

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
NÍVEL MESTRADO**

CRISTIAN FIGUEIREDO DOS SANTOS

**CONTROLE PREDITIVO APLICADO A UM SISTEMA HVAC:
Estudo de Caso: Sala Limpa do Instituto itt-CHIP/UNISINOS**

**SÃO LEOPOLDO
2019**

CRISTIAN FIGUEIREDO DOS SANTOS

CONTROLE PREDITIVO APLICADO A UM SISTEMA HVAC:
Estudo de Caso: Sala Limpa do Instituto itt-Chip/UNISINOS

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Ivan Goytia Mejia
Coorientador: Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler

SÃO LEOPOLDO
2019

S237c Santos, Cristian Figueiredo dos.
Controle preditivo aplicado a um sistema HVAC: Estudo de caso: Sala limpa do Instituto itt-Chip/UNISINOS / por Cristian Figueiredo dos Santos. -- São Leopoldo, 2019.

110 f. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, São Leopoldo, RS, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Rodrigo Ivan Goytia Mejia, Escola Politécnica; Coorientação: Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

1. Engenharia elétrica. 2. Energia – Consumo. 3. Sistemas de energia elétrica. 4. Ar condicionado. 5. Refrigeração. 6. Ventilação. 7. Aquecimento. I. Goytia Mejia, Rodrigo Ivan. II. Trierweiler, Jorge Otávio. III. Título.

CDU 621.3
620.9
621.311:697

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

Cristian Figueiredo dos Santos

CONTROLE PREDITIVO APLICADO A UM SISTEMA HVAC:
Estudo de Caso: Sala Limpa do instituto ITT-Chip/UNISINOS

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 23 de setembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Júlio Normey Rico – UFSC

Prof. Dr. Paulo Renato da Costa Mendes – UFSC

Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira – UNISINOS

Dr. Willyan Hasenkamp Carreira – HT Micron Semicondutores S.A.

Prof. Dr. Rodrigo Ivan Goytia Mejia (Orientador)

Visto e permitida a impressão

São Leopoldo,

Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira
Coordenador PPG Engenharia Elétrica

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi desenvolvido ao longo dos últimos dois anos e recebeu inúmeras contribuições, que não podem deixar de serem agradecidas:

No âmbito do meu núcleo familiar, à minha noiva Gabriela, que aguentou firme junto comigo um dos momentos mais difíceis que vivi ao longo do desenvolvimento do mestrado. Ela é a pessoa que incentivou a mim, quando ainda decidia se aceitava ou não o convite para desenvolver esse trabalho, e também é a pessoa que foi o meu maior combustível quando cogitava abandoná-lo.

Ao meu orientador e amigo Dr. Rodrigo Mejia, que mais uma vez me guiou com maestria nessa caçada ao Emu. Sinto-me privilegiado e inspirado a ter ao menos uma parcela de sua generosidade de ensinar.

Ao meu coorientador Jorge Trierweiler pelas valiosas sugestões ao longo do trabalho, pela disposição em ajudar a viabilizar esse projeto facilitando muito a trajetória até a obtenção dos resultados.

Ao amigo Me. José Eduardo Weber dos Santos do Departamento de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelas inúmeras e valiosas contribuições na concepção, desenvolvimento e sintonia do controle preditivo.

Ao colega ilustre Tiago Anacleto Pereira, pela imensurável contribuição ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho, e certamente sem ela poucas coisas descritas nessa dissertação seriam possíveis.

A instituição e funcionários do itt-Chip da Unisinos, que propiciaram um ambiente de geração de conhecimento de mais elevado padrão, permitindo a mim carregar com orgulho a bandeira da Unisinos pelos próximos passos da minha carreira.

Ao professor Dr. Eduardo Luis Rhod pelo apoio e incentivo, trazendo a luz no momento de escuridão do andamento da dissertação.

Ao professor Dr. Celso Peter, coordenador do itt-Chip, por abrir as portas do instituto tecnológico (literalmente) e estar sempre à disposição para contribuir. Esse trabalho tem o privilégio de ter a sua participação.

A empresa HT Micron Semicondutores S.A. pela contribuição financeira viabilizada pelo programa PADIS (Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores e Displays) do Governo Federal, na forma de bolsa de estudos parcial.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle avançado em nível de aplicação visando melhorias nos níveis de consumo energético nas instalações das salas limpas do instituto itt-Chip/Unisinos. Sistemas HVAC (*Heating Ventilation and Air Conditioning*) são responsáveis por grande parcela no custo de produção de semicondutores por conta da necessidade do controle de temperatura, umidade e pressão interna dos ambientes controlados. Além disso, grande parte das edificações do mundo necessitam de sistemas de climatização, realizados por sistemas HVAC em uma versão simplificada. Por conta do grande potencial de contribuição ao mercado de semicondutores, foi desenvolvido um sistema de controle preditivo multivariável em nível de aplicação visando o atendimento das especificações de controle requeridas pelas salas limpas do instituto tecnológico. De modo a obter-se a síntese do controlador preditivo, foi necessária uma prévia avaliação do sistema de controle original, caracterização dos processos e modelagem paramétrica a partir de ensaios de resposta. Uma aplicação de Simulink® foi desenvolvida com as bibliotecas de MPC (*Model Predictive Control*) e OPC® (*Open Platform Communications*) para processamento das leis de controle e comunicação com os atuadores através dos controladores lógicos programáveis locais. Em nível de aplicação foram desenvolvidos ensaios do comportamento servo e regulatório do controlador preditivo e a avaliação de um indicador de consumo energético (ECI) como forma de comparação entre o controle legado PID do itt-Chip e a nova estratégia de controle avançada implementada. Os resultados indicaram um bom comportamento servo e regulatório do controle MPC e uma redução no indicador de consumo energético que pode variar entre 80 e 90%, dependendo da sintonia escolhida para o controle preditivo.

Palavras-chave: HVAC. Controle Preditivo. MPC. Sala limpa. ECI.

ABSTRACT

This work presents the development of an advanced, application-level control system, aimed at improving energy consumption levels in the itt-Chip / Unisinos cleanroom facilities. Heating Ventilation and Air Conditioning (HVAC) systems account for a large portion of semiconductor production costs due to the need for temperature, humidity and internal pressure control of controlled environments. Considering that most of the world's buildings require climate control systems, there is a need for simplified HVAC systems. To address the great potential for new contributions to the semiconductor market, an application-level, multivariable predictive control system was developed to meet the control specifications required by the clean rooms of the technological institute. To obtain the synthesis of the predictive controller, an evaluation of the original control system was necessary, including process characterization and parametric modeling from response test analysis. A Simulink® application was developed using Model Predictive Control (MPC) and Open Platform Communications (OPC®) toolboxes for processing control laws and communication with actuators through local programmable logic controllers. At the application level, servo and regulatory behavior tests of the predictive controller, and the evaluation of an energy consumption indicator (ECI) were developed to compare the itt-Chip PID legacy control and the new advanced control strategy was implemented. The results indicated a good servo and effective regulatory behavior of the MPC control, and a reduction in energy consumption where the indicator read values between 80 and 90%, depending on the tuning chosen for the predictive control.

Keywords: HVAC. Predictive Control. MPC. Clean Rooms. ECI.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do processo de um ambiente controlado	22
Figura 2 – Representação do conceito de camada limite.....	26
Figura 3 – Representação dos fluidos envolvidos na troca térmica de uma serpentina	26
Figura 4 – Exemplo de diagrama psicrométrico básico para 1 atm.....	29
Figura 5 – Simplificação dos processos psicrométricos no diagrama de Carrier	32
Figura 6 – Processo psicrométrico de aquecimento considerando dados experimentais do itt-Chip Unisinos	33
Figura 7 – Processo psicrométrico de resfriamento e condensação considerando dados experimentais do itt-Chip Unisinos	33
Figura 8 – Resposta Livre vs Resposta desejada do processo.....	36
Figura 9 – Representação simplificada do algoritmo de controle MPC	37
Figura 10 – Representação de resultados esperados nos ensaios de resposta	43
Figura 11 – Procedimento de sintonia definido com base no desempenho da planta industrial	47
Figura 12 – Resultados obtidos na simulação entre Simulink® e IEA®	50
Figura 13 – Parte dos resultados apresentados por Platt et al. (2010)	52
Figura 14 – Regiões de operação desejadas baseadas no diagrama psicrométrico.....	56
Figura 15 – Comportamento transitório para o método de Schwingshackl et al. (2013)	57
Figura 16 – Fluxograma representativo da metodologia implementada	62
Figura 17 – Fluxograma representativo ao processo de modelagem realizado	63
Figura 18 – Representação da infraestrutura de testes e implementação	64
Figura 19 – Tela da interface HMI/SCADA – Menu Unidades Fancoil	65
Figura 20 – Arquitetura do Controlador Preditivo implementado.....	66
Figura 21 – Exemplo do efeito da suavização aplicada aos sinais ruidosos da planta	70
Figura 22 – Sinais utilizados na obtenção do indicador de consumo energético e suas parcelas	73
Figura 23 – Cenários de alteração de referência para avaliação dos resultados de consumo energético dos sistemas	75

Figura 24 – Ensaio em malha aberta e validação das funções de transferência do processo	76
Figura 25 – Resultados do comportamento servo e regulatório com uma sintonia agressiva no MPC	78
Figura 26 – Resultados do comportamento servo e regulatório com uma sintonia conservativa no MPC	79
Figura 27 – Resultados do comportamento servo e regulatório para a pressão interna da Sala Limpa.....	80
Figura 28 – Resultado do comportamento regulatório para a temperatura da sala limpa.....	82
Figura 29 – Resultado do comportamento regulatório para a Umidade Absoluta da sala limpa	83
Figura 30 – Dados experimentais do teste de respeito a restrição de temperatura ..	84
Figura 31 – Resultados do comportamento servo do controle PID legado do itt-Chip	85
Figura 32 – Cenário 1: Resposta de Controle MPC de desumidificação com sintonia agressiva	86
Figura 33 – Cenário 2: Resposta de Controle MPC no resfriamento e desumidificação com sintonia agressiva	87
Figura 34 – Cenário 3: Resposta de Controle MPC no resfriamento seco com sintonia agressiva.....	87
Figura 35 – Cenário 4: Resposta de Controle MPC no aquecimento com sintonia agressiva	88
Figura 36 – Cenário 3: Teste da redução da temperatura utilizando-se MPC com sintonia conservativa.....	90
Figura 37 – Cenário 4: Teste de aumento da temperatura utilizando-se MPC com sintonia conservativa.....	90
Figura 38 – Amostra de dados experimentais do sistema HVAC em regime permanente com controle PID legado	92
Figura 39 – Dados experimentais do sistema HVAC em regime permanente com controle preditivo com sintonia conservativa	93
Figura 40 – Evolução da razão entre o indicador ECI do controle preditivo e o indicador do controle PID legado (<i>Benchmark</i>)	93

