resposta do sistema de inferência fuzzy; a) atuação na temperatura e b) atuação na umidade relativa do ar, em função de seus respectivos erros.

4.4 Simulação Computacional da Incubadora

De acordo com a metodologia apresentada, desenvolveu-se um programa computacional, para simular o processo de incubação dos ovos na incubadora estudada. Para tanto, todos os parâmetros utilizados nos cálculos, foram obtidos considerando-se os conhecimentos prévios existentes, de acordo com os resultados dos ensaios experimentais com a incubadora vazia, ou ainda, conforme considerações teóricas a partir do respaldo da literatura.

Os resultados obtidos da simulação para o presente estudo são essencialmente compostos por três partes, sendo:

1. O modelo computacional final da incubadora representado pelo seu *layout* e arquitetura de controle;
2. O comportamento e interação das variáveis de interesse do processo de incubação dos ovos;
3. A análise do desempenho do sistema de controle proposto e implementado na simulação;

4.4.1 Modelo de simulação

A partir da elaboração de um programa computacional com linguagem especializada, em forma de blocos, no ambiente Matlab/Simulink, foram introduzidos em uma plataforma para simulação, os principais conceitos envolvidos na incubação dos ovos.

Apresenta-se na Figuras 33, o resultado final da arquitetura e layout do modelo computacional da incubadora, representado pela tela principal do diagrama de blocos desenvolvido.

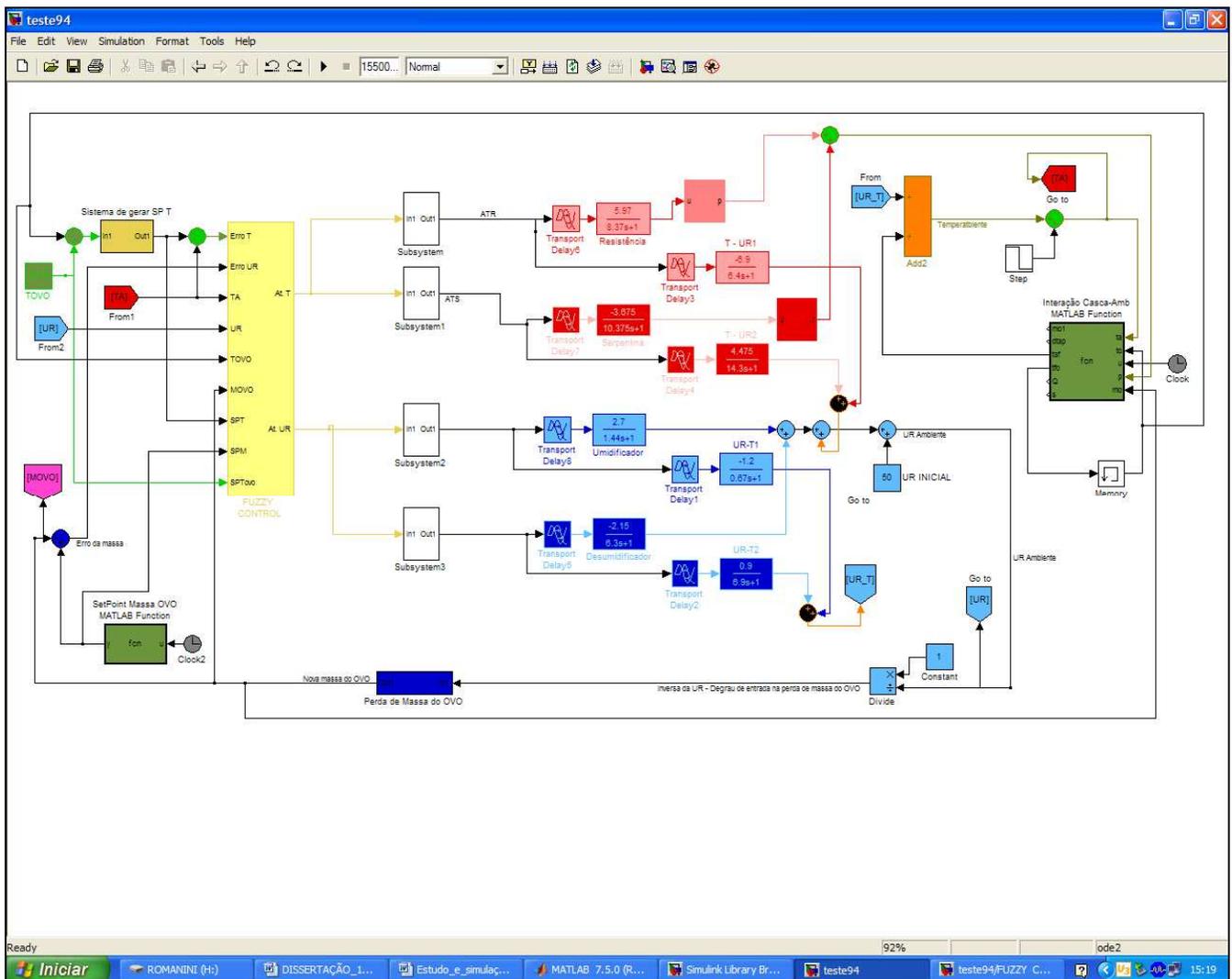


Figura 33. Vista da tela principal do programa computacional desenvolvido para simular o processo de incubação dos ovos na incubadora estudada.

Basicamente, a composição do modelo, se constituiu da integração total dos elementos chaves do estudo, caracterizados por blocos individuais ou então subsistemas, por meio das múltiplas conexões estabelecidas entre as informações de saída de cada bloco.

Na Figura 33, na parte esquerda do diagrama, estão posicionados os elementos de referência para o procedimento de simulação, que reproduzem as condições desejadas reais tanto para as medidas relacionadas aos ovos, quanto para as medidas relacionadas ao ambiente da incubadora. A partir da realimentação contínua das informações do processo, faz-se a comparação dos valores, com os valores de referência, onde são gerados os respectivos erros do sistema. A partir de então, se inicia um procedimento de correção do erro reconhecido, que compreende a ação dos controladores *fuzzy* apresentados. Os sistema de controle do ambiente, para ajustes da operação são formados pelo conjunto central de blocos do sistema apresentado na Figura 33. Mais à direita do modelo estão posicionados os elementos responsáveis pelos cálculos dos valores correspondentes a interação que existe entre o ovo e o ambiente, e são considerados como a fonte que alimenta o fluxo no restante do diagrama. Qualquer perturbação inicial, ou até mesmo durante o processo, nos ovos ou ambiente da incubadora, provoca uma reação do sistema de controle.

O diagrama representativo do modelo computacional de simulação da incubadora estabelece uma analogia com o esquema mostrado na Figura 34, considerando-se o fluxo de informações existentes e a arquitetura de controle proposta.

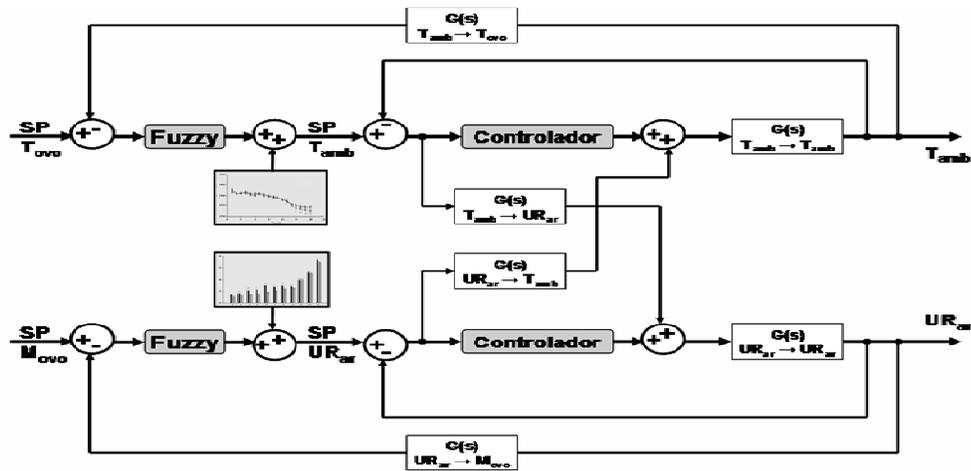


Figura 34. Representação simplificada da estrutura de controle e automação do processo de incubação com os fluxos de informações e elementos de controle.

