

**Marvin Aldo Chancán León**

**Projeto de um condicionador do ar de admissão  
para testes de motores**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador : Prof. Sergio Leal Braga  
Co-orientador: Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza

Rio de Janeiro  
Agosto de 2012



**Marvin Aldo Chancán León**

**Projeto de um condicionador do ar de admissão  
para testes de motores**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Sergio Leal Braga**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Carlos Valois Maciel Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. José Alberto dos Reis Parise**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Marco Antonio Meggiolaro**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Profa. Gisele Maria Ribeiro Vieira**

Diretora de Ensino – CEFET/RJ

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 09 de agosto de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Marvin Aldo Chancán León**

Graduou-se em Engenharia Mecatrônica na Universidad Nacional de Ingeniería – UNI (Lima, Peru) em 2009.

#### Ficha Catalográfica

Chancán León, Marvin Aldo

Projeto de um condicionador do ar de admissão para testes de motores / Marvin Aldo Chancán León; orientador: Sergio Leal Braga; co-orientador: Julio César Cuisano Egúsquiza. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

v., 91 f: il. (color) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Tese. 2. Testes de motores. 3. Condicionamento do ar de admissão. 4. Controle supervisão fuzzy. 5. Controle PID. I. Braga, Sergio Leal. II. Egúsquiza, Julio César Cuisano. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD:621

Dedicado aos meus pais, Aldo e Carmen.

## Agradecimentos

Ao professor Sergio Leal Braga, que sob sua orientação, confiança e suporte acadêmico foi possível a realização deste trabalho.

Ao co-orientador, Julio César Cuisano Egúsquiza, pelo apoio durante o desenvolvimento da pesquisa e revisão da dissertação.

Aos professores Ricardo Rodríguez Bustinza e Nilton Cesar Anchayhua Arestegui, da Universidad Nacional de Ingeniería, pelo apoio para começar meus estudos de pós-graduação.

À PUC-Rio, através dos professores e da equipe técnica e administrativa do Departamento de Engenharia Mecânica.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro (processo: 136110/2010-0).

## Resumo

Chancán León, Marvin Aldo; Braga, Sergio Leal; Egúsquiza, Julio César Cuisano. **Projeto de um condicionador do ar de admissão para testes de motores**. Rio de Janeiro, 2012. 91p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os laboratórios projetados para testes de motores de combustão interna trabalham sob normas que especificam métodos de ensaios aplicados à avaliação do desempenho do motor. Um motor veicular testado em um dinamômetro de bancada possui equipamentos auxiliares necessários para garantir condições de ensaio específicas, tal como a temperatura do ar de admissão, que deve ser mantida dentro dos valores indicados nas condições-padrão de referência da aplicação pretendida. Diante deste cenário, é evidente a importância de um estudo dos sistemas de condicionamento presentes nas salas de testes de motores. Esta dissertação apresenta o projeto, dimensionamento e simulação de um sistema de condicionamento que controla a temperatura e umidade do ar de admissão para realização de testes de motores de combustão dispostos em dinamômetros de bancada, independente das condições ambientais. A modelagem dinâmica do condicionador de ar e seus componentes (trocaador de calor de água gelada, aquecedor elétrico e umidificador) foi implementada no EES. O sistema de controle PID com dois esquemas de ajuste de ganhos (utilizando a fórmula de Ziegler-Nichols, e auto-sintonizado *on-line* por um sistema supervisório fuzzy) foi desenhado no MATLAB. Para avaliar o desempenho do condicionador e do seu sistema de controle foi estabelecida uma comunicação através do intercâmbio dinâmico de dados entre o MATLAB e o EES. Um estudo de simulação comparativa entre ambos esquemas de ajuste dos controladores, mostra que a estratégia de controle fuzzy supervisório PID proposta permite obter um melhor desempenho dinâmico do sistema condicionador, em termos de estabilidade diante variações tanto na vazão quanto nas condições do ar de admissão, segundo os resultados obtidos na simulação com dados experimentais de um motor Diesel testado sob o ciclo de ensaios dos 13 modos em estado estacionário (ESC test) para certificação de emissões.

## Palavras-chave

Testes de motores; condicionamento do ar de admissão; controle supervisório fuzzy; controle PID.