Figura 41 – Amostra de dados experimentais do sistema de controle PID legado em regime permanente	94
Figura 42 – Dados experimentais do sistema HVAC em regime permanente com controle preditivo com sintonia agressiva.....	95
Figura 43 – Evolução da razão entre o indicador ECI do controle preditivo e o indicador do controle PID legado (<i>Benchmark</i>)	95
Figura 44 – Efeito da aplicação de peso w_y elevado na temperatura da sala	97
Figura 45 – Resultado experimental do aumento de peso w_u das válvulas de água quente e gelada.....	97
Figura 46 – Controle de pressão da sala limpa a partir do controle legado PID	100
Figura 47 – Visão geral do arquivo de Simulink® utilizado como ambiente de processamento do MPC	109
Figura 48 – Subsistema utilizado para obtenção do indicador ECI	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites máximos de concentração de partículas por m ³ de ar (NBR ISO 14644-1:2005)	24
Tabela 2 – Parâmetros típicos de salas limpas em função da classe	24
Tabela 3 – Exemplos de funções de transferência para os testes em malha aberta	43
Tabela 4 – Exemplo de Modelo MIMO completo após os ensaios de resposta	44
Tabela 5 – Resumo das referências bibliográficas – Controle MPC em sistemas HVAC	58
Tabela 6 – Resumo das referências bibliográficas para modelagem de sistemas HVAC	59
Tabela 7 – Lista de variáveis que compõe o sistema de controle MPC	66
Tabela 8 – Parâmetros de sintonia adotados no controle MPC	68
Tabela 9 – Fatores de escalonamento utilizados para normalização das variáveis ..	68
Tabela 10 – Matriz de influências entre as variáveis do sistema HVAC do itt-Chip ..	69
Tabela 11 – Composição das funções de transferência no modelo do sistema HVAC	71
Tabela 12 – Parâmetros das funções de transferência do sistema HVAC.....	71
Tabela 13 – Mapa dos testes realizados para obtenção dos resultados.....	74
Tabela 14 – Valores de referências considerados como cenários para avaliação do desempenho do controle preditivo.....	75

LISTA DE SIGLAS

A	Aquecimento Seco (Processo Psicrométrico)
AHU	<i>Air Handling Unit</i> Unidade de tratamento de ar
AU	Aquecimento com Umidificação (Processo Psicrométrico)
CARIMA	<i>Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average</i> Média Móvel Integrada auto-regressiva Controlada
CLP	Controlador Lógico Programável
DMC	<i>Dynamic Matrix Control</i> Controle por Matriz Dinâmica
ECI	<i>Energy Consumption Index</i> Indicador de Consumo de Energia
ECI	<i>Energy Consumption Index</i> Índice de Consumo de Energia
FOPDT	<i>First Order Plus Dead Time</i> Primeira ordem com tempo morto (atraso)
GOF	<i>Goodness of fit</i> Grau de ajuste
GPC	<i>Generalized Predictive Control</i> Controle Preditivo Generalizado
HMI	<i>Human-Machine Interface</i> Interface Homem-Máquina
HVAC	<i>Heating Ventilation and Air Conditioning</i> Aquecimento Ventilação e Condicionamento de Ar
LoLiMoT	<i>Local Linear Model Tree</i> Árvore do modelo linear local
MAC	<i>Model Algorithm Control</i> Controle Algorítmico Baseado em Modelo

MAE	<i>Mean Absolute Error</i> Erro absoluto médio
MIMO	<i>Multiple Input and Multiple Output</i> Múltiplas entradas e Múltiplas saídas
MPC	<i>Model Predictive Control</i> Controle Preditivo baseado em Modelo
MSE	<i>Mean Squared Error</i> Erro quadrático médio
OPC	<i>Open Platform Communications</i> Plataforma aberta de comunicações
PFC	<i>Predictive Functional Controller</i> Controlador Funcional Preditivo
PI	Proporcional e integral (controlador)
PID	Proporcional, Integral e Derivativo (controlador)
R	Resfriamento Seco (Processo Psicrométrico)
RD	Resfriamento com Desumidificação (Processo Psicrométrico)
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> Controle Supervisório e Aquisição de Dados
SISO	<i>Single Input and Single Output</i> Entrada Singular e Saída Singular
SOPDT	<i>Second Order Plus Dead Time</i> Segunda ordem com tempo morto (atraso)
UA	Umidificação Adiabática (Processo Psicrométrico)
UI	Umidificação Isotérmica (Processo Psicrométrico)
VAG	Válvula de Água Gelada
VAQ	Válvula de Água Quente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	16
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	16
1.3	TEMA DE ESTUDO	16
1.4	OBJETIVOS.....	16
1.4.1	Objetivo Geral	16
1.4.2	Objetivos Específicos	17
1.5	JUSTIFICATIVA.....	17
1.6	CONTRIBUIÇÕES	19
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
1.8	PRODUÇÃO TÉCNICO/CIENTÍFICA	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	FUNDAMENTOS DE SALAS LIMPAS.....	21
2.1.1	Descrição do sistema HVAC	21
2.1.2	Normas e padrões relacionados a salas limpas	23
2.2	FUNDAMENTOS DE FENÔMENOS DE TRANSPORTE.....	25
2.2.1	Transferência de calor por convecção	25
2.2.2	Transferência de calor por convecção através de uma serpentina ...	25
2.2.3	Psicrometria	27
2.2.3.1	Diagrama Psicrométrico.....	29
2.2.3.2	Processos psicrométricos	30
2.3	FUNDAMENTOS DO CONTROLE PREDITIVO.....	34
2.3.1	O conceito de horizonte deslizante no algoritmo MPC	35
2.3.2	Descrição da estrutura de um MPC	36
2.3.3	Modelo e estratégia de predição - caso GPC	36
2.3.4	Problema de otimização do controle preditivo	38
2.4	SÍNTESE DO CONTROLE PREDITIVO GPC	40
2.4.1	Análise do Processo e configuração do MPC	40
2.4.2	Desenvolvimento do modelo do processo e geração do MPC	41
2.4.3	Parâmetros de sintonia para o controle MPC	44
2.4.4	Ajuste do controlador MPC para faixas de operação	47
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	49

3.1	MODELAGEM DOS SISTEMAS HVAC.....	49
3.1.1	Desenvolvimento de modelos baseados em plataformas de simulação.....	49
3.1.2	Trabalhos baseados em modelagem paramétrica.....	51
3.2	ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PREDITIVO EM SISTEMAS HVAC.....	53
3.2.1	A modelagem inserida no algoritmo de controle preditivo.....	54
3.2.2	Estudos mais relevantes para o problema das salas limpas.....	55
3.2.3	Avaliação do consumo energético de sistemas de controle.....	56
3.2.4	Considerações finais sobre controle preditivo aplicado a sistemas HVAC.....	58
4	METODOLOGIA.....	62
4.1	AUDITORIA DA ENGENHARIA DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE.....	63
4.2	INTEGRAÇÃO DA APLICAÇÃO DA ARQUITETURA COM O MPC.....	64
4.2.1	Plataforma de desenvolvimento Elipse® E3.....	64
4.3	ELABORAÇÃO DO CONTROLADOR MPC.....	66
4.4	MODELAGEM E ANÁLISE DO SISTEMA HVAC.....	67
4.4.1	Estimação dos parâmetros das funções de transferência do sistema.....	69
4.4.1.1	Considerações a respeito da obtenção dos parâmetros das funções de transferência dos distúrbios medíveis.....	71
4.5	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	72
5	RESULTADOS.....	77
5.1	COMPORTAMENTO SERVO DO MPC COM SINTONIA AGRESSIVA (TESTE 1).....	77
5.2	COMPORTAMENTO SERVO E REGULATÓRIO DO MPC COM SINTONIA CONSERVATIVA (TESTE 2).....	78
5.3	CONTROLE DE PRESSÃO INTERNA DA SALA LIMPA (TESTE 3).....	79
5.4	COMPORTAMENTO REGULATÓRIO DO CONTROLADOR PREDITIVO COM SINTONIA AGRESSIVA (TESTE 4).....	81
5.5	TESTE DA APLICAÇÃO DE RESTRIÇÕES NO CONTROLE PREDITIVO COM SINTONIA CONSERVATIVA (TESTE 5).....	83
5.6	COMPORTAMENTO SERVO DO CONTROLE PID LEGADO DO ITT-CHIP (TESTE 6).....	84

5.7	CENÁRIO 1: PROCESSO DE DESUMIDIFICAÇÃO COM SINTONIA DO MPC AGRESSIVA (TESTE 9).....	85
5.8	CENÁRIO 2: PROCESSO DE RESFRIAMENTO E DESUMIDIFICAÇÃO COM SINTONIA DO MPC AGRESSIVA (TESTE 10)	86
5.9	CENÁRIO 3: PROCESSO DE RESFRIAMENTO SECO COM SINTONIA DO MPC AGRESSIVA (TESTE 11).....	87
5.10	CENÁRIO 4: PROCESSO DE AQUECIMENTO SECO COM SINTONIA DO MPC AGRESSIVA (TESTE 12).....	88
5.11	CENÁRIO 3: PROCESSO DE RESFRIAMENTO SECO COM SINTONIA DO MPC AGRESSIVA (TESTE 13).....	89
5.12	CENÁRIO 4: PROCESSO DE AQUECIMENTO SECO COM SINTONIA DO MPC CONSERVATIVA (TESTE 14)	90
5.13	ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA DO MPC COM SINTONIA CONSERVATIVA (TESTE 8)	91
5.14	ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA DO MPC COM SINTONIA AGRESSIVA (TESTE 7).....	94
5.15	CONSIDERAÇÕES SOBRE A SINTONIA DO CONTROLADOR PREDITIVO	96
6	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
6.1	TRABALHOS FUTUROS	101
	REFERÊNCIAS.....	103
	APÊNDICE A – AMBIENTE DE PROCESSAMENTO DO MPC	109

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de climatização de ar, tais como os sistemas HVAC (*Heating Ventilation and Air Conditioning*), representam grande parte do consumo energético em edificações no mundo. Esses sistemas, além de promover níveis adequados de conforto térmico, também são parte fundamental de processos produtivos que requerem um controle de umidade, temperatura e pressão de ambientes controlados, como por exemplo, encapsulamento e produção de circuitos integrados.

Melhorias nos níveis de consumo energético são basicamente o objetivo principal de muitos projetos acadêmicos e profissionais como meios de melhorar margens de lucro de companhias e organizações, embora o interesse global em reduzir desperdícios energéticos também estivesse em pauta. Segundo a Organização das Nações Unidas (2015), é necessária uma melhoria de 30% nos setores de edificações e construção até 2030 em termos de eficiência energética, para atingir-se as metas do Acordo de Paris.

Levando-se em conta estudos relacionados, como Yu (2012), Razmara et al. (2015), e Salsbury e Mhaskar (2013) é notável o potencial de economia de energia no uso de técnicas avançadas de controle sendo desenvolvidas atualmente. Segundo Zajic et al. (2011) estratégias de controle avançado possuem um maior potencial de economia uma vez que podem obter a lei de controle baseada num processo de otimização restritivo, além de possibilitar uma abordagem que contemple a interação entre as variáveis e as limitações do sistema. Além disso, segundo Butcher e Yarham (2000), ao menos 15% do consumo energético total de um sistema HVAC típico pode ser reduzido somente com melhorias no método de controle.

As considerações anteriormente descritas mostram um grande potencial de melhorias na aplicação de uma estratégia de controle avançado em um sistema HVAC, resultado de evidente interesse para a indústria, sociedade e comunidade científica. Para o estudo de caso, foram levados em conta os interesses específicos do Instituto Tecnológico Itt Chip que estão relacionados ao consumo de energia de seu sistema físico, além da produção acadêmica relacionada a esse trabalho. Porém vale ressaltar que os ganhos obtidos no desenvolvimento deste trabalho se estendem a inúmeros processos industriais, residenciais ou prediais, com ou sem especificações para salas limpas.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Tendo como base o estudo de caso baseado no Instituto Tecnológico itt Chip, o tema da dissertação é a otimização do consumo de energia nos sistemas HVAC.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O projeto relacionado ao estudo de caso proposto se limita a identificação e aplicação de uma estratégia de controle avançada adequada à otimização de energia no sistema HVAC do Instituto Tecnológico itt Chip.