Na Figura 35 é mostrado o diagrama do subsistema do controlador *fuzzy*, responsável por gerar os sinais de atuação na incubadora, para corrigir as condições do processo.

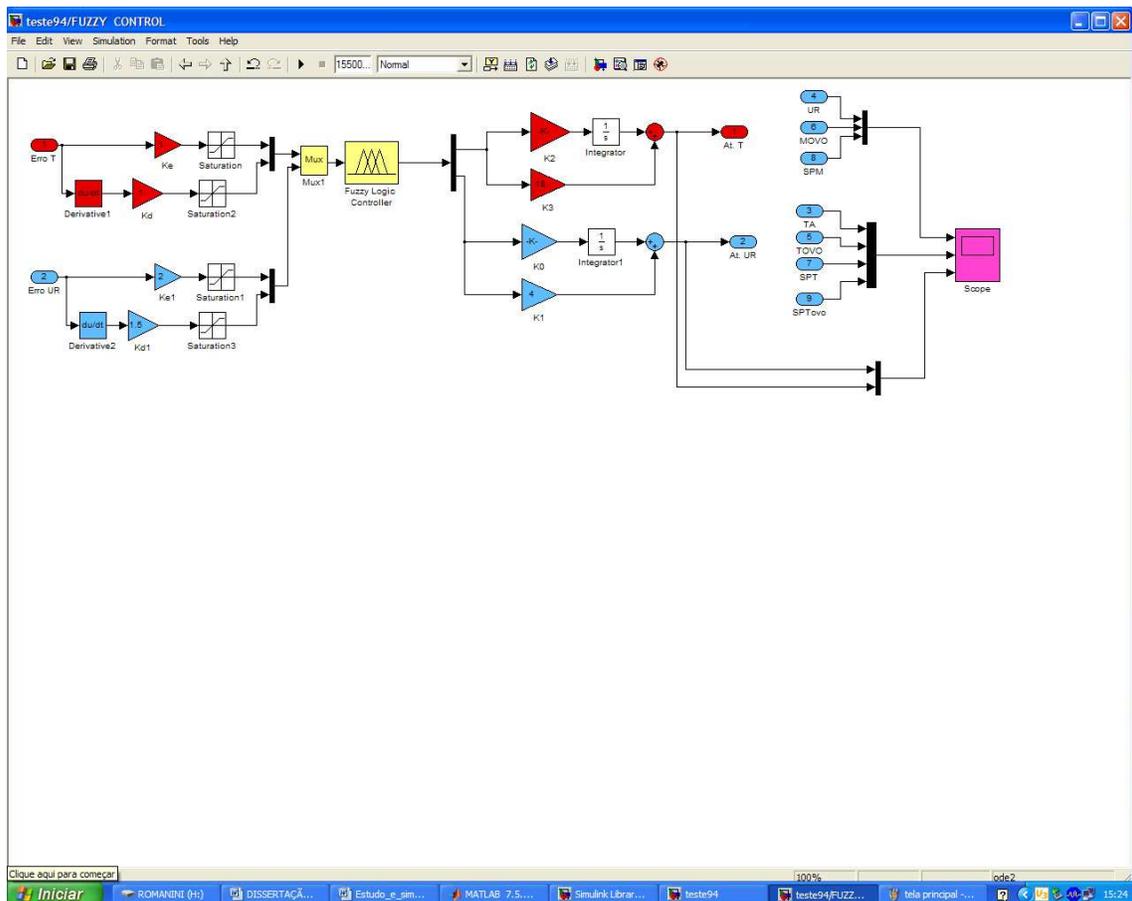


Figura 35. Vista do subsistema relativo ao controlador fuzzy do modelo computacional.

4.4.2 Resultados da simulação

A partir da configuração final do modelo computacional, apresentados nas Figuras 33 e 35 obtiveram-se via simulação, as respostas de interesse correspondentes as diferentes fases da incubação dos ovos.

No momento da transferência dos ovos para a incubadora, considerou-se que a Temperatura de casca dos ovos foi inicialmente estabelecida em 27 °C. Já a temperatura inicial do ambiente na incubadora foi de 30 °C. Assim, a partir do momento em que ocorre a inserção dos ovos na incubadora, existe um efeito sobre as temperaturas de ambos. Tal efeito ficou evidenciado no comportamento obtido graficamente das variáveis Tovo e Tinc, no início do processo, mantendo-se a máquina ainda desligada, sem que se iniciasse a operação. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 36.

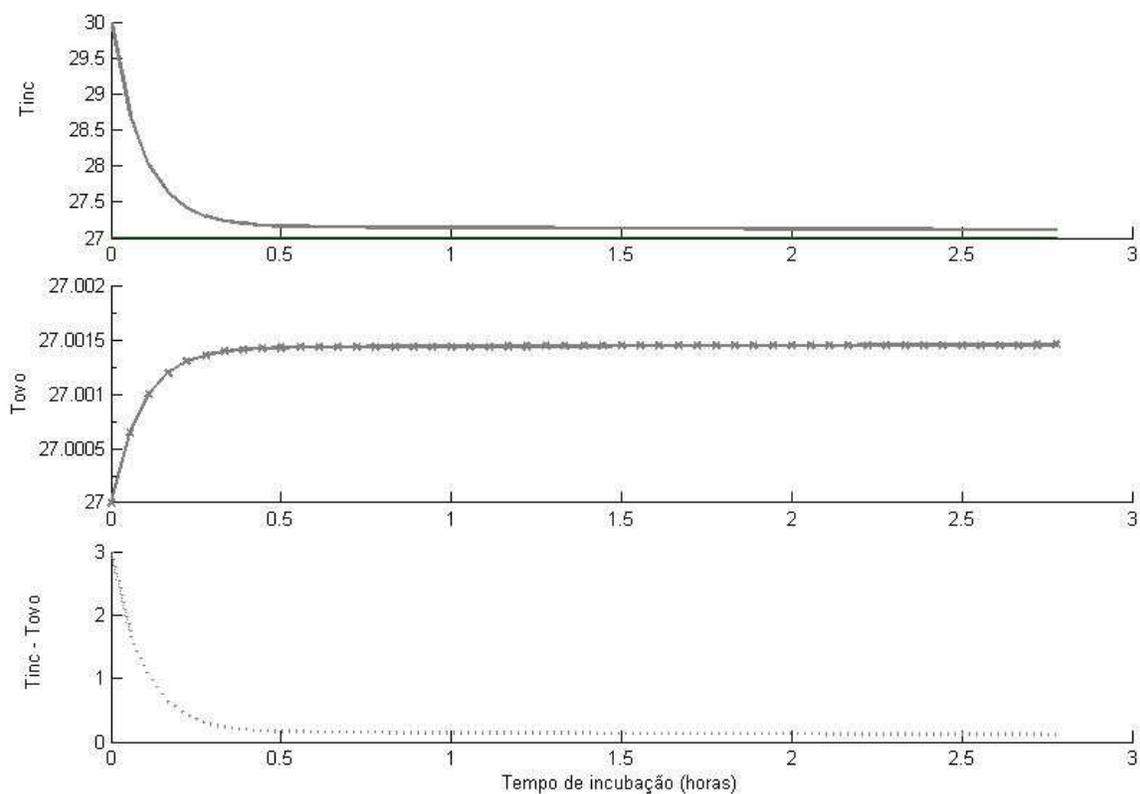


Figura 36. Comportamento da temperatura de casco dos ovos (Tovo) e temperatura do ambiente na incubadora (Tinc), quando da transferência dos ovos para início da incubação.

O comportamento obtido mostrado na Figura 36 é característico, e representou fielmente o que ocorre na incubadora, uma vez que a massa de ovos no interior da incubadora é muito superior a massa de ar. Neste caso a capacidade da incubadora é para acondicionamento de 61920 ovos em um volume aproximado de 25 a 30 m³ de ar. Portanto, a temperatura da incubadora rapidamente se aproxima da temperatura dos ovos. Se nenhum tipo de ação de controle for estabelecido, a tendência é de que o sistema entre em equilíbrio térmico e as temperaturas se estabilizem num valor ligeiramente superior a 27 °C, valor da temperatura inicial dos ovos.