## Abstract

Chancán León, Marvin Aldo; Braga, Sergio Leal (Advisor); Egúsqüiza, Julio César Cuisano (Co-Advisor). **Design of an intake air conditioner for engine testing**. Rio de Janeiro, 2012. 91p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Engine testing laboratories designed for automotive vehicles operate under standards that specify test methods used to evaluate the performance of internal combustion engines. A vehicle engine tested on a dynamometer bench has auxiliary equipment required in order to ensure the test conditions, such as intake air temperature which must be maintained within the specified values by standard reference conditions of the intended application. Given this backdrop, it is clear the importance of study of conditioning systems present in engine test facilities. This dissertation presents the design, implementation and simulation of a conditioning system that controls temperature and humidity of the intake air for testing of combustion engines arranged in a dynamometer bench, regardless of ambient conditions. The dynamical modelling of the air conditioner and its components (chilled water heat exchanger, electric heater and humidifier) was implemented in EES. The PID control system with two gains adjustment schemes (using the Ziegler-Nichols formula, and self-tuned on-line with a fuzzy supervisory system) was designed in MATLAB. The conditioning unit performance and its control system was assessed using a communication established through of the dynamic data exchange between EES and MATLAB. A comparative simulation study on both schemes for tuning of controllers shows that the use of the PID supervisory fuzzy control strategy proposed allows for considerable improvements in dynamic performance of the system, in terms of stability on both variation in flow rate and conditions of the intake air, according to the results obtained in the simulation with experimental data of a heavy-duty Diesel engine over the test cycle 13 steady state modes (ESC test) for emission certification.

## Keywords

Engine testing; intake air conditioning; fuzzy supervisory control; PID control.

# Sumário

Sumário das notações	13
1 Introdução	17
1.1 Testes de motores	17
1.2 Objetivos do trabalho	19
1.3 Organização da dissertação	20
2 Revisão da literatura	21
2.1 Propriedades do ar	21
2.2 Processos de condicionamento de ar	26
2.2.1 Processos psicrométricos	26
2.2.2 Controle de temperatura, pressão e umidade	27
2.3 Condições e consumo de ar nos motores veiculares	29
2.3.1 Desempenho do motor	29
2.3.2 Condições-padrão de ensaio	33
2.4 Sistemas de controle para o condicionamento de ar	34
2.4.1 Classificação dos controladores	36
2.5 Técnicas de inteligência computacional	39
2.5.1 Lógica fuzzy	39
3 Projeto do condicionador	45
3.1 Condições do projeto	47
3.2 Dispositivos de atuação	47
3.2.1 Trocador de calor	47
3.2.2 Aquecedor elétrico	52
3.2.3 Umidificador	53
3.3 Sistemas de controle	55
3.3.1 Controle PID	55
3.3.2 Controle fuzzy supervisório PID	57
4 Modelagem matemática	60
4.1 Desumidificação e resfriamento	61
4.2 Aquecimento	66
4.3 Umidificação	66
4.4 Sistema de controle	67
5 Simulação e resultados	73
5.1 Parâmetros de simulação	73
5.2 Resultados	78
6 Conclusões	86
6.1 Trabalhos futuros	87
Referências bibliográficas	89



## Lista de figuras

1.1	Diagrama esquemático de uma sala de testes de motores, mostrado por Martyr & Plint [1].	18
2.1	Principais propriedades do ar representadas na carta psicrométrica, mostrado por Silva [6].	26
2.2	Sistema de controle para o condicionamento de ar.	34
2.3	Configuração de um sistema fuzzy, mostrado por Zimmermann [18].	40
2.4	Exemplo de fuzzificação da variável erro ( $e$ ).	41
3.1	Desenho esquemático do projeto da unidade de condicionamento do ar de admissão.	46
3.2	Trocador de calor para resfriamento e desumidificação [24].	49
3.3	Sistema de aquecimento com resistências elétricas [26].	52
3.4	Sistema de umidificação: a) tanque de água; b) garrafa de umidificação com resistência elétrica de imersão; c) tubo difusor de vapor [27].	54
3.5	Sistema de controle fuzzy supervisorio PID [32].	59
4.1	Esquema de uma serpentina de resfriamento.	61
4.2	Ilustração esquemática de um tubo reto aletado.	62
4.3	Sistema fuzzy que sintoniza os ganhos do PID em tempo real [32].	68
4.4	Funções de pertinência para $e(k)$ e $\Delta e(k)$ [32].	68
4.5	Funções de pertinência para $\beta$ e $\gamma$ [32].	69
4.6	Funções de pertinência para $\alpha$ [32].	69
4.7	Resposta típica ao degrau de um processo [37].	70
5.1	Controle da temperatura do ar por controladores PID.	78
5.2	Controle da umidade relativa do ar por controladores PID.	79
5.3	Controle de temperatura por controladores fuzzy supervisorio.	80
5.4	Controle de umidade relativa por controladores fuzzy supervisorio.	80
5.5	Perfil de temperaturas e vazão mássica da água gelada nas serpentinas do trocador de calor: a) controle PID; b) controle fuzzy supervisorio PID.	81
5.6	Perfil do consumo de potência do trocador de calor: a) controle PID; b) controle fuzzy supervisorio PID.	82
5.7	Parâmetros do controlador PID do trocador de calor ajustados <i>on-line</i> pelo sistema fuzzy supervisorio.	83
5.8	Perfil do consumo de potência das resistências elétricas da caixa de aquecimento: a) controle PID; b) controle fuzzy supervisorio PID.	83
5.9	Perfil de temperaturas e vazão mássica da água gelada nas serpentinas do trocador de calor, quando a temperatura da água apresenta oscilações: a) controle PID; b) controle fuzzy supervisorio PID.	84
5.10	Controle da temperatura do ar de admissão, quando a temperatura da água gelada na entrada das serpentinas do trocador de calor é oscilatória: a) controle PID; b) controle fuzzy supervisorio PID.	85