1.3 TEMA DE ESTUDO

Ao se desenvolver este projeto de pesquisa, pretende-se responder a seguinte pergunta:

Qual a melhoria no consumo de energia do sistema HVAC do Instituto Tecnológico - itt Chip se usando algoritmos de controle avançado? A implementação de uma técnica de controle preditiva baseada na resolução de um problema de otimização sujeito a restrições em sistemas HVAC proporciona ganhos significativos no consumo de energia, uma análise comparativa de indicadores relacionados com o consumo de energia do sistema HVAC controlado por estratégias tradicionais e por estratégias avançadas confirmará os ganhos previstos.

1.4 OBJETIVOS

Com base no contexto anteriormente apresentado, este trabalho tem definidos os seguintes objetivos.

1.4.1 Objetivo Geral

Avaliar os ganhos na redução de consumo de energia de um sistema HVAC conhecido, quando aplicada uma estratégia de controle preditivo MIMO (*Multiple Input and Multiple Output*) baseada em modelo e na resolução de um problema de otimização sujeito a restrições.

1.4.2 Objetivos Específicos

Além de aprofundar os conhecimentos sobre controle preditivo, este trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Estudar os fundamentos e princípios de psicrometria, incluindo, carta psicrométrica, equipamentos e processos de tratamento de ar frente a diferentes cenários num sistema HVAC;
- b) Avaliar a lógica de controle e instrumentação do sistema HVAC presente no itt-Chip;
- c) Conceber e integrar uma arquitetura de aplicação para dispositivos de campo, sistema Elipse e Matlab® que utilize o padrão de interoperabilidade industrial OPC;
- d) Desenvolver e implementar uma sistemática para identificar e validar modelos do sistema HVAC frente às respostas do sistema físico;
- e) Desenvolver e implementar um controlador preditivo multivariável utilizando bibliotecas MPC do Matlab® para um sistema HVAC, utilizando como caso de estudo uma sala limpa do itt-Chip;
- f) Explorar e definir parâmetros de ajuste do controlador preditivo de forma que cumpra com as especificações do sistema;
- g) Avaliar o desempenho do comportamento servo e regulatório do sistema de controle preditivo proposto;
- h) Avaliar os ganhos na redução no consumo de energia aplicando a estratégia de controle preditivo;

1.5 JUSTIFICATIVA

Notoriamente, os sistemas de condicionamento de ar, em suas variadas formas possuem um expressivo consumo de energia, representando uma parcela importante do consumo em edificações. Segundo Muratori et al. (2012) os sistemas HVAC representam cerca de 40% do consumo total de uma edificação, podendo chegar a 60%. Ainda, conforme Sivak (2009), 87% das residências americanas já possuíam um sistema de condicionamento de ar em 2007, contra apenas 11% das residências brasileiras e 2% das residências indianas, apesar do clima severamente tropical de ambos os países em desenvolvimento. O estudo de Sivak (2009) concluiu que poderá

haver um grande salto nos níveis de consumo de energia globais em virtude da melhoria na economia dos grandes centros, como o Brasil e a Índia, somente em prol dos sistemas de condicionamento de ar residenciais e prediais.

Contudo, para que seja possível a melhoria desses sistemas, é necessária uma abordagem de controle baseada em modelos que submeta a lei de controle a um processo de otimização restritivo. Segundo Anderson et al. (2008), tradicionalmente utilizam-se estratégias de controle estruturadas em múltiplas malhas SISO (*Single Input - Single Output*) nos processos de climatização, porém foram possíveis melhorias expressivas com uma abordagem MIMO (*Multiple Output – Multiple Input*) especialmente porque nesses sistemas predomina a interação entre a umidade e temperatura do meio ao qual se pretende submeter o controle. Além disso, conforme Lee e Zheng (2014) as estratégias de controle PID tradicionais podem ser extremamente difíceis de serem sintonizadas.

Vantagens adicionais vem sendo publicadas nos últimos anos na aplicação de estratégias de controle avançadas, como realizado por Vašak e Starčić (2014) que fizeram o estudo da aplicação de uma estratégia de controle MPC (*Model Predictive Control*) em um sistema HVAC. Ainda segundo os autores, a estratégia de controle preditivo leva grandes vantagens diante das estratégias tradicionais uma vez que as condições futuras conhecidas sobre o sistema são utilizadas no processo de otimização, além de obedecer a condições específicas de incrementos de controle, e determinados limites de operação, tanto para as variáveis de processo, quanto para as variáveis manipuladas.

Portanto, torna-se evidente o grande potencial de melhorias na aplicação de uma estratégia de controle preditivo MIMO em um sistema HVAC, tendo em vista o grande interesse coletivo ao redor das questões referentes à redução dos níveis de consumo de energia e conseqüente redução nas taxas de emissão de CO₂ atuais. Além disso, a aplicação de uma estratégia de controle baseada em um processo de otimização restritiva indica trazer benefícios significativos no consumo energético do processo produtivo de chips semicondutores.

1.6 CONTRIBUIÇÕES

Tem-se como contribuições preliminares:

- Revisão bibliográfica das estratégias de controle baseadas em modelo para sistemas HVAC;
- Auditoria da engenharia de automação e controle do sistema HVAC para salas limpas do itt-Chip;
- Implementação de uma série de melhoras de engenharia no sistema de instrumentação e controle do sistema HVAC para salas limpas do itt-Chip
- Projeto e implementação do sistema de automação e controle baseado em modelo aplicado a um sistema HVAC para uma sala limpa do itt-Chip;
- Desenvolvimento de sistema supervisor e integração da arquitetura de aplicação para dispositivos de campo sistema supervisor Elipse e Matlab utilizando OPC;

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta um estudo sobre os benefícios da aplicação de uma estratégia de controle avançada em um sistema de aquecimento, refrigeração, e condicionamento de ar (HVAC) frente ao controle PID tradicional instalado na infraestrutura das salas limpas do itt-Chip Unisinos.

Para uma melhor compreensão do trabalho, este foi dividido em seis capítulos, estruturados na seguinte ordem:

Capítulo 1 – Introdução: Este capítulo apresenta a definição do tema, o alcance do projeto, os objetivos gerais e específicos e a justificativa destacando a motivação e importância desta pesquisa.

Capítulo 2 – Fundamentação teórica: Este capítulo apresenta uma síntese da fundamentação teórica das técnicas para projetar e sintonizar controladores preditivos (MPC), bem como modelar e testar processos multivariáveis tais como sistemas HVAC relacionados a salas limpas.

Capítulo 3 – Revisão bibliográfica: Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica do estado da arte em relação ao problema da aplicação de estratégias de controle avançado, sobretudo em sistemas relacionados a salas limpas.

Capítulo 4 – Metodologia: Este capítulo apresenta uma síntese das ferramentas, métodos e procedimentos utilizados no projeto.

Capítulo 5 – Análise de resultados: Este capítulo apresenta a aplicação das técnicas estudadas em torno da metodologia proposta para controlar e otimizar um sistema de bombeamento em nível acadêmico.

Capítulo 6 – Conclusão e considerações finais: Este capítulo apresenta as principais conclusões e considerações do projeto assim como as sugestões para a sua continuidade em trabalhos futuros.

1.8 PRODUÇÃO TÉCNICO/CIENTÍFICA

Relatórios de pesquisa¹:

- PEREIRA, T, A., MEJIA, R. I. G., **FIGUEIREDO, S. C.**, Auditoria da engenharia de automação e controle do sistema HVAC para salas limpas do ITT – Chip / UNISINOS. Relatório de pesquisa.
- **FIGUEIREDO, S. C.**, MEJIA, R. I. G., PEREIRA, T, A., Projeto de sistema supervisório do sistema HVAC para salas limpas do ITT - Chip / UNISINOS.

¹ A publicação de artigos não foi confirmada até a data de defesa da dissertação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será descrita a fundamentação teórica necessária para a implementação das técnicas que serão utilizadas na metodologia para cumprir os objetivos específicos propostos.

2.1 FUNDAMENTOS DE SALAS LIMPAS

Os fundamentos da infraestrutura e normas relacionadas às salas limpas são descritos nesta seção.

2.1.1 Descrição do sistema HVAC

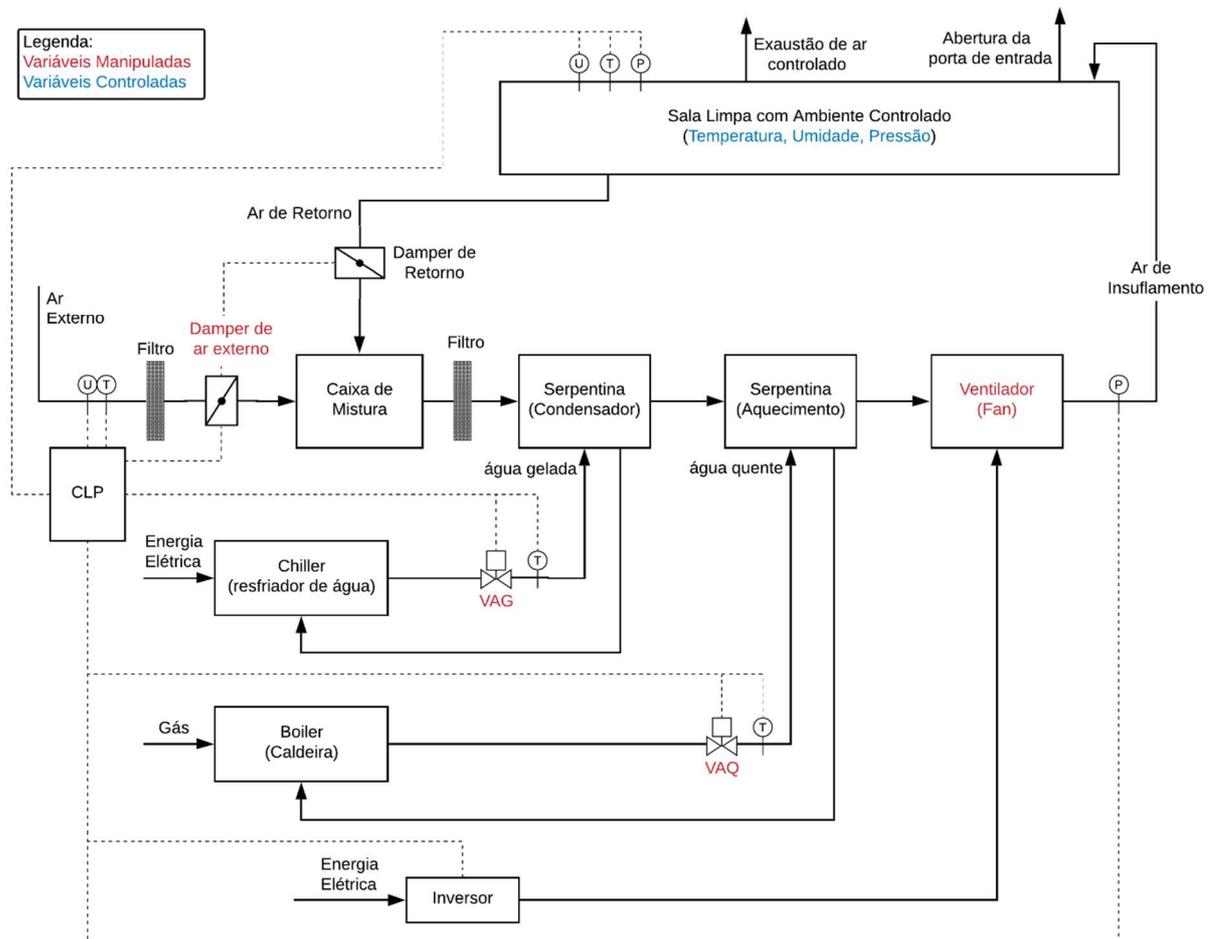
Sistemas HVAC (*Heating Ventilation and Air Conditioning*) são um conjunto de elementos que fundamentalmente são utilizados para controlar parâmetros de interesse de um ambiente. Tendo em vista os diferentes tipos de processos produtivos e as diferentes características climáticas possíveis, é possível verificar a aplicação de diferentes topologias de acordo com as características necessárias para o condicionamento de ar desejado. (MCDOWALL, 2006).