Contudo, conforme referenciado na literatura (FRENCH, 1997; LOURENS et al., 2006) e descrito na metodologia, com o passar do tempo os embriões são fontes geradoras de calor. A partir desse conhecimento, simulou-se a capacidade de geração de calor por parte dos embriões na incubadora estudada de forma aproximada, por meio de uma curva exponencial, considerando-se uma situação crítica durante o processo de incubação. Os resultados estão apresentados na Figura 37.

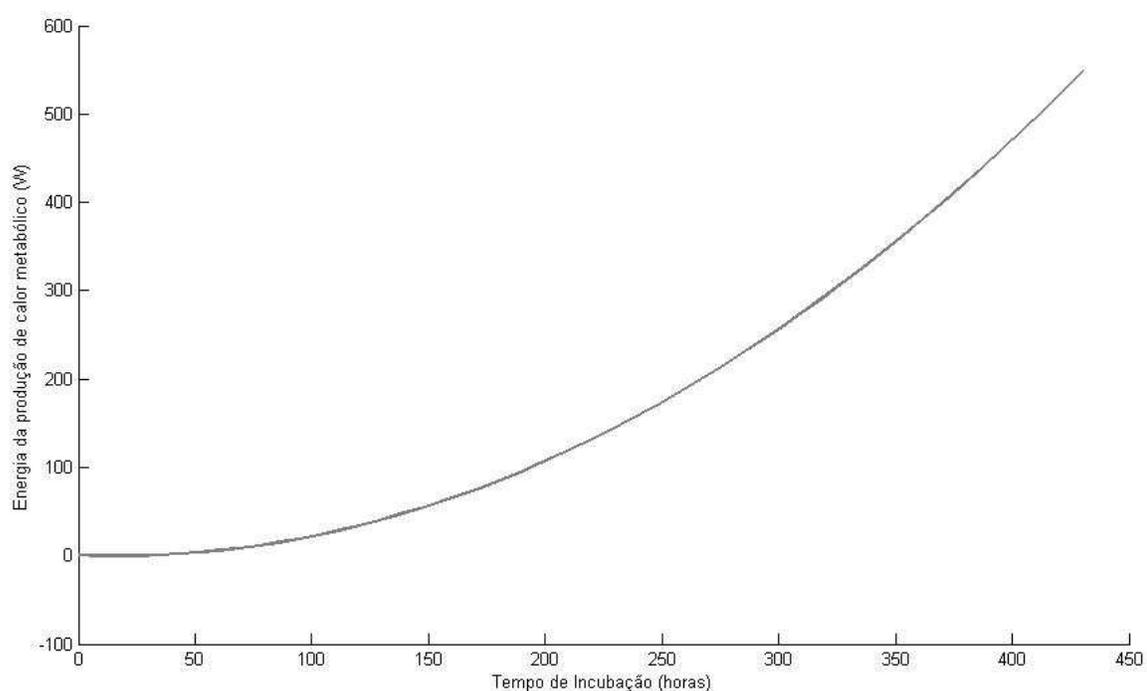


Figura 37. Simulação aproximada do comportamento da produção de calor embrionário na incubadora

Para JOSEPH et al. (2006) a temperatura ideal desenvolvimento do embrião está na faixa de 37,5 °C a 37,8 °C. VAN BRECHT et al. (2005) assinala que pequenos desvios desta faixa produzem variações na duração da incubação, pois a taxa metabólica do embrião está diretamente relacionada com essa temperatura. Assim, a partir desta necessidade, implementou-se na incubadora um sistema de controle, com estratégias apropriadas para atender as expectativas embrionárias.

Considerando-se a ativação do controlador *fuzzy* desenvolvido, obtiveram-se os resultados comportamentais das variáveis de interesse ao estudo. Tais resultados foram obtidos após repetições do ajuste do sistema de controle ao modelo construído e, estão mostrados na Figuras 38, 39.

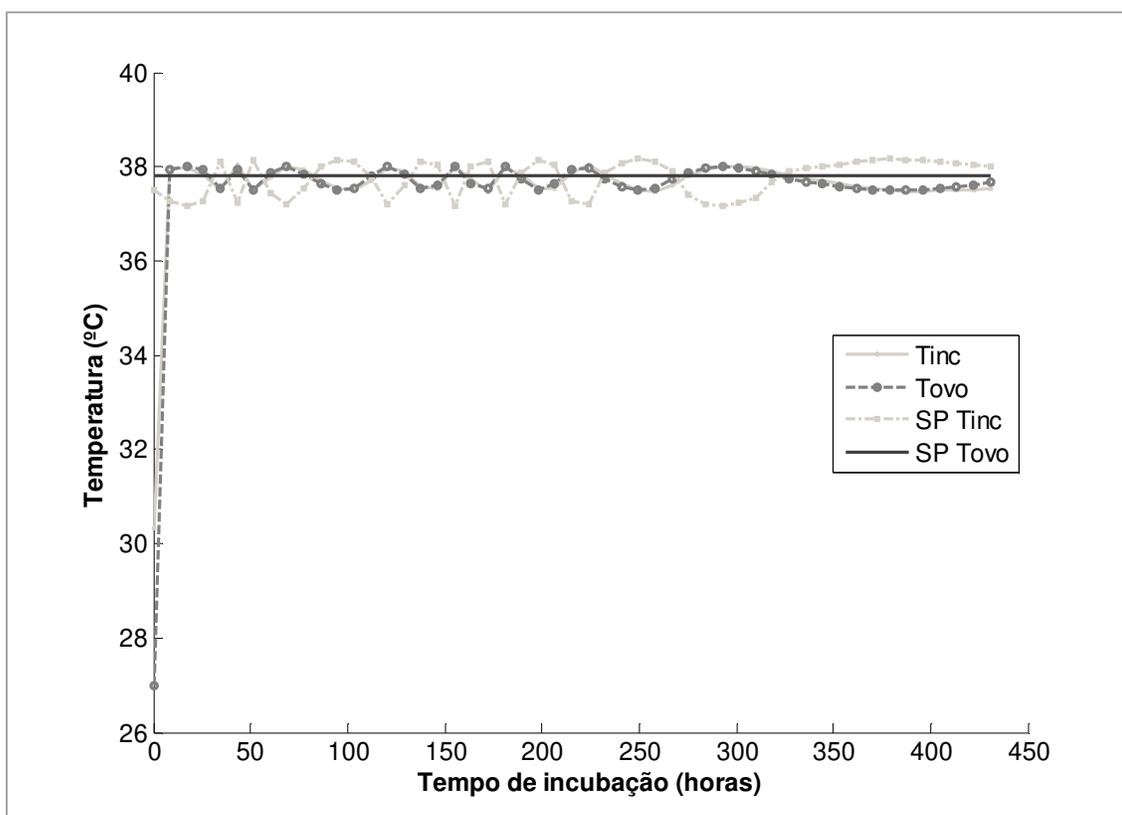


Figura 38. Resultados finais obtidos na simulação para as variáveis de interesse no estudo