5.11 Controle da umidade relativa do ar de admissão, quando a temperatura da água gelada na entrada das serpentinas do trocador de calor é oscilatória: a) controle PID; b) controle fuzzy supervisorio PID.

85

## Lista de tabelas

2.1	Composição aproximada do ar seco.	21
2.2	Consumo de ar nos motores de combustão.	30
2.3	Características de operação de um condicionador de ar comercial.	34
3.1	Características de projeto do condicionador de ar de admissão.	47
3.2	Parâmetros do controlador PID obtidos a partir do método de resposta em frequência de Ziegler-Nichols.	57
4.1	Base de regras para o parâmetro $\beta$ [37].	71
4.2	Base de regras para o parâmetro $\gamma$ [37].	71
4.3	Base de regras para o parâmetro $\alpha$ [37].	71
5.1	Características das serpentinas de água gelada.	74
5.2	Parâmetros dos controladores PID obtidos pela fórmula de Ziegler-Nichols.	76
5.3	Dados experimentais de um motor Diesel testado sob o ciclo de ensaios dos 13 modos em estado estacionário [38].	77

*O sabio não é o que sabe, o sabio é o que faz  
aquilo que sabe.*

**Nuno Cobra**

## Sumário das notações

### Símbolos romanos

$A_{a,tot}$	área superfície de transferência de calor do lado do ar	[m <sup>2</sup> ]
$A_{w,tot}$	área superfície de transferência de calor do lado da água	[m <sup>2</sup> ]
$c_p$	calor específico a pressão constante	[kJ/kg-K]
$c_{pa}$	calor específico do ar seco a pressão constante	[kJ/kg-K]
$c_{pv}$	calor específico do vapor de água a pressão constante	[kJ/kg-K]
$c_{pw}$	calor específico de água a pressão constante	[kJ/kg-K]
$C_s$	capacidade térmica do material das serpentinas	[kJ/K]
$C_w$	capacidade térmica da água	[kJ/K]
$\dot{C}_a$	taxa da capacidade térmica do fluxo de ar	[kW/K]
$\dot{C}_w$	taxa da capacidade térmica do fluxo de água	[kW/K]
$D_t$	diâmetro do tubo	[m]
$e$	sinal de erro entre o valor desejado e o valor medido	[-]
$f_w$	fator de atrito do lado da água	[-]
$h$	entalpia específica, coeficiente de transferência de calor	[-]
$h_a$	entalpia específica do ar seco	[kJ/kg]
$h_a$	coeficiente de transferência de calor do ar	[W/m <sup>2</sup> -K]
$h_{a,e}$	entalpia específica de entrada do ar	[kJ/kg]
$h_{a,s}$	entalpia específica de saída do ar	[kJ/kg]
$h_a^*$	coeficiente de transferência de calor com desumidificação	[W/m <sup>2</sup> -K]
$h_s$	entalpia específica do ar à temperatura $T_s$	[kJ/kg]
$h_{s,sat}$	entalpia específica de saturação do ar à temperatura $T_s$	[kJ/kg]
$h_v$	entalpia específica do vapor de água	[kJ/kg]
$h_w$	coeficiente de transferência de calor da água gelada	[W/m <sup>2</sup> -K]
$H$	entalpia	[kJ]
$H_a$	entalpia do ar seco	[kJ]
$H_v$	entalpia do vapor de água	[kJ]
$k_d$	ganho derivativo	[-]
$k_i$	ganho integral	[-]
$k_p$	ganho proporcional	[-]
$K_u$	ganho crítico	[-]
$K_w$	coeficiente de condutividade da água	[W/m-K]
$L_t$	comprimento do tubo	[m]
$m_a$	massa de ar seco	[kg]