Segundo Mcdowall (2006), existem sete principais processos com os quais é possível obter total controle sobre o condicionamento do ar:

1. Aquecimento: Ato de adicionar calor à massa de ar controlada;
2. Resfriamento: Ato de retirar calor da massa de ar controlada;
3. Umidificação: Ato de aumentar a umidade da massa de ar controlada;
4. Desumidificação; Ato de remover a umidade da massa de ar controlada;
5. Limpeza (filtragem): Ato de remover partículas e contaminantes biológicos da massa de ar entregue ao ambiente controlado;
6. Ventilação: Processo relacionado à mistura do ar externo com o ar do ambiente controlado de modo a diluir contaminantes, ou exaustão do ar do ambiente controlado em direção ao meio externo;
7. Movimentação do ar: Processo relacionado à circulação do ar no ambiente controlado;

Na figura 1 é apresentado um sistema HVAC típico, tomado como estudo de caso nesse trabalho. Os seus elementos principais, responsáveis por realizar parte dos processos de condicionamento de ar possíveis, são listados a seguir.

Figura 1 – Representação do processo de um ambiente controlado



Fonte: Elaborada pelo autor.

- Caixa de mistura: Espaço localizado na entrada da AHU (*Air Handling Unit*)¹ onde se encontram os fluxos de ar externo e de retorno do ambiente controlado;
- *Damper*: Elemento composto por um conjunto de pás paralelas comandadas por um servo motor, que tem por objetivo produzir um controle do fluxo do ar;

¹ AHU (*Air Handling Unit*): Equipamento que integra os elementos de troca térmica, soprador, dampers, caixa de mistura, e filtros em uma única unidade;

- Filtros: São os elementos responsáveis pela retenção de partículas presentes no ar que se desloca pela AHU em direção ao duto de insuflamento;
- Serpentina de água gelada (condensador): Elemento que promove a troca térmica entre o ar que circula pela AHU e a água gelada pelo *Chiller*, podendo ao mesmo tempo produzir a redução de temperatura e condensação de vapor d'água do ar.
- Serpentina de água quente: Elemento que promove a troca térmica entre o ar que circula pela AHU e a água aquecida pelo *Boiler*;
- Um soprador (*blower*, ou *fan*): Elemento que promove o deslocamento do ar pelo interior da AHU, podendo sua rotação variar dentro de uma faixa de operação aceitável, controlada por um inversor.

Além dos elementos mencionados, os sistemas HVAC necessariamente necessitam de um sistema de controle estruturado adequado. No domínio eletroeletrônico é sensato considerar a utilização de um CLP (controlador lógico programável) na aquisição de sinais dos sensores, processamento das leis de controle e envio de sinais contínuos para atuadores. (MCDOWALL, 2006).

2.1.2 Normas e padrões relacionados a salas limpas

Tendo em vista a necessidade de se garantir a produtividade de um processo de fabricação de um chip semicondutor, é importante projetar as salas limpas de acordo com cada processo e dimensões de chip envolvidas. Pode-se citar como principal padronização na classificação de salas limpas, a norma ISO 14644, e a correspondente norma brasileira NBR ISO 14644. Segundo a norma NBR ISO 14644-1:2005 as salas limpas podem ser classificadas segundo a concentração de partículas por unidade de volume de uma amostra do ambiente controlado. Portanto, uma sala limpa que apresentar um limite máximo de 10 partículas de 0,1 μ m e 2 partículas de 0,2 μ m por metro cúbico, e ainda não apresentar partículas maiores na amostra, poderá ser classificada como uma sala limpa ISO Classe 1. Os resultados de medições de concentração de partículas são obtidos a partir de instrumentos dedicados, podendo ser portáteis, ou fixos. A tabela 9144 apresenta os limites máximos de concentração de partículas conforme a NBR ISO 14644-1:2005 (THOMAS *et al.*, 2011).

Tabela 1 – Limites máximos de concentração de partículas por m³ de ar (NBR ISO 14644-1:2005)

Fonte: Thomas *et al.* (2011).

Número de Classificação ISO(n)	Limites máximos de concentração (partículas/m ³ de ar) para partículas iguais ou maiores que os tamanhos considerados					
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
ISO Classe 1	10	2				
ISO Classe 2	100	24	10	4		
ISO Classe 3	1 000	237	102	35	8	
ISO Classe 4	10 000	2 370	1 020	352	83	
ISO Classe 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
ISO Classe 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO Classe 7				352 000	83 200	2 930
ISO Classe 8				3 520 000	832 000	29 300
ISO Classe 9				35 200 000	8 320 000	293 000

Um dos parâmetros de maior relevância na operação de salas limpas é a taxa de trocas de ar por unidade de tempo (tipicamente número de trocas por hora). Esse parâmetro é um indicador que está relacionado com a vazão de ar limpo para o interior da sala, indicando quantas vezes por hora o volume de ar da sala é insuflado pela AHU². Ainda conforme a norma NBR ISO 14644-1:2005, são utilizados parâmetros típicos na operação de salas limpas, os quais são resumidamente apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros típicos de salas limpas em função da classe

Parâmetro ISO 146144	Classe 100 (ISO-5)	Classe 1000 (ISO-6)	Classe 10.000 (ISO-7)	Classe 100.000 (ISO-8)
Trocas/hora	100-400	40-120	20-40	5-40
Temperatura (°C)	19-21	18-22	18-22	18-22
Umidade Relativa (%)	42-48	45-55	45-55	45-55

Fonte: Fonte: NBR ISO 14644-1:2005.

² Para medição da vazão de ar de insuflamento, seria necessário um tubo de pitot de modo a obter-se a velocidade do ar insuflado, e então obter-se a vazão relacionando-a com a secção transversal do duto de insuflamento.

2.2 FUNDAMENTOS DE FENÔMENOS DE TRANSPORTE

Uma síntese dos fundamentos de fenômenos de transporte, transferência de calor e massa, relacionados a sistemas HVAC é apresentada nesta seção.

2.2.1 Transferência de calor por convecção

A transferência de energia na forma de calor ocorre sempre que existe diferença de temperatura em um meio ou entre dois meios. Pode ocorrer segundo três formas: Convecção, Condução e Radiação. A convecção é o fenômeno relacionado a transferência de calor entre uma superfície e um fluido em movimento em razão da diferença de temperatura entre eles. (BERGMAN *et al.*, 2011; CASTRO, 2017).

Para melhor compreensão do fenômeno de troca de calor por convecção se faz necessário o entendimento do conceito de camada limite, conforme representado na figura 2. Desta forma, um fluido que possui fluxo livre μ_{∞} (ponto "A"), ao encontrar uma superfície (ponto "B") ocorre uma redução da velocidade das partículas mais próximas da superfície, em função de tensões de cisalhamento τ . À medida que o valor de y aumenta, a velocidade das partículas μ também é incrementada, até que temos a velocidade do fluido conforme seu fluxo livre, que ocorre no ponto δ , que é equivalente a $0,99\mu_{\infty}$ e é incrementado em função de x . Portanto, a camada limite é definida pela região entre a superfície e o ponto δ , onde o fluido interage com a superfície em termos de troca térmica. (BERGMAN *et al.*, 2011; CASTRO, 2017; GIORGETTI, 2015).

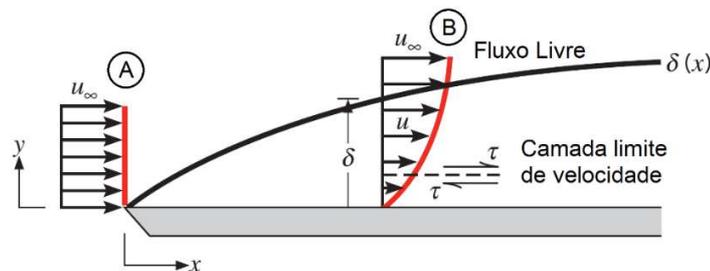
Além disso, o conceito de camada limite implica que a taxa de deslocamento do fluido quando $y = 0$ é nulo, ou seja, analisamos o fenômeno sob a perspectiva de que não há movimento das partículas mais próximas da superfície. Por esse motivo, considera-se que nesse ponto deve ocorrer a transferência de energia da superfície para o fluido por direta condução térmica. (BERGMAN *et al.*, 2011; CASTRO, 2017; GIORGETTI, 2015)

2.2.2 Transferência de calor por convecção através de uma serpentina

Serpentinas são elementos presentes em inúmeros processos industriais, especialmente em sistemas HVAC e basicamente é o elemento que permite a troca térmica entre dois fluidos (ar e água), através do fenômeno da convecção. Analisando-se

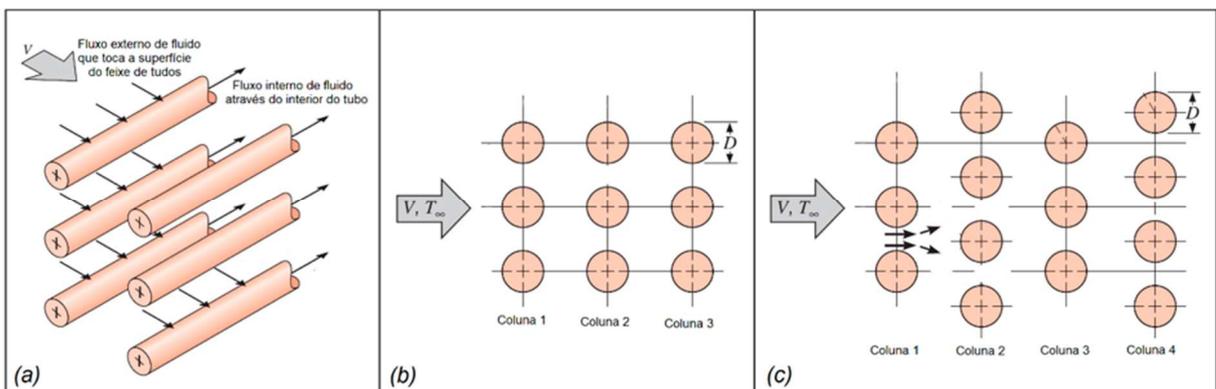
a figura 3, percebe-se que a disposição dos tubos na construção da serpentina tem influência direta na performance da troca térmica. Por exemplo, a convecção que ocorre através da troca térmica com os tubos da primeira coluna é a mesma se considerando apenas um tubo livre sendo cortado pelo fluido externo. Tipicamente, o coeficiente de convecção aumenta até aproximadamente a quinta coluna, porém para tubulações alinhadas (figura 3b) com S_L elevados, a influência das tubulações seguintes diminui, e o fator de convecção não tem aumento considerável. Por esse motivo, não se recomenda essa topologia para uma melhor troca térmica, uma vez que a passagem do ar por um caminho tortuoso, no caso de geometria escalonada (figura 3c) favorece a troca térmica, especialmente para condições de baixo número de Reynolds ($Re < 100$). (BERGMAN *et al.*, 2011; CASTRO, 2017; GIORGETTI, 2015).