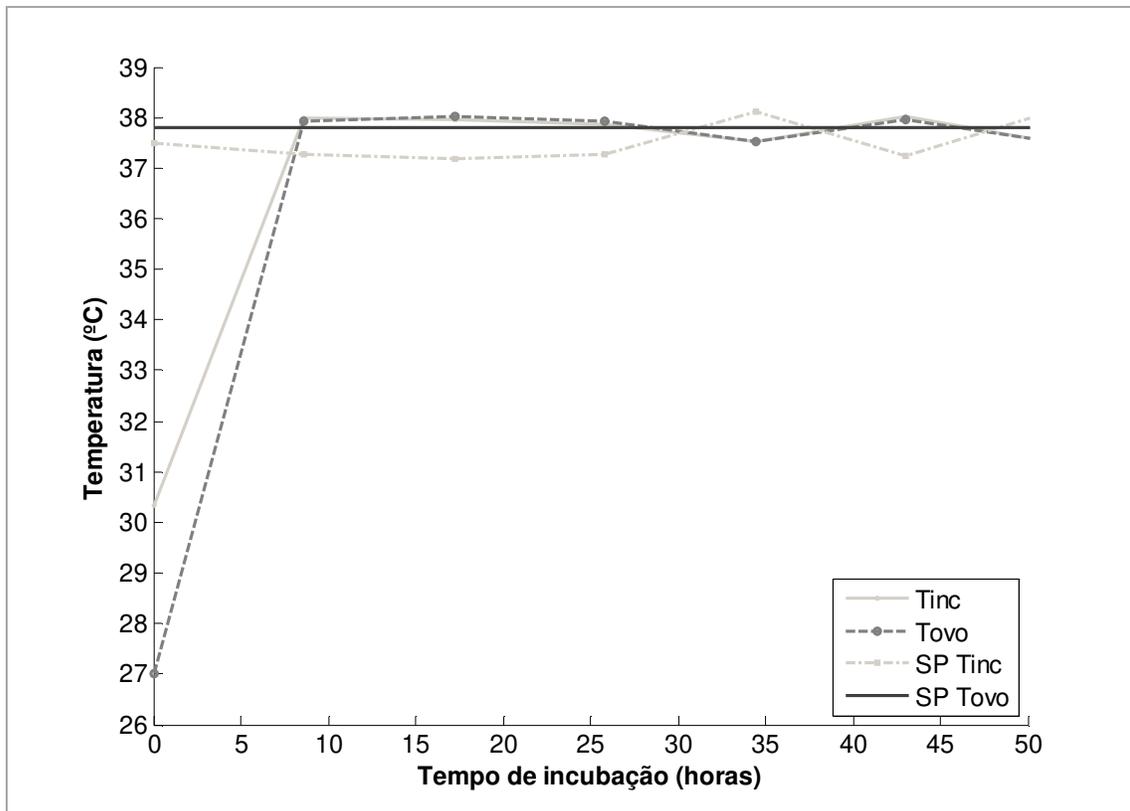


Figura 39. Resultado gráfico do desempenho da temperatura do ovo, como principal variável controlada durante o estudo

Conforme se observa na Figura 39, a variável controlada (Temperatura do ovo, Tovo) foi influenciada diretamente pela alteração do *set point* da variável manipulada (Temperatura do ar na incubadora, Tinc), sendo este comportamento, uma importante sinalização da efetividade de atuação do sistema de controle desenvolvido.

O regime transitório, caracterizado pelo aumento do valor das variáveis (Tinc e Tovo) nas primeiras horas de incubação, fornece importantes informações acerca do desempenho do controlador. Nota-se da Figura 39 que, o tempo de subida da Tovo foi inferior a 10 horas de incubação, o que evidencia uma resposta relativamente rápida no processo. Apesar disso, não se observou um sobre sinal elevado da Tovo, fato relacionado ao controle indireto efetuado pela temperatura do ar da incubadora.

LOURENS et al. (2005) afirmam que temperaturas acima da indicada, aceleram o desenvolvimento embrionário, impedem a posição correta dos embriões e aumentam a mortalidade destes nos últimos dias da incubação. Enquanto que, temperaturas menores às

normais, retardam o desenvolvimento e aumentam a mortalidade nos primeiros dias. Mostra-se na Figura 40, um maior detalhamento dos valores registrados na simulação, ao redor do ponto de interesse e, na Figura 41, os resultados gráficos da atuação dos sistemas de aquecimento e resfriamento, durante o período de incubação.

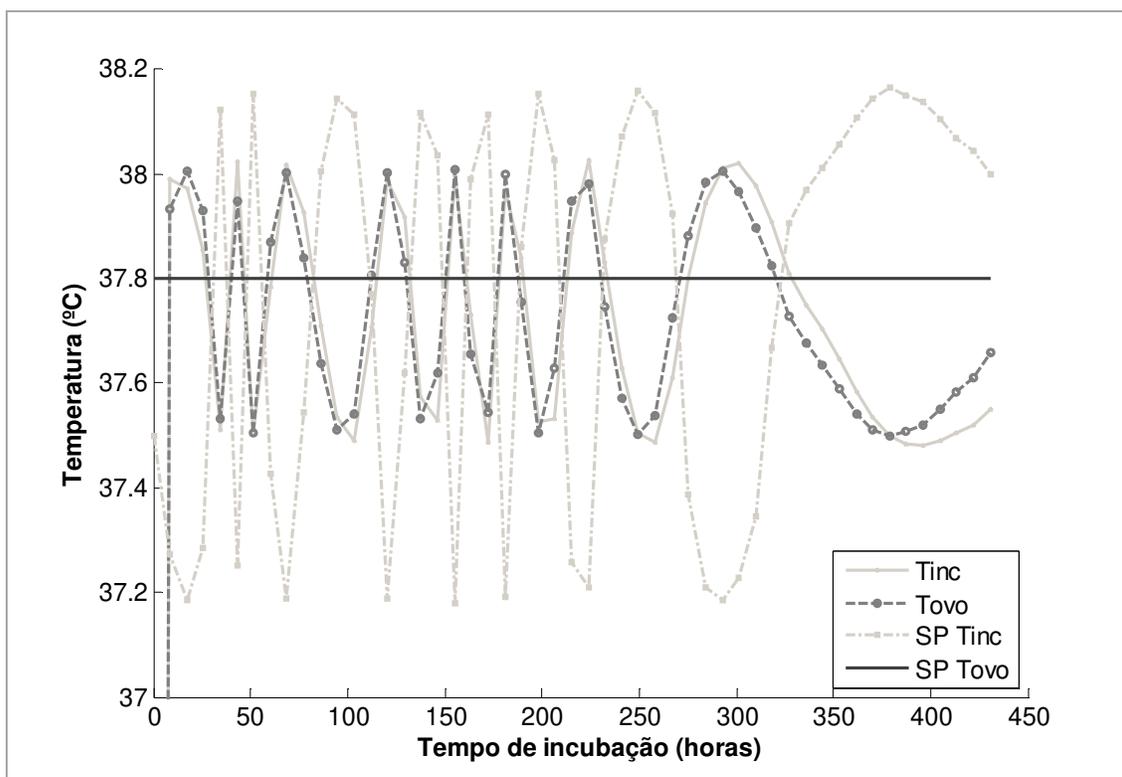


Figura 40. Detalhamento dos resultados em torno do valor de interesse (região do set point da temperatura do ovo)

Observando a Figura 40, percebe-se que o erro existente entre os valores medidos e desejados, para a Tovo, especificamente, variou dentro de uma faixa entre 37,5°C e 38°C, considerada exatamente a faixa de melhor desenvolvimento dos embriões. Percebe-se que de forma rápida, o erro inicialmente grande, foi corrigido pela atuação do controlador e, depois de algumas horas, pouco mais de um dia, o erro se manteve variando na faixa considerada, garantindo um controle efetivo do processo, de forma satisfatória.