$m_v$	massa de vapor de água	[kg]
$\dot{m}_a$	vazão mássica de ar	[kg/s]
$\dot{m}_v$	vazão mássica de vapor de água	[kg/h]
$\dot{m}_w$	vazão mássica de água gelada	[kg/s]
$n$	rotação do motor	[rpm]
$N$	número de volumes de controle para a serpentina	[-]
$Nu_w$	número de Nusselt da água	[-]
$NTU_a$	número de unidades de transferência de calor do ar	[-]
$NTU_a^*$	núm. de unidades de transferência de calor e massa do ar	[-]
$p$	pressão	[kPa]
$p_a$	pressão de ar seco	[kPa]
$p_{sv}$	pressão de saturação do vapor de água	[kPa]
$p_v$	pressão de vapor de água	[kPa]
$P_{re}$	potência da resistência elétrica de imersão	[kW]
$Pr_w$	número de Prandtl do fluxo de água	[-]
PMS	ponto morto superior da carreira do pistão do motor	[-]
PMI	ponto morto inferior da carreira do pistão do motor	[-]
$Q_{re}$	capacidade de aquecimento da resistência elétrica	[kW]
$Q_{tc}$	capacidade de resfriamento do trocador de calor	[kW]
$R$	constante universal dos gases, resistência térmica	[-]
$R$	constante universal do ar	[kJ/kg-K]
$R_a$	constante universal do ar seco	[kJ/kg-K]
$R_v$	constante universal do vapor de água	[kJ/kg-K]
$R_a$	resistência térmica do lado do ar	[K/kW]
$R_w$	resistência térmica do lado da água	[K/kW]
$R_a^*$	resistência à transferência de calor e massa do lado do ar	[s/kg]
$Re_w$	número de Reynolds do fluxo de água	[-]
$t$	tempo	[s]
$T$	temperatura	[°C]
$T_{a,e}$	temperatura de entrada do ar	[°C]
$T_{a,s}$	temperatura de saída do ar	[°C]
$T_d$	constante de tempo derivativo	[-]
$T_i$	constante de tempo integral	[-]
$T_s$	temperatura da superfície das serpentinas	[°C]
$T_u$	período crítico	[-]
$T_w$	temperatura da água gelada	[°C]
$T_{w,e}$	temperatura de entrada da água gelada	[°C]
$T_{w,s}$	temperatura de saída da água gelada	[°C]
$u$	sinal de controle	[-]

$v_a$	velocidade do ar	[m/s]
$V$	volume	[m <sup>3</sup> ]
$V_d$	volume deslocado pelo pistão do motor entre PMI e PMS	[m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}_a$	vazão volumétrica de ar	[m <sup>3</sup> /h]
$\dot{V}_w$	vazão volumétrica de água	[m <sup>3</sup> /h]

### Símbolos gregos

$\alpha$	parâmetro de proporcionalidade entre $T_d$ e $T_i$	[-]
$\beta$	parâmetro de normalização do ganho $k_p$	[-]
$\gamma$	parâmetro de normalização do ganho $k_d$	[-]
$\Delta e$	câmbio no sinal de erro	[-]
$\varepsilon_a$	eficiência de transferência de calor do lado do ar	[-]
$\varepsilon_w$	eficiência de transferência de calor do lado da água	[-]
$\varepsilon_a^*$	eficiência de transferência de calor e massa do lado do ar	[-]
$\eta_a$	eficiência global das aletas na transferência de calor	[-]
$\eta_v$	eficiência volumétrica	[-]
$\eta_a^*$	eficiência global das aletas na transferência de calor e massa	[-]
$\mu$	viscosidade	[kg/m-s]
$\nu_a$	volume específico do ar	[m <sup>3</sup> /kg <sub>a</sub> ]
$\rho_a$	massa específica do ar	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	massa específica da água	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\phi$	umidade relativa do ar	[%]
$\omega$	umidade absoluta do ar	[kg <sub>v</sub> /kg <sub>a</sub> ]
$\omega_{a,e}$	umidade absoluta de entrada do ar	[kg <sub>v</sub> /kg <sub>a</sub> ]
$\omega_{a,s}$	umidade absoluta de saída do ar	[kg <sub>v</sub> /kg <sub>a</sub> ]

### Subscritos

$a$	ar
$a,e$	ar entrando
$a,s$	ar saindo
$d$	derivativo
$i$	integral
$p$	proporcional
$re$	resistência elétrica
$s$	superfície das serpentinas

<i>tc</i>	trocador de calor
<i>tot</i>	total
<i>u</i>	crítico
<i>v</i>	vapor de água
<i>vs</i>	vapor saturado de água
<i>w</i>	água gelada
<i>w,e</i>	água gelada entrando
<i>w,s</i>	água gelada saindo