Figura 2 – Representação do conceito de camada limite



Fonte: Adaptado de Bergman et al. (2011).

Figura 3 – Representação dos fluidos envolvidos na troca térmica de uma serpentina



Fonte: Adaptado de Bergman et al. (2011).

Se apenas um tubo com pequeno comprimento fosse considerado, seria possível se aproximar o fluxo térmico entre o ar e a serpentina se utilizando diretamente $\Delta T = (T_s - T_\infty)$, porém no caso da serpentina, ocorre uma mudança considerável da temperatura do fluido interno ao longo do percurso. Por esse motivo, utiliza-se a média logarítmica, obtida através da equação (1) (BERGMAN *et al.*, 2011).

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_i) - (T_s - T_o)}{\ln\left(\frac{T_s - T_i}{T_s - T_o}\right)} \quad (1)$$

Sendo,

T_s : Temperatura de superfície da serpentina, em °C;

T_i : Temperatura do fluido de entrada da serpentina (*inlet*) em °C;

T_o : Temperatura do fluido de saída da serpentina (*outlet*) em °C;

2.2.3 Psicrometria

A psicrometria é a ciência que estuda os fenômenos físicos relacionados à mistura de ar seco e vapor de água que nos rodeia, naturalmente preocupada com as condições termodinâmicas dessa mistura, em virtude de necessidades ambientais, humanas e tecnológicas. (MARTINELLI, 2002).

Algumas propriedades termodinâmicas fazem parte do escopo dos fundamentos necessários para desenvolvimento deste trabalho, e estas propriedades foram definidas por Martinelli (2002), Gatley (2013) e Mcdowall (2006), e serão descritas a seguir:

- a) Temperatura de bulbo seco - T : É a temperatura que é indicada em um termômetro, protegido de radiação ou outras fontes de calor, imerso no ar úmido do ambiente de interesse;
- b) Temperatura de bulbo úmido - T_{BU} : É a temperatura medida por um termômetro cujo bulbo está constantemente umedecido. Para correta leitura dessa temperatura é necessária a utilização de um *psicrômetro* que irá produzir uma ventilação constante de aproximadamente 3 m/s produzindo uma redução da temperatura de bulbo úmido por influência da evaporação da água.
- c) Temperatura de orvalho - T_o : É a temperatura na qual ocorre a condensação das partículas de água presentes na mistura ar seco – vapor de água, a uma pressão constante e conteúdo de umidade constante.
- d) Pressão de vapor saturado - P_{vs} : É a pressão parcial exercida pelas moléculas de água presentes no ar úmido quando ele está saturado. A equação (2) relaciona a pressão de vapor saturado (em Pascal) com a temperatura de bulbo seco T em °C, conforme Vömel (2011). É importante lembrar que para

obtenção da pressão de vapor parcial, basta multiplicar-se P_{vs} pela umidade relativa φ .

$$P_{vs} = 610,8 \cdot e^{\left(\frac{17,3T}{237,3+T}\right)} \quad (2)$$

e) Umidade absoluta - U_A : É a quantidade de vapor de água presente na mistura de ar úmido, por unidade de massa de ar seco. O valor da umidade absoluta pode ser obtido a partir da informação de pressão de vapor saturado, a partir da simplificação da equação universal dos gases, conforme Vömel (2011):

$$U_A = \frac{0,6219 \cdot \varphi \cdot P_{vs}}{P_{ATM} - (\varphi \cdot P_{vs})} \quad (3)$$

Sendo:

P_{vs} : Pressão de vapor saturado, em Pascal;

P_{ATM} : Pressão atmosférica, em Pascal;

U_A : Umidade absoluta em kg de água/kg ar seco;

f) Umidade Relativa - φ : É a relação entre a pressão de vapor parcial e pressão de vapor de saturação relacionado a mistura de ar úmido. Em outras palavras, corresponde ao percentual da máxima quantidade de vapor d'água que o ambiente é capaz de conter em determinada temperatura. Por esse motivo, é percebido que ao se aumentar a temperatura de uma determinada massa de ar úmido, ocorre a diminuição da umidade relativa, uma vez que o aquecimento torna possível a absorção de mais vapor d'água.

g) Entalpia - h : A entalpia é a quantidade total de energia de calor sensível no ar e calor latente no vapor d'água, presente na mistura de vapor d'água e ar seco por unidade de massa. A entalpia específica pode ser obtida como uma função da temperatura e umidade absoluta, conforme

$$h = 0,24 T + (597,3 + 0,441 T)U_A \quad (4)$$

Sendo:

h : Entalpia específica do ar úmido, em kcal/kg de ar seco;

T : Temperatura de bulbo seco, em °C;

U_A : Umidade absoluta em kg de água/kg ar seco;

2.2.3.1 Diagrama Psicrométrico

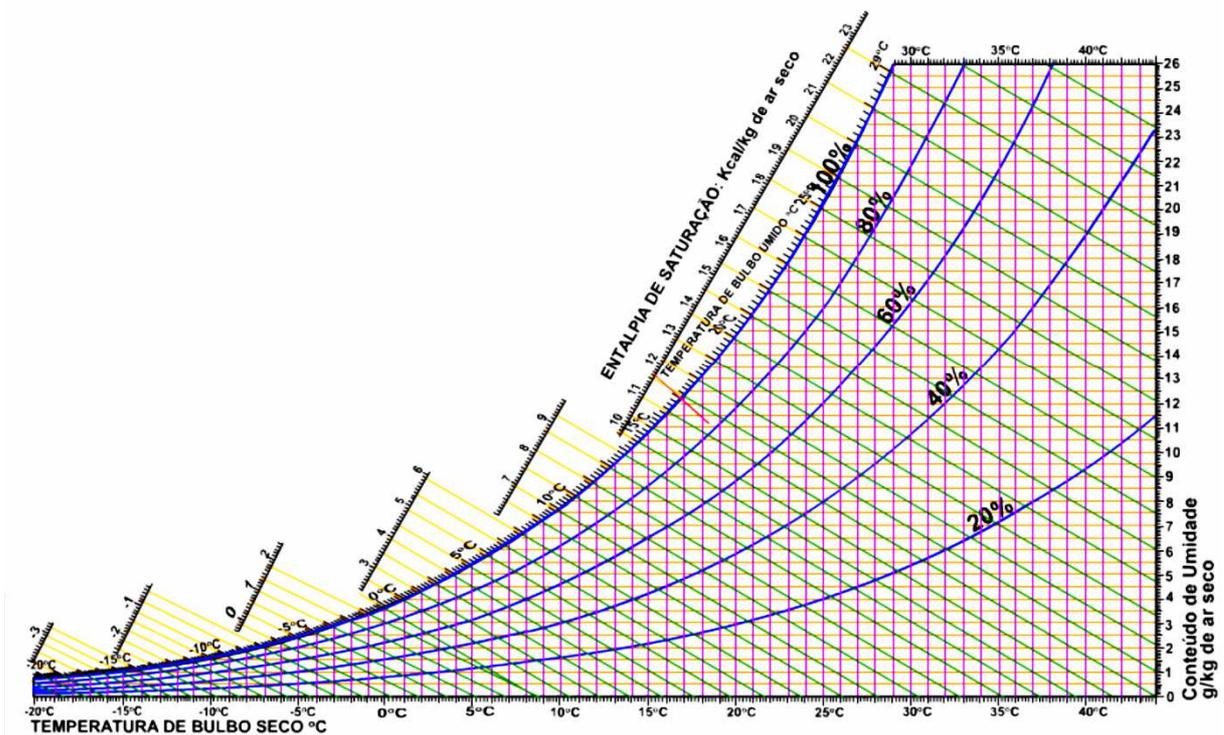
O diagrama psicrométrico é uma ferramenta importante na etapa de projeto e operação de sistemas onde se necessita saber o ponto de operação do ar úmido em detrimento de alterações em virtude de processos psicrométricos, como por exemplo: processos de mistura de ar úmido e processos de aquecimento e resfriamento por serpentinas. (GATLEY, 2013).

Pode-se verificar na figura 4 a relação direta entre as grandezas descritas na seção anterior, podendo dessa forma, levantar as características psicrométricas de determinado ambiente. De forma resumida, as linhas horizontais fazem parte da escala de umidade absoluta, enquanto as linhas verticais constituem a escala de temperatura de bulbo seco. Já as linhas diagonais fazem parte tanto da escala de entalpia específica quanto da escala de temperatura de bulbo úmido, enquanto as curvas azuis que cortam o diagrama representam os valores de umidade relativa. Um fato importante é que a temperatura de bulbo úmido compartilha a sua escala com a temperatura de orvalho, porém a primeira é observada seguindo-se as linhas diagonais enquanto a segunda é observada se seguindo as linhas horizontais.

Em um sistema de controle de uma sala limpa será necessário verificar constantemente a localização das variáveis medidas (normalmente umidade relativa e temperatura de bulbo seco) no diagrama psicrométrico. Desta forma, a mudança do ponto de operação do sistema deve ser facilmente reconhecida frente a ações de controle.

Importante salientar a dependência direta que as curvas obtidas pelo diagrama da figura 4 tem com a pressão atmosférica, conforme apresentado algebricamente na equação (3). Por esse motivo, correções são necessárias na observação de diagramas psicrométricos, que normalmente são apresentados com base na pressão atmosférica de 1 atm (760 mmHg).