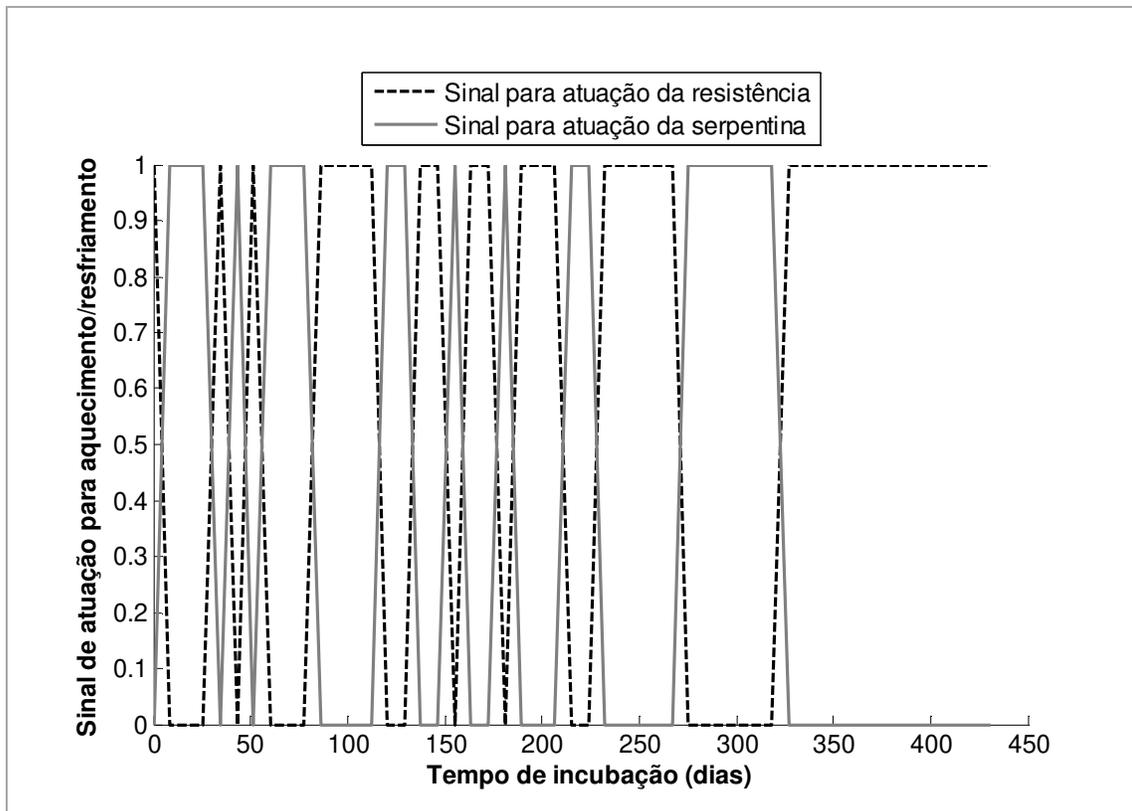


Figura 41. Sinal de intensidade de atuação para os sistemas de aquecimento e resfriamento do ambiente da incubadora durante o período de incubação.

Uma vez que, sob o ponto de vista do sucesso da incubação, o que importa é obter as condições desejadas de temperatura e massa dos ovos, apresentam-se na Figura 42, os resultados relacionados à massa dos ovos e umidade relativa do ar, obtidos na simulação do período de 18 dias de incubação.

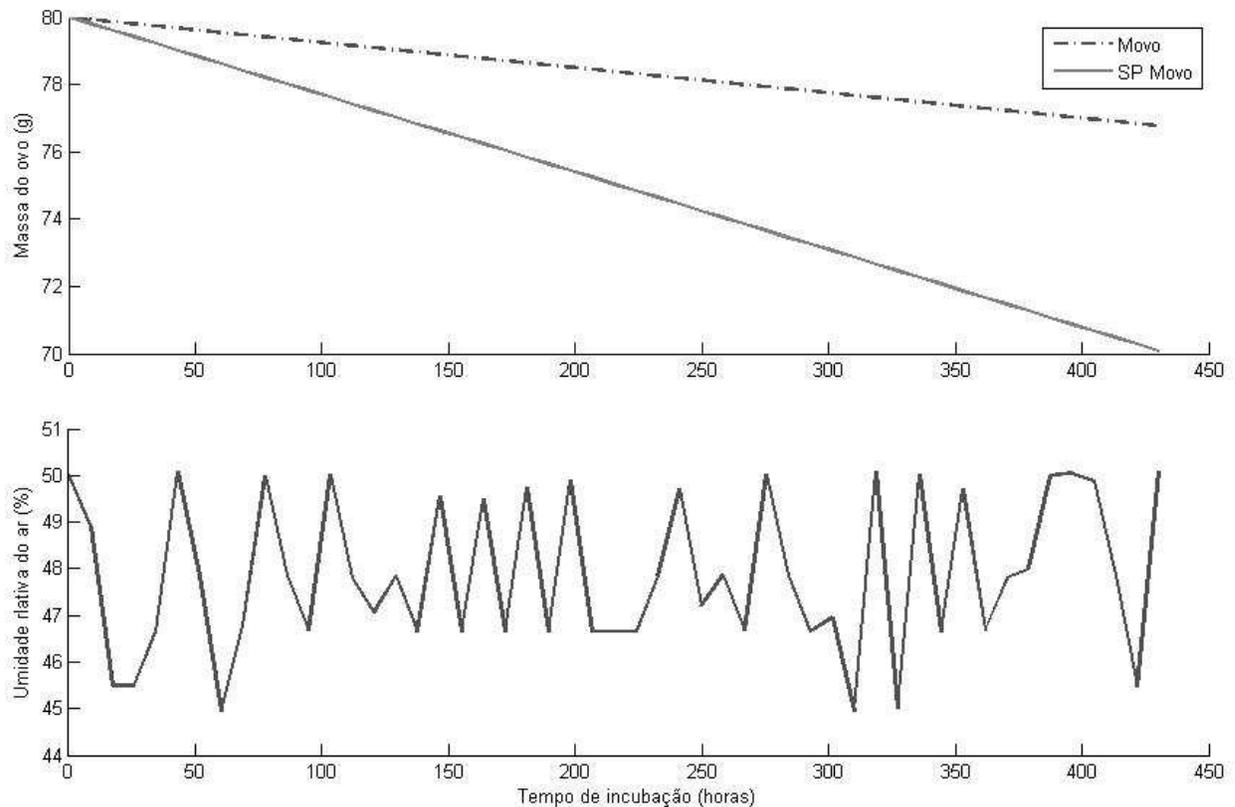


Figura 42. Resultados obtidos por meio da simulação da perda de massa dos ovos influenciada pela umidade relativa do ar.

Considerando-se os valores obtidos da medida de massa, nota-se da Figura 42, que o comportamento obtido ficou relativamente distante do desejado. FRENCH (1997) aponta que, a perda de massa do ovo, é diretamente proporcional à perda de água para o ambiente, o que provoca um aumento na umidade relativa do ar na incubadora. Segundo BRINSEA (2006), o ovo deve perder de 12% a 15% da sua massa durante a incubação, comportamento esse que seria reproduzido seguindo-se o *set point* da massa dos ovos (SP Movo) na Figura 42. Porém, a simulação da incubação pelo modelo computacional foi prejudicada, uma vez que não se obteve informações mais detalhadas das relações entre as pressões parciais de vapor de água interno e externo ao ovo, e seus efeitos na massa, o que dificultou no desenvolvimento de uma estratégia de controle mais acurada.

Aspectos gerais dessa relação são encontrados na literatura. PIAIA (2005) relatou que se a umidade relativa do ar na incubadora for muito baixa, provoca uma perda excessiva de água do ovo, atrasando a eclosão. Caso contrário, a umidade relativa alta faz com que os embriões eclodam precocemente. Os resultados obtidos indicam que, para se obter melhores

resultados via simulação da perda de massa dos ovos, é preciso que mais testes sejam conduzidos e que conhecimentos mais detalhados de especialistas sejam incorporados na base de conhecimento da estratégia *fuzzy*. Desta forma, a diferença, do valor de massa dos ovos (Movo) e o valor desejado (SP Movo), seriam consideravelmente reduzidos. No entanto, de acordo com CALIL (2007), a variável principal e que deve ser priorizada na incubação é a temperatura.

A partir das condições de interação, entre o ovo e o ambiente da incubadora obtiveram-se como resultado, as respostas de da demanda pela atuação dos sistemas de controle da incubadora. Os resultados são mostrados na Figura 43.