Figura 4 – Exemplo de diagrama psicrométrico básico para 1 atm



Fonte: Adaptado de Fernandes e Kinoshita (2011)

2.2.3.2 Processos psicrométricos

Podem ser listados os processos psicrométricos de maior importância para um sistema HVAC, conforme Martinelli (2002):

a) Processo de mistura adiabática de duas quantidades de ar úmido: O processo de mistura adiabática é muito comum em sistemas de condicionamento de ar (HVAC), uma vez que ocorre o retorno do ar do ambiente controlado para a unidade *Fan Coil* juntamente com ar externo, deslocando o ponto de operação do diagrama psicrométrico na entrada da unidade. Ainda segundo Martinelli (2002), a entalpia específica e a umidade absoluta final encontrada após a mistura deverá ser a média da entalpia específica e umidade absoluta das correntes de ar úmido antes da mistura, ponderadas ao valor de vazão mássica. Esse processo define os fenômenos que ocorrem na caixa de mistura da AHU, onde uma vazão mássica de ar externo encontra a vazão mássica de ar de retorno do ambiente controlado.

b) Aquecimento seco (A): Quando introduzimos calor ao sistema, a sua temperatura deverá aumentar, porém a massa de vapor d'água deverá permanecer inalterada. Por esse motivo, ao analisarmos o diagrama psicrométrico, será percebido um deslocamento do ponto de operação para a direita sobre a linha da umidade

absoluta, ao aquecermos o ar úmido através de uma serpentina ou por um atuador elétrico. Na prática, ao proceder o aquecimento do ambiente percebe-se, porém, um leve incremento de umidade devido ao desprendimento de umidade aderida em superfícies do ambiente controlado, vaporização de água presente na serpentina de água gelada que outrora estava condensando umidade, e vaporização de água do sistema de drenagem. Recomenda-se, portanto, que o sistema de drenagem seja eficiente, evitando o distúrbio excessivo de umidade absoluta no ambiente controlado.

c) Resfriamento seco (R) e Desumidificação (D): Quando realizamos o resfriamento do ar úmido de determinado ambiente, ao aplicarmos na serpentina uma fonte de água fria com temperatura inferior ao ponto de orvalho, ocorrerá condensação do vapor d'água na superfície da serpentina. Uma vez aplicada essa estratégia, haverá um deslocamento horizontal do ponto de operação para a esquerda até a linha correspondente a umidade relativa de 100%, quando deverá ocorrer o processo de desumidificação. Importante frisar que a condensação passa a ocorrer antes do ponto de operação atingir a escala de umidade relativa máxima, uma vez que a serpentina, outras partes do sistema HVAC, e até mesmo superfícies presentes no ambiente de controle devem propiciar condensação desde que estejam abaixo do ponto de orvalho. Quando o processo de resfriamento não retira energia suficiente da massa de ar úmido, não ocorre condensação e, portanto, percebe-se o deslocamento do ponto de operação para a esquerda. Considerando-se o caso do itt-Chip da Unisinos, e possivelmente a maioria dos sistemas HVAC, o resfriamento implica em condensação, pois a temperatura da água gelada gira em torno de 6°C e, portanto, promove condensação ao mesmo tempo em que ocorre o resfriamento. Além disso, considerando-se que ocorre perturbação de umidade através da entrada de ar externo úmido ao sistema, para perceber-se a redução de umidade no ambiente controlado será necessário que a taxa de condensação na serpentina de água gelada seja maior que a taxa de entrada de umidade ao sistema através do damper de ar externo.

d) Umidificação adiabática (UA): O processo de adição de vapor d'água sem alterar a energia do sistema faz com que o ponto de operação se mova, no diagrama psicrométrico, sobre a linha de entalpia de saturação (processo isoentálpico) até encontrar a máxima umidade relativa. Esse processo ocorre quando há a aplicação de spray de água que será absorvida pelas partículas de ar. No itt-Chip da Unisinos não existe esse processo, portanto, a

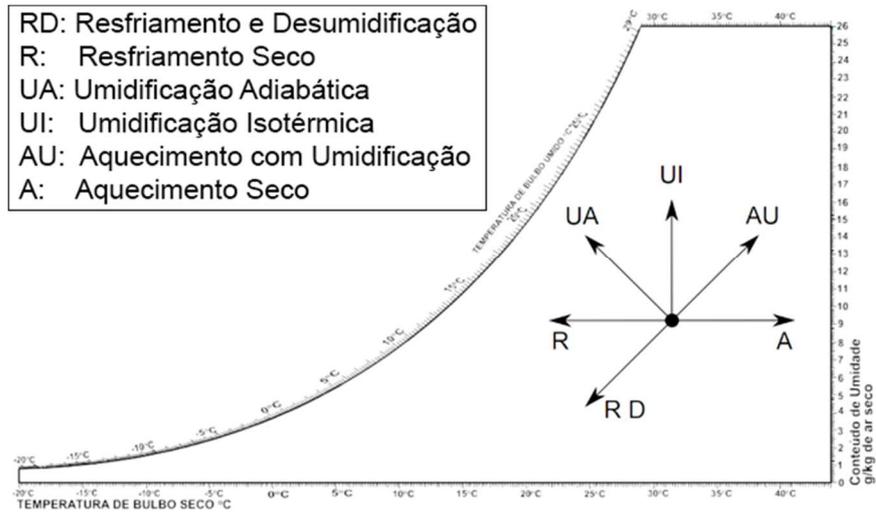
umidificação do ambiente controlado só poderá ocorrer pela perturbação de umidade através do damper de ar externo.

e) Aquecimento e umidificação (AU): Caso a temperatura da água pulverizada esteja na mesma temperatura de bulbo seco do ar, a umidificação ocorrerá verticalmente para cima (umidificação isotérmica - UI), enquanto que no caso da pulverização de água em temperaturas superiores à temperatura de bulbo seco (ou injeção de vapor d'água), o ponto de operação se deslocará para cima e para direita, deste modo incrementando a temperatura de bulbo seco e umidade absoluta.

Um resumo do deslocamento do ponto de operação sobre o diagrama psicrométrico é apresentado abaixo na figura 5, e na sequência, são apresentados os processos psicrométricos com dados experimentais da sala limpa do itt-Chip segundo as ações de abertura das válvulas de água quente e válvula de água gelada, respectivamente, nas figuras 6 e 7, de modo a exemplificar os aspectos práticos relacionados a psicrometria das salas limpas.

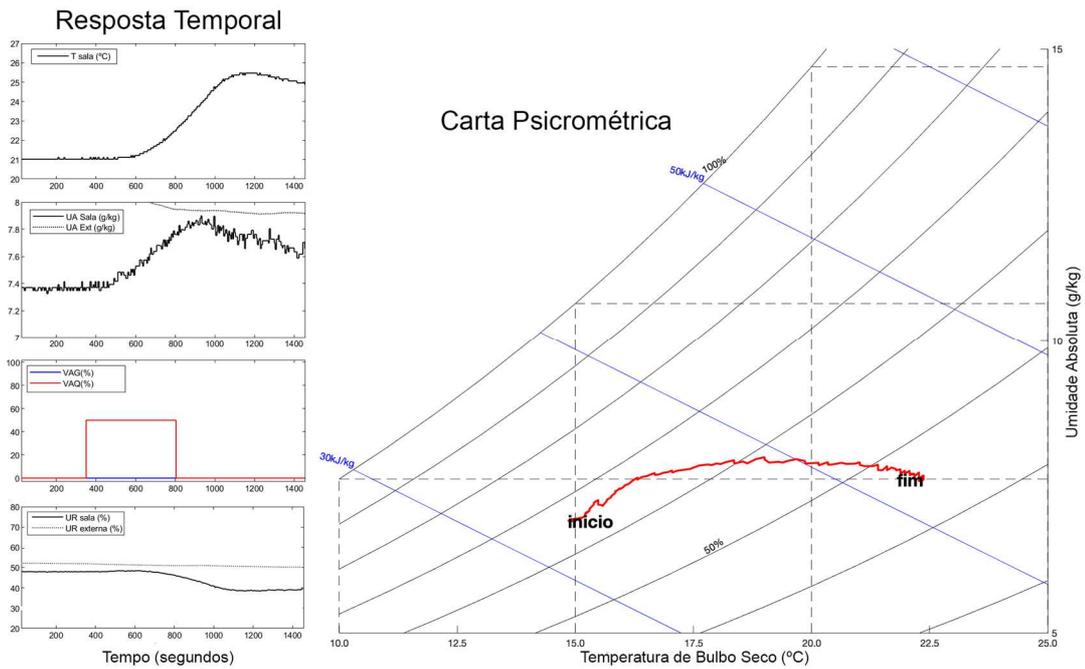
O processo psicrométrico de aquecimento apresentado na figura 6 a partir de dados experimentais mostra um pequeno incremento na umidade absoluta, por conta do aumento da quantidade de calor na massa de ar e conseqüente desprendimento da umidade adsorvida nas superfícies do interior da sala limpa. Além disso, outro fator que pode influenciar no distúrbio de umidade percebido é o ganho de calor latente por parte da água presente no sistema de drenagem da serpentina de água gelada, que por ventura não tenha sido completamente expurgada do sistema. Já o processo psicrométrico de resfriamento e desumidificação apresentado na figura 7 a partir de dados experimentais indicou uma taxa de desumidificação pouco expressiva por conta da abertura parcial da válvula de água gelada. Desse modo, a parcela de ar que entrou em contato com a superfície da serpentina, cuja temperatura estava abaixo da temperatura de saturação, perdeu calor latente promovendo a condensação do vapor d'água contido na massa de ar úmido.

Figura 5 – Simplificação dos processos psicrométricos no diagrama de Carrier



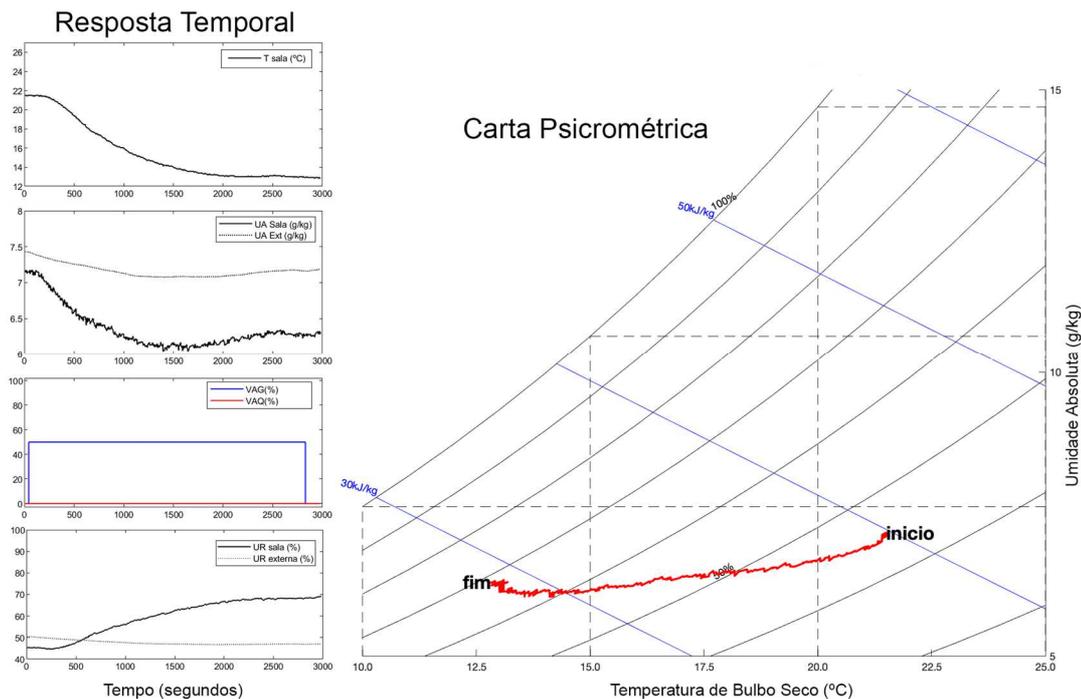
Fonte: Adaptado de Strobel (2015)

Figura 6 – Processo psicrométrico de aquecimento considerando dados experimentais do itt-Chip Unisinos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 7 – Processo psicrométrico de resfriamento e condensação considerando dados experimentais do itt-Chip Unisinos



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3 FUNDAMENTOS DO CONTROLE PREDITIVO