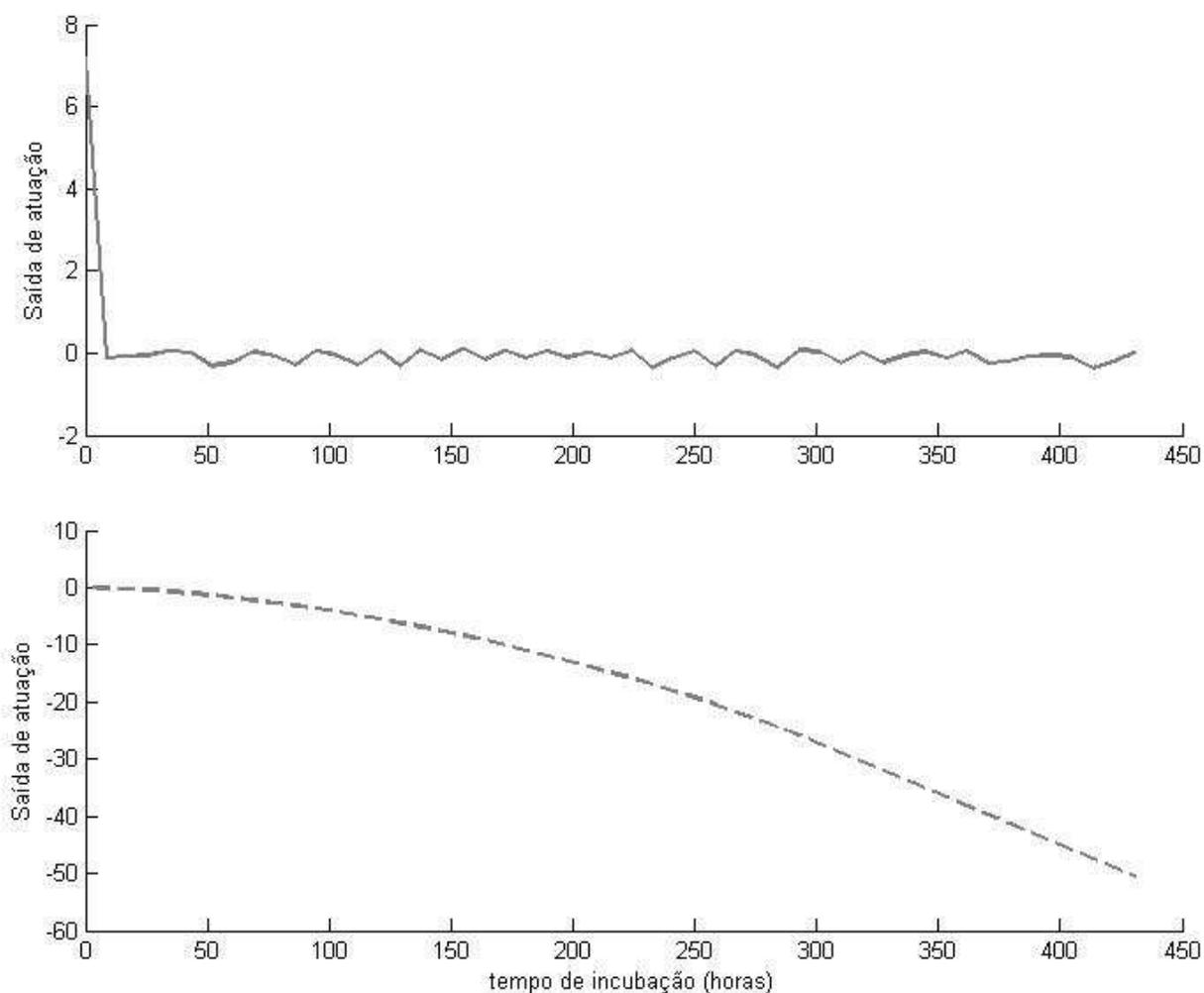


Figura 43. Demanda de potência de atuação para as linhas de aquecimento e resfriamento da incubadora.

Assim como referenciado na literatura (TAZAWA e NAKAGAWA, 1985; FRENCH, 1997) e mostrado na Figura 37, no início do período de incubação a produção de calor embrionária é pouco significativa e, para se obter a temperatura desejada pelo embrião, o ambiente da incubadora deve fornecer calor ao ovo. Isso implica na atuação do sistema de aquecimento da máquina, conforme Figura 43. Com a evolução do desenvolvimento embrionário, no final do processo de incubação a produção de calor embrionária é significativamente mais alta do que a perda de calor do embrião e, para se manter a condição de estabilidade da temperatura do ovo, exige-se uma atuação bastante elevada do sistema de resfriamento da incubadora.

O sistema de controle deve ser capaz de reconhecer a dinâmica desses processos e atuar na linha de aquecimento ou resfriamento, quando forem necessários, conforme respostas obtidas da demanda por potência do sistema de controle, apresentados na Figura 43.

5. CONCLUSÃO

Um dos grandes desafios na criação do sistema de automação e controle proposto para a incubadora de estágio único estudada, consistiu em se fazer a integração de múltiplos subsistemas. Destaca-se, na arquitetura de controle desenvolvida, a integração ao sistema de controle de elementos, capazes de prover informações do desenvolvimento embrionário, tornando-os elementos ativos. No estudo computacional, tais elementos foram simulados por leis da transferência de calor e massa, mas no processo físico real, seriam representadas pelos sensores de bio-respostas embrionárias.

Para tanto, o procedimento inicial foi conhecer o comportamento dinâmico de cada parte integrante do processo, para que o modelo computacional fosse desenvolvido.

Os requisitos gerais cumpridos, para se desenvolver o projeto do sistema de controle, consideraram inicialmente a busca por um conhecimento específico do processo de incubação. Neste caso, obtiveram-se os modelos matemáticos da dinâmica da incubadora e adquiriram-se conhecimentos expostos na literatura, especialmente os parâmetros exigidos para se obter resultados de incubação satisfatórios. Considerou-se essa etapa como um procedimento fundamental, pois foi possível, com a metodologia aplicada, conhecer o tempo de reação das variáveis de interesse, mediante atuação na planta. A condução dos ensaios práticos na incubadora proporcionou um maior conhecimento do processo que facilitou, entre outras tarefas, a configuração do banco de regras de controle e o processo de sintonia do mesmo.

Dado a complexidade do sistema sob estudo, em função da presença de não linearidades e dinâmicas pouco conhecidas, optou-se por utilizar o desenvolvimento de um controlador *fuzzy* para o processo.

Considerando-se que, o requisito específico para a avaliação de um sistema de controle é basicamente a definição do desempenho que se deseja, entende-se que os resultados obtidos foram satisfatórios. Ficou aparente que, o conhecimento disponível sobre o próprio processo de incubação, ou a falta deste, impôs alguns limites de desempenho, como nos resultados obtidos para a condição temporal de massa dos ovos.

O problema de controle, apresentado no presente estudo, enquadrou-se em uma situação de controle em malha fechada, classificado como regulatório, devido ao seu tipo de

aplicação. O *set point* do processo de incubação, para o caso da temperatura do ovo, foi mantido fixo no valor de 37,8 °C, referenciado na literatura como a temperatura adequada para o desenvolvimento do embrião. O controlador desenvolvido atuou com o intuito de se manter as variáveis de interesse do processo, o mais próximo possível do valor de referência, independente das perturbações inerentes ao processo.

O controle do tipo estabelecido, também pode ser associado a um controle do tipo cascata, pois a saída de um dos controladores *fuzzy* desenvolvidos, também serviu como o *set point* de outro controlador.

Verificou-se, por meio dos resultados gráficos apresentados, que o sistema de controle *fuzzy* proposto foi capaz de minimizar ou rejeitar os efeitos das perturbações, com maior sucesso para a temperatura de casca dos ovos (Tovo) e com menor sucesso para a massa dos ovos (Movo).

Alguns critérios analisados nas respostas do sistema de controle projetado evidenciaram que, o sistema se mostrou relativamente estável, uma vez que as respostas não apresentaram grandes oscilações. O sistema se apresentou robusto para eliminar os desvios existentes entre a variável controlada e o valor desejado, especialmente no controle da temperatura dos ovos, considerada pela literatura a variável de maior importância no processo de incubação.

Houve uma tendência contínua de se minimizar os erros ao longo do tempo, apresentando boa estabilidade, apesar das perturbações externas e das não-linearidades do processo. Pontuaram-se algumas vantagens em relação à metodologia utilizada de levantamento experimental do modelo da planta, sendo o diferencial a velocidade e praticidade com que a dinâmica da incubadora se tornou conhecida. No entanto, uma desvantagem que deve ser considerada, é a validade apenas pontual e local para este modelo, em torno do ponto de operação, o que não permite grandes extrapolações.

A simulação computacional do processo se constituiu em uma fase importante do projeto do sistema de controle, uma vez que foi capaz de reduzir substancialmente os custos, tempo de respostas das análises e riscos envolvidos na incubação real de ovos.