Os primeiros controladores preditivos baseados em modelo ou *Model Predictive Control* – MPC - foram desenvolvidos na indústria seguindo uma necessidade de resolução de problemas mais complexos, não atingida através de estratégias PID. Entretanto, somente na década de 1970 surgiram as primeiras publicações, por Richalet *et al.* (1978) primeiramente denominado *Model Predictive Heuristic Control* e mais tarde, por Cutler e Ramaker (1980) quando foi dada origem ao termo *Dynamic Matrix Control* quando, a partir de então, adquiriram popularidade, especialmente na indústria química. Segundo Maciejowski (2002), Campos; Gomes e Perez (2013), e Camacho e Bordons (1999), os principais motivos para o aumento da popularidade do controle preditivo na indústria são:

- Permite que se leve o sistema para um ponto de operação desejado de uma forma mais segura e rentável;
- É capaz de resolver problemas de natureza multivariável mais facilmente;
- O sinal de controle é obtido a partir de um algoritmo de otimização que considera as restrições nas variáveis;

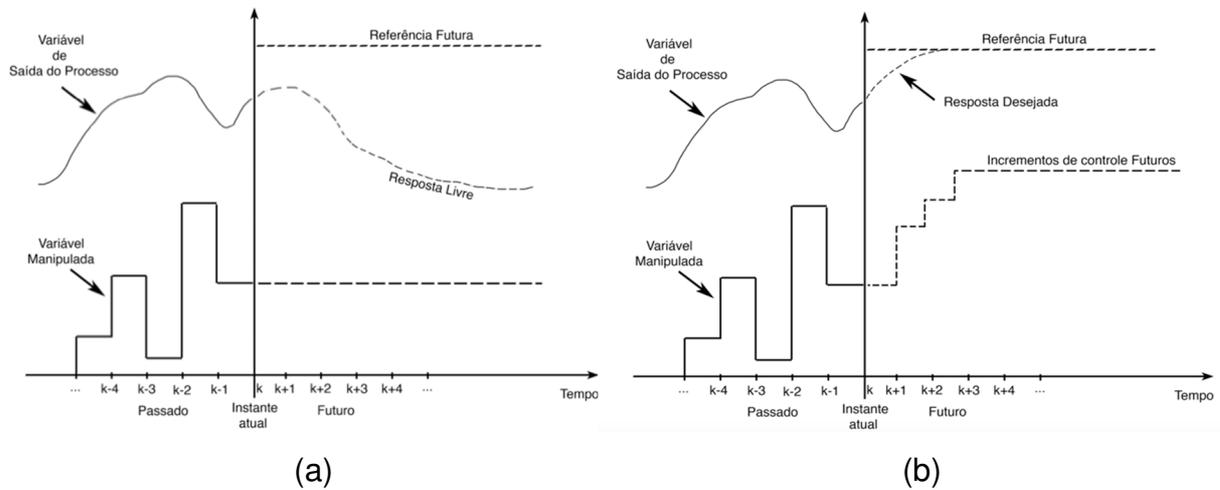
- O sistema de controle preditivo lida bem com a rejeição de distúrbios não medíveis;

2.3.1 O conceito de horizonte deslizante no algoritmo MPC

O algoritmo de controle MPC é um processo recursivo onde um sinal de controle é calculado para atingir-se uma referência desejada, dentro de um horizonte futuro. Na figura 8(a) e 8(b) é apresentada a resposta temporal de uma variável de processo em virtude da aplicação de um sinal de controle, ou seja, analisando-se inicialmente um caso SISO. Na figura 8(a) é representado o comportamento do processo na circunstância em que, a partir do instante k , nenhum incremento de controle é aplicado (resposta livre). Porém, a partir do instante $k+1$ é visível que a variável de saída do processo não segue a referência futura, uma vez que o erro aumenta ao longo do horizonte. A tarefa do algoritmo preditivo, de maneira conceitual, é determinar os sinais de controle futuros que produzem a resposta forçada que leve a variável de processo para a referência futura. Na figura 8(b), é representado o vetor de incrementos de controle obtido a partir dos sinais avaliados no instante k , que idealmente deverá produzir uma resposta forçada que leve a saída do processo para a resposta desejada.

Desta forma, no instante $k+1$ será aplicado ao processo o incremento de controle referente a primeira posição do vetor, e então no instante seguinte o algoritmo estará pronto para obter um novo vetor de incrementos a partir dos sinais resultantes da aplicação deste incremento. A cada instante de amostragem o algoritmo de controle receberá novos valores medidos das variáveis de processo, e irá obter um novo valor de variáveis manipuladas capazes de produzir a resposta desejada. (CAMACHO; BORDONS, 1999; MACIEJOWSKI, 2002)

Figura 8 – Resposta Livre vs Resposta desejada do processo



Fonte: Elaborada pelo autor

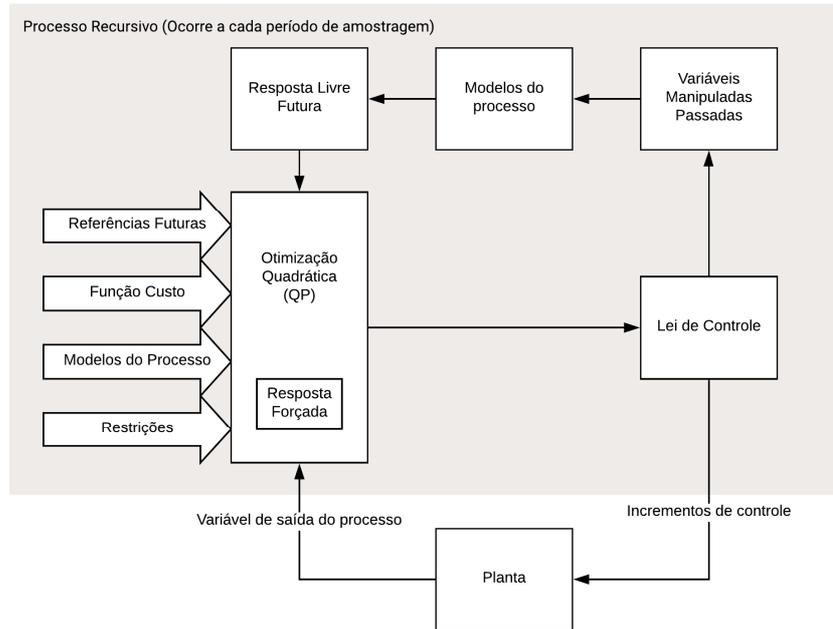
2.3.2 Descrição da estrutura de um MPC

A representação simplificada do algoritmo de controle MPC pode ser vista na figura 9. O elemento central do algoritmo é o bloco otimizador, onde ocorre a etapa de minimização de uma função custo restrita, e assim obtém-se a resposta forçada que satisfaz o seguimento de referência dentro de um horizonte futuro pré-definido. O otimizador, portanto, necessita levar em consideração a resposta livre do sistema sob as variáveis manipuladas passadas, o que faz do Modelo do Processo o elemento com maior importância para uma boa previsão, e conseqüentemente, uma boa resposta em malha fechada. (BAO-CANG, 2009; CAMACHO; BORDONS, 1999; MACIEJOWSKI, 2002).

2.3.3 Modelo e estratégia de previsão - caso GPC

O algoritmo de controle preditivo do tipo GPC (*Generalized Predictive Control*) foi desenvolvido por Clarke *et al.* (1987) e utiliza funções de transferência discretas no processo de previsão. O modelo do tipo CARIMA (*Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average*) MIMO é apresentado na equação (5). No caso MIMO, ou seja, um sistema com n saídas por m entradas, $A(z^{-1})$ e $C(z^{-1})$ são matrizes polinomiais $n \times n$ e $B(z^{-1})$ será uma matriz polinomial $n \times m$.

Figura 9 – Representação simplificada do algoritmo de controle MPC



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})\Delta u(t-1) + \frac{1}{\Delta}C(z^{-1})e(t) \quad (5)$$

Sendo:

$$A(z^{-1}) = I_{n \times n} + A_1 z^{-1} + A_2 z^{-2} + \dots + A_{na} z^{-na},$$

$$B(z^{-1}) = B_0 + B_1 z^{-1} + B_2 z^{-2} + \dots + B_{nb} z^{-nb}$$

$$C(z^{-1}) = I_{n \times n} + C_1 z^{-1} + C_2 z^{-2} + \dots + C_{nc} z^{-nc}$$

$$\Delta = 1 - z^{-1}$$

$y(t)$: vetor de saídas de dimensão $n \times 1$;

$u(t)$: vetor de entradas de dimensão $m \times 1$;

$e(t)$: vetor de ruídos de dimensão $n \times 1$;

Segundo Camacho e Bordons (1999), considerando-se que $e(t)$ representa um ruído gaussiano (média zero e variância unitária), e que $C(z^{-1}) = I_{n \times n}$ para simplificação do problema, é necessário obter-se as saídas preditas de $y(t+1)$ a $y(t+j)$, sendo j o valor do horizonte de predição. Utiliza-se para isso, a equação diofantina em (6), obtendo-se o modelo de predição em (7). A obtenção dos polinômios E_j e F_j através da identidade da equação Diofantina está relacionada a separação entre resposta livre e forçada, conforme apresentado em (7):

$$I_{n \times n} = E_j(z^{-1})\Delta A + z^{-j}F_j(z^{-1}) \quad (6)$$

$$\hat{y}(t + j + d_n|t) = F_j(z^{-1})y(t) + E_j(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t + j - 1|t) \quad (7)$$

2.3.4 Problema de otimização do controle preditivo

Na equação (7) fica evidente a distinção entre resposta livre e forçada na predição ao longo de um horizonte k . A resposta livre, portanto, é recalculada a cada instante de amostragem com base nos sinais passados, enquanto a resposta forçada depende dos incrementos de controle futuros para ser definida. Um processo de otimização quadrática permite a obtenção dos incrementos de controle, $\Delta u(t + j|t)$, que minimizam a função custo sujeita a restrições, apresentada nas equações (8) e (9). Basicamente a função custo típica para o controle preditivo requer ponderações sobre o erro de seguimento de referências futuras, e esforço de controle futuros, mas também pode ser elaborada considerando outros elementos conforme as especificações do projeto ou considerações sobre o custo de operação do processo.

$$\min J(u_k) = \min [J_y(u_k) + J_u(u_k) + J_{\Delta u}(u_k) + J_\varepsilon(u_k)] \quad (8)$$

$$s. a.: \quad A x \leq B \quad (9)$$

Sendo:

$J(u_k)$: Função objetivo do controle preditivo;

u_k : valores para as variáveis manipuladas futuras, ou seja,

$$u_k^T = [u(k|k)^T \ u(k+1|k)^T \ \dots \ u(k+C|k)^T \ \varepsilon_k]$$

x : Vetor coluna que faz relação às variáveis de saída do processo e variáveis manipuladas;

A, B : Matrizes contendo as restrições correspondentes aos valores limites a serem assumidos pelas variáveis;

J_y : Função relacionada ao seguimento de referência da saída do processo³:

$$J_y(u_k) = \sum_{n=1}^{n_y} \sum_{k=P1_n}^{P2_n} \{w_{n,k}^y [\hat{y}_n(t+k|t) - W_n(t+k|t)]\}^2 \quad (10)$$

J_u : Função relacionada ao seguimento de referência das variáveis manipuladas;

$$J_u(u_k) = \sum_{m=1}^{n_u} \sum_{k=0}^C \{w_{m,k}^u [u_m(t+k|t) - u_{m,target}(t+k|t)]\}^2 \quad (11)$$

$J_{\Delta u}$: Função relacionada à supressão de movimento das variáveis manipuladas;

$$J_{\Delta u}(u_k) = \sum_{m=1}^{n_u} \sum_{k=0}^C \{w_{m,k}^{\Delta u} [u_m(t+k|t) - u_m(t+k-1|t)]\}^2 \quad (12)$$

J_ε : Função relacionada a violação das restrições:

$$J_\varepsilon(u_k) = \rho_\varepsilon \varepsilon_k^2 \quad (13)$$

Sendo:

$\hat{y}_n(t+k|t)$: Predição da variável de processo n , no instante k do horizonte de predição;

$W_n(t+k|t)$: Referências para saída n , referente a amostra k do horizonte de predição;

$u_m(t+k|t)$: Variável manipulada m , referente a amostra k do horizonte de predição;

$u_{m,target}(t+k|t)$: Referências (*targets*) para a variável manipulada m , referente a amostra k do horizonte de predição;

$w_{n,k}^y$: Peso para o seguimento de referência para a saída de processo n , referente ao instante k do horizonte de predição;

$w_{m,k}^u$: Peso para o seguimento de referência para a variável manipulada m , referente ao instante k do horizonte de predição;

$w_{m,k}^{\Delta u}$: Peso para a supressão de movimento para a variável manipulada m , referente ao instante k do horizonte de predição;

³ A função custo relacionada a seguimento de referência é representada como uma função de u_k uma vez que as predições são transcritas em função das variáveis manipuladas, conforme apresentado na equação (7).