Obteve-se como lição, que a busca exagerada pela precisão no modelo desenvolvido, muitas vezes não se justifica, o que se torna importante não aumentar a complexidade do modelo, se o problema puder ser resolvido. Com o estabelecimento da plataforma de simulação

computacional do processo, foi possível testar várias possibilidades de sintonia do controlador, com maior flexibilidade e sem afetar a produção.

Entretanto, como conclusão última do presente estudo, a aproximação dinâmica do processo real obtida por modelagem matemática experimental, bem como as considerações feitas para representar e simular o processo de incubação dos ovos na incubadora foi satisfatório. Os resultados obtidos, podem servir de base para o desenvolvimento de trabalhos futuros para implementação do sistema de controle proposto na prática, em uma incubadora real.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P.E.M.; EVSUKOFF, A.G. Sistemas *fuzzy*. In: REZENDE, S.O. **Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações**. Barueri-SP: Manole, 2003.

AR, A. Egg water movements during incubation., p.157–174. In: TULLET, S.G. **Avian Incubation**, ed. Butterworth-Heinemann, London. 1991.

BAMELIS, F.; KEMPS, B.; MERTENS, K.; TONA, K.; DE KETELAERE, B.;
DECUYPERE, E.; DE BAERDEMAEKER, J. Non destructive measurements on eggs during incubation. **Avian Poult. Biol. Rev.** v.15, p.150–159. 2005.

BAZANELLA, A. S.; SILVA JR., J. M. G. **Sistemas de controle: princípios e métodos de projeto**. 1ª edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 292p.

BOERJAN, M.L. Incubação em estágio único para melhorar a uniformidade. In.: Conferência APINCO 2006 de Ciência e Tecnologia Avícolas, 2006, Santos. **Anais...** Campinas: FACTA, v.1, p.325-333. 2006.

BOLELI, I.C. Estresse, mortalidade e malformações embrionárias. In: MACARI, M.;
GONZALES, E. **Manejo da Incubação**. Campinas-SP, Brasil. FACTA: Fundação Apinco de Ciências e Tecnologias Avícolas. 2003.

BRINSEA. **Incubation Handbook**. Disponível em:

<http://www.brinsea.com/pdf/Brinsea_Handbook.pdf> Acessado em 12 de Setembro de 2007.

BURTON, F.G.; STEVENSON, J.M.; TULLETT, S.G. The relationship between eggshell porosity and air space gas tensions measured before and during the parafetal period and their effects on the hatching process in the domestic fowl. **Respir. Physiol.** v.77, p.89–99, 1989.

CALIL, T.A.C. Princípios básicos de incubação. In: Conferência APINCO 2007 de Ciência e Tecnologia Avícolas, 2007, Santos. **Anais do Simpósio sobre Incubação...** Campinas: FACTA, p.19-45, 2007.

CALLEJO, R.A. Manejo del huevo en la incubadora. Disponível em:

<<http://gea.gate.upm.es/produccion-animal/produccion-avicola>> Acessado em: Setembro de 2007.

CAMPOS, M.C.M.M.; TEIXEIRA, H.C.G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. Editora Blucher, São Paulo-SP, 2006.

CHRISTENSEN, V.L.; DONALDSON, E.W; NESTOR, K.E. Incubation temperature effects on metabolism and survival of turkey embryos., p.399–402. In: **Proceedings of 9th European Poultry Conference**. Vol. II. World's Poultry Science Association, Glasgow, UK, 1994.

COLLIN, A.; PICARD, M.; YAHAV, S. The effect of duration of thermal manipulation during broiler chick embryogenesis on body weight and body temperature of post-hatched chicks.

Anim. Res. v.54, p.105–111. 2005.

COX, E. *fuzzy logic for business and industry*. Rockland: Charles River Media, Inc. 1995.

DECUYPERE, E.; MICHELS, H. Incubation temperature as a management tool: A review.

World's Poultry Science Journal, v. 48, p.28-38, 1992.

DECUYPERE, E. Incubation temperature and postnatal development., p.407–410 In:

Proceedings of 9th European Poultry Conference. Vol. II. World's Poultry Science

Association, Glasgow, UK, 1994.

DECUYPERE, E.; MALHEIROS, R.D.; MORAES, V.M.B.; BRUGGEMAN, V. Fisiologia do Embrião. In: MACARI, M.; GONZALES, E. **Manejo da Incubação**. Campinas-SP, Brasil.

FACTA: Fundação Apinco de Ciências e Tecnologias Avícolas. 2003.

DEEMING, D. C.; FERGUSON, M.W. J. Physiological effects of incubation temperature on embryonic development in reptiles and birds, p.147–172. In: DEEMING, D. C.; FERGUSON,

M.W. J. **Egg Incubation**, ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1991.

DRIANKOV, D.; HELLENDORN, H.; REINFRANK, M. **An introduction to fuzzy control**.

Springer-Verlag, New York, 316p. 1996.

FABRIS, A.A. **Estratégia para previsão e acompanhamento da demanda de carnes no mercado de frangos de corte.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FERREIRA, A.L.G.; PARANHOS, J.P.S. **Controle em tempo real por lógica *fuzzy*.** Projeto Final (Curso de Engenharia Elétrica/Eletrônica) – Faculdade de Engenharia de Resende, Resende-RJ, 2004.

FILETI, A.M.F. **Controle adaptativo e preditivo com redes neurais de uma coluna de destilação em batelada.** Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 1996.

FRENCH, N. A. Modeling incubation temperature: The effects of incubator design, embryonic development, and egg size. **Poultry Science**, v.76, p.124-133, 1997.

GLADYS, G. E.; HILL, D.; MEIJERHOF, R.; SALEH, T. M.; HULET, R.M. Effect of embryo temperature and age of breeder flock on broiler post hatch performance. **Poultry Science**, v.79, p.123, 2000.

GOMIDE, F.A.C.; GUDWIN, R.R. Modelagem, controle, sistemas e lógica *fuzzy*. In: I SIMPÓSIO BRASIL JAPÃO DE LÓGICA NEBULOSA. Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 1992.

GODOY, J. C. Perspectivas para as carnes em 2009 na visão do USDA. **Revista Produção Animal – Avicultura**, v.2 (20), p.20, 2007.

GUSTIN, P.C. Biossegurança no incubatório. In: MACARI, M.; GONZALES, E. **Manejo da Incubação**. Campinas-SP, Brasil. FACTA: Fundação Apinco de Ciências e Tecnologias Avícolas. 2003.

HIROYUKI, H. KOBAYAZHI, T. *fuzzy* Control of Bioprocess. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v.89, p.401-408, 2000.

HORIUCHI, J.; KISHIMOTO, M. Application of *fuzzy* control to industrial bioprocess in Japan. **fuzzy sets and Systems**, v.128, p.117-124, 2002.

HULET, R. M. Managing Incubation: Where are we and why? **Poultry Science**, v.86, p.1017-1019. 2007.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P.; BERGMAN, T.; LEVINE, A. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6ª Edição, Editora LTC, São Paulo-SP, 2008.

JAGER, R. **fuzzy logic in control**. Thesis Technische. Universiteit Delft, 1995.

JOSEPH, N. S.; LOURENS, A.; MORAN Jr. E. T... The effects of suboptimal eggshell temperature during incubation on broiler chick quality, live performance, and further processing yield. **Poultry Science Association**. (v 85), p. 932 – 938. 2006.

KASHKIN, V. Heat exchange of bird eggs during incubation. **Biophysic.** v. 6 p. 97 – 107.

1961. apud FRENCH, N. A. Modeling incubation temperature: The effects of incubator design, embryonic development, and egg size. **Poultry Science**, v.76, p.124-133, 1997.

LA SCALA Jr., Newton. Aspectos físicos da Incubação. In: MACARI, M.; GONZALES, E. **Manejo da Incubação.** Campinas-SP, Brasil. FACTA: Fundação Apinco de Ciências e Tecnologias Avícolas. 2003.

LEITE, M.S. **Estudo comparativo do desempenho de controladores *fuzzy* e convencional aplicados em um bioprocesso.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

LI, H.X.; GATLAND, H.B. Conventional *fuzzy* control and its enhancement. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v.26, n.5, p.791-797, 1996.

LOURENS, A.; VAN DEN BRAND, H.; HEETKAMP, M.J.W.; MEIJERHOF, R.; KEMP, B. Effects of Eggshell Temperature and Oxygen Concentration on Embryo Growth and Metabolism During Incubation. **Poultry Science Association.** (v. 86), p. 2194–2199. 2007.

LOURENS, A. The importance of air velocity in incubation. **World Poultry**, v.17, p.29–30, 2001.

LOURENS, A.; MOLENAAR, R.; VAN DEN BRAND, H.; HEETKAMP, M.J.W.;
MEIJERHOF, R.; KEMP, B. Effect of egg size on heat production and the transition of energy
from egg to hatchling. **Poult. Sci.** v.85, p.770–776. 2006.

LOURENS, A.; VAN DEN BRAND, H.; MEIJERHOF, R.; KEMP, B. Effect of eggshell
temperature during incubation on embryo development, hatchability and post-hatch
development. **Poult. Sci.** v.84, p.914–920. 2005

LUNA HUAMANÍ, I. **Redes neurais fuzzy aplicadas em identificação e controle de
sistemas.** Dissertação (Mestrado em Automação Industrial) – Faculdade de Engenharia
Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

MANDANI, E.H. Applications of *fuzzy* algorithm for simple dynamic plant. **Proceedings of
the IEEE**, v.121, p.1585-1588, 1974.

MAULDIN, J.M.; BUHR, R.J. What is really happening in your incubator? **Int. Hatchery
Pract.** v.9, p.19–22, 1995.

MAULDIN, J.M. Factors affecting hatchability. In: BELL, D.D.; W.D. Weaver. **Commercial
Chicken Meat and Egg Production**, 5th ed., p.727-773, 2001.

MEIJERHOF, R. **Physical parameters in incubation.** Hybro Hatch College, Penn State
University, 2007.

MEIJERHOF, R.; VAN BEEK, G. Mathematical modelling of temperature and moisture loss of hatching eggs. **J. Theor. Biol.**, v.165, p.27–41, 1993.

MEIR, M.; AR, A. Improving turkey poultry quality by correcting incubator humidity to match eggshell conductance. **Br. Poult. Sci.** v.28, p.337–342. 1987.

NEVES, A.C.R.S. Maximização do fluxo operacional em incubatórios comerciais. In: VII SIMPÓSIO GOIANO DE AVICULTURA. Goiânia, 2005. **Anais....** Avesui, p.46 – 53, 2005.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4ª. Edição. Pearson Prentice Hall, São Paulo-SP, 2003.

OWEN, J. Principles and problems of incubator design., p.205–226. In: TULLET, S.G. **Avian Incubation**, ed. Butterworth-Heinemann, London. 1991 apud FRENCH, N. A. Modeling incubation temperature: The effects of incubator design, embryonic development, and egg size. **Poultry Science**, v.76, p.124-133, 1997.

PEDRICZ, W.; GOMIDE, F.A.C **An introduction to fuzzy sets: analyses and design**. MIT Press, Cambridge, 1998.

PEDROSA, L.S. **Controle auto-ajustável de uma coluna piloto de destilação em batelada com inferenciação de composição através de redes neurais artificiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

PEREIRA FILHO, R.D. **Desenvolvimento e implementação de controladores nebulosos em uma coluna piloto de destilação em batelada.** Dissertação (Mestrado em Sistema de Processos Químicos e Informática) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

PIAIA, J. L. **Aplicação da Inteligência Artificial no Monitoramento do processo de incubação.** 90p. Dissertação de Mestrado. (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2005.

PINHEIRO, C.A.M. **Análise e projeto de sistemas de controle *fuzzy*: uma abordagem no domínio da frequência.** Tese (Doutorado em Automação) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

PROCYK, T.; MANDANI, E.H. A linguistic self organizing process controller. **Automatic**, v.15, p.15-30, 1979.

ROMANOFF, A. L. Atmospheric changes, p.57–104. In: **Pathogenesis of the Avian Embryo: An Analysis of Causes of Malformations and Prenatal Death.** Wiley Interscience, New York. 1960.

ROMIJIN, C.; LOKHORST, W. Foetal heat production in the fowl. **J. Physiol.** v.150, p.239-249, 1960. apud FRENCH, N. A. Modeling incubation temperature: The effects of

incubator design, embryonic development, and egg size. **Poultry Science**, v.76, p.124-133, 1997.

SCHMIDT-NIELSEN, K. **Animal Physiology**. Cambridge University Press, New York, NY. 1975. apud FRENCH, N. A. Modeling incubation temperature: The effects of incubator design, embryonic development, and egg size. **Poultry Science**, v.76, p.124-133, 1997.

SERRA, G.L.O. **Propostas de metodologias para identificação e controle inteligentes**. Tese (Doutorado em Automação) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SHAW, I.S.; SIMÕES, M.G. **Controle e modelagem fuzzy**. Relatório FAPESP, 1999.

SOTHERLAND, P.R.; SPOTILA, J.R.; PAGANELLI, C.V. Avian eggs: Barriers to the exchange of heat and mass. **J. Exp. Zool**, v.1, p.81–86. 1987.

SWANN, G.S.; BRAKE, J. Effect of dry-bulb temperature, relative-humidity, and eggshell conductance during the first three days of incubation on egg weight loss and chick weight. **Poult. Sci.** v.69, p.535–544., 1990.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. *fuzzy* identification of systems and its applications to modeling and control. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v.15, p.116-132, 1985.

TAZAWA, H.; NAKAGAWA, S. Response of egg temperature, heart rate and blood pressure in the chick embryo to hypothermal stress. **J. Comp. Physiol.** v.155B, p.195–200., 1985.

TRANSCHEIT, R. Sistemas *fuzzy*. In: VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2003. **Anais...**, 2003.

UNIÃO BRASILEIRA DE AVICULTURA (UBA). **Relatório anual 2006/2007.**

<www.uba.org.br>, 10/06/07.

VAN BRECHT, A.; AERTS, J. M; DEGRAEVE, P.; BERCKMANS, D. Quantification and control of the spatiotemporal gradients of air speed and air temperature in a incubator. **Poultry Science**, v. 82, p.1677-1687, 2003.

VAN BRECHT, A.; JANSSENS, K.; BERCKMANS, D.; VRANKEN, E. Image processing to quantify the trajectory of a visualized air jet. **J. Agric. Eng. Res.** v.76, p.91–100. 2000.

VAN GOLDE, J.; BORM, J.P.; WOLFS, M.; GERVER, W.; BLANCO, C.E. The effect of hyperoxia on embryonic and organ mass in the developing chick embryo. **Respiratory Physiology.** v. 113 p.75–82. 1998.

VISSCHEDIJK, A.H.J. Physics and physiology of incubation. **Br. Poult. Sci.** v.32, p.3–20. 1991.

WANG, L.X. **Adaptive *fuzzy* systems and control: design and stability analyses.** Prentice Hall, 1994.

WANG, L.X. Stable adaptive *fuzzy* controllers with application to inverted pendulum tracking. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, Parte B, v.26, p.677-691, 1996.

WILSON, H.R. Physiological requirements of the developing embryo: Temperature and turning., p.145–156. In: TULLET, S.G. **Avian Incubation**, ed. Butterworth-Heinemann, London. 1991.

YAGER, R.R.; FILEV, D.P. **Essentials of *fuzzy* modeling and control.** Jhon Wiley e Sons, 1994.

YAHAV, S.; COLLIN, A.; SHINDER, D.; PICARD, M. Thermal manipulations during broiler chick embryogenesis: Effects of timing and temperature. **Poult. Sci.** v.83, p.1959-1963. 2004.

ZADEH, L.A. *fuzzy* sets. **Informatics and Control**, v.8, p.338-353, 1965.

ZADEH, L.A.; JAMSHIDI, M.; TITLI, A. Applications of *fuzzy* logic: towards high machine intelligence quotient systems. **Environmental and Intelligent Manufacturing Series**, Prentice Hall, 1997.