$P1_n$: Horizonte de predição inicial da variável de processo n ;

$P2_n$: Horizonte de predição final da variável de processo n ;

C : Horizonte de controle;

n_u : Número de variáveis manipuladas;

n_y : Número de variáveis de saída do processo;

ρ_ε : Peso para penalidade de violação de restrição;

ε_k : Variável de relaxamento da restrição no instante k ;

A etapa de otimização possibilita a aplicação de restrições para as variáveis de processo e para as variáveis manipuladas. Cada uma das parcelas J_y , J_u e $J_{\Delta u}$ são sujeitas a restrições de valores para as variáveis, e por isso o espaço de soluções é reduzido a uma região que atende as especificações de projeto.

2.4 SÍNTESE DO CONTROLE PREDITIVO GPC

A elaboração do controle preditivo em nível de projeto requer o atendimento das etapas descritas a seguir, conforme revisão dos trabalhos de Camacho e Bordons (1999), Maciejowski (2002), Santos (2016), Liptak (2005) e também com base na experiência adquirida no desenvolvimento desse trabalho em nível experimental, descrito mais detalhadamente nas seções 4 e 5.

Segundo Campos, Gomes e Perez (2013) e Haugen (2004), o sistema de controle preditivo geralmente é concebido em um nível mais elevado da arquitetura de controle, a partir do qual deve-se obter os valores ótimos de setpoint para os controladores PID implementados na camada inferior de aplicação. Essa arquitetura permite que o processo continue operando com a camada de controle local, em caso de falha ou manutenção da camada de controle avançado, o que garante um nível adicional de segurança.

Conforme apresentado por Liptak (2005), a síntese do controle MPC deve seguir as seguintes etapas:

2.4.1 Análise do Processo e configuração do MPC

Segundo Campos, Gomes e Perez (2013) é necessário proceder uma etapa de seleção das variáveis que são importantes ao processo, de modo que se tenha graus de liberdade suficientes para controlar a planta, levando-se em consideração as suas

restrições. A análise do processo deverá contemplar a escolha das variáveis do processo, além do levantamento de todas as informações relevantes ao controle preditivo. Ao final da etapa de análise do processo é esperada a obtenção de uma lista contendo os seguintes dados, de maneira a sintetizar a configuração do controlador preditivo:

- Todas as variáveis manipuladas relacionadas ao processo;
- Todas as variáveis controladas;
- Os limites inferiores e superiores de operação de todas as variáveis;
- O ponto de operação do processo, e as mudanças de *setpoint* esperadas;
- As variáveis que poderão operar por faixas, e as variáveis com *setpoint* fixo;
- Os valores para as variáveis manipuladas com os quais se busca melhor economia do processo (*targets*);
- Os objetivos de controle do processo;

Ao final desta etapa deverá ficar evidente quais elementos deverão estar presentes na função custo. Por exemplo, considerando-se determinado processo de controle em que não há preocupação com o esforço de controle, retira-se a função J_u escolhendo-se peso zero para esta parcela da função custo, e elegendo valores somente para os pesos das demais parcelas J_y e $J_{\Delta u}$ da função custo, relacionadas a seguimento de referência e incrementos de controle.

Segundo Campos, Gomes e Perez (2013) após a seleção das variáveis é recomendado proceder com a avaliação da influência esperada de cada variável controlada, devido a um movimento da variável manipulada ou distúrbio. Os sinais (+ ou -) representam tanto o grau de influência (++ ou -- para influências mais fortes) quanto o sinal do ganho estático esperado.

2.4.2 Desenvolvimento do modelo do processo e geração do MPC

Após uma análise do processo de maneira detalhada, a etapa de desenvolvimento do controlador passa pela modelagem da planta. Para o caso GPC MIMO, o modelo da planta será descrito como uma matriz de funções de transferência, conforme o modelo $G(z^{-1})$ apresentado na equação (14):

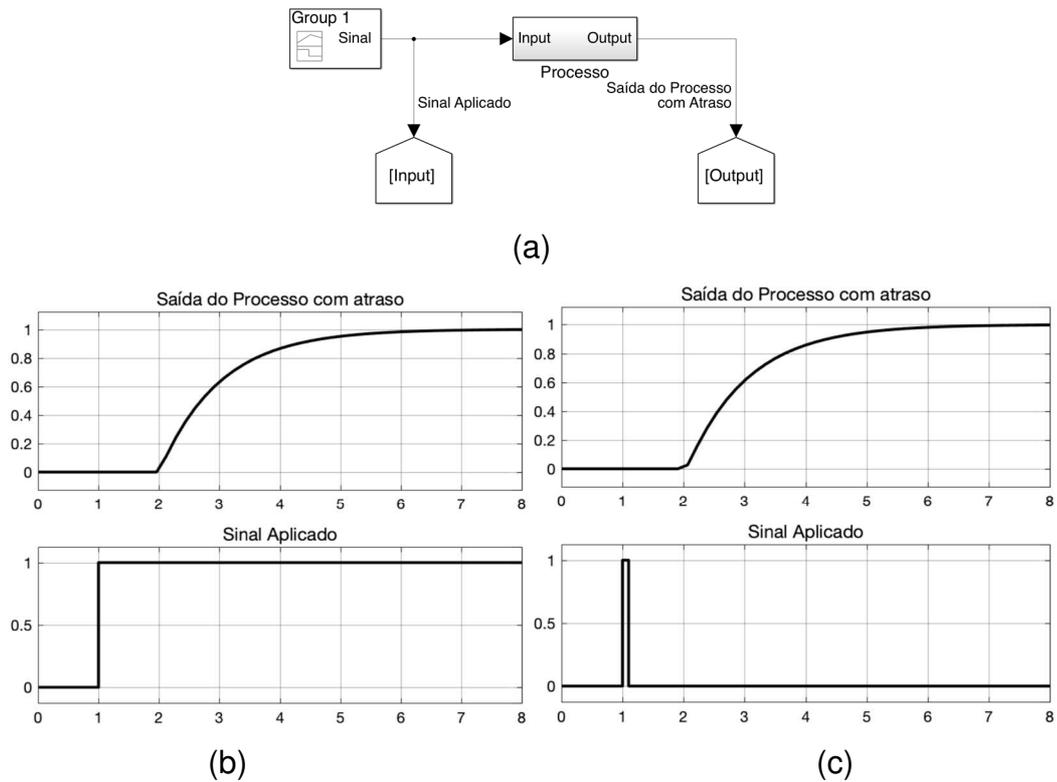
$$G(z^{-1}) = \begin{bmatrix} \frac{B_{11}(z^{-1})}{A_{11}(z^{-1})} & \frac{B_{12}(z^{-1})}{A_{12}(z^{-1})} & \dots & \frac{B_{1n}(z^{-1})}{A_{1n}(z^{-1})} \\ \frac{B_{21}(z^{-1})}{A_{21}(z^{-1})} & \frac{B_{22}(z^{-1})}{A_{22}(z^{-1})} & \dots & \frac{B_{2n}(z^{-1})}{A_{2n}(z^{-1})} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{B_{m1}(z^{-1})}{A_{m1}(z^{-1})} & \frac{B_{m2}(z^{-1})}{A_{m2}(z^{-1})} & \dots & \frac{B_{mn}(z^{-1})}{A_{mn}(z^{-1})} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Para obtenção de cada função de transferência contida na equação (14), é necessária uma etapa de testes em malha aberta⁴, de modo a obter a melhor representação possível do sistema. Segundo Normey-Rico e Camacho (2007) o teste mais comum aplicado na indústria é o teste de resposta ao degrau, ao qual compreende uma boa representação de sistemas FOPDT (*First Order Plus Dead Time*) e SOPDT (*Second Order Plus Dead Time*), porém uma aproximação à resposta ao impulso pode ser aplicada para sistemas com características integradoras. Na figura 10(a) abaixo, é apresentada a estrutura da aplicação do sinal de teste em malha aberta. Na figura 10(b) é apresentada a resposta esperada para um sistema FOPDT enquanto na figura 10(c) é apresentada a resposta de um sistema SOPDT com um polo na origem.

Na tabela 3 são apresentadas funções de transferência para os ensaios teóricos apresentados na figura 10, considerando-se um tempo de amostragem de 1 segundo. Os modelos SISO que relacionam cada par entrada-saída do modelo MIMO podem ser obtidos via caracterização manual das curvas e validados via software, como por exemplo, utilizando o *toolbox System Identification* contido no MATLAB®.

⁴ O teste em malha aberta é citado preferencialmente uma vez que se torna mais evidente o comportamento da planta e a ordem do modelo, apesar de haver a possibilidade de testar-se o sistema em malha fechada, segundo Åström e Hågglund (2006).

Figura 10 – Representação de resultados esperados nos ensaios de resposta



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Exemplos de funções de transferência para os testes em malha aberta

	Domínio Contínuo	Domínio Discreto
Processo figura 10(b)	$G_1(s) = \frac{1}{s + 1}$	$G_1(z^{-1}) = \frac{0.631z^{-1}}{1 - 1.368z^{-1}}$
Processo figura 10(c)	$G_2(s) = \frac{10}{s(s + 1)}$	$G_2(z^{-1}) = \frac{0.3679z^{-1} + 0.2642z^{-2}}{1 - 1.368z^{-1} + 0.3679z^{-2}}$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a obtenção de todas as funções de transferência relacionando todas as entradas e saídas do processo, também é necessário obter-se as funções de transferência de todos os distúrbios medidos. Ao final desta etapa, espera-se obter o modelo completo da planta, conforme a tabela 4, podendo ser definido no domínio de tempo contínuo ou discreto.

Tabela 4 – Exemplo de Modelo MIMO completo após os ensaios de resposta

	Variáveis Manipuladas				Distúrbios Medidos	
	VAG	VAQ	Fan	Damper	Distúrbio1	Distúrbio2
Temperatura	$G_1(S)$	$G_3(S)$	0	0	$G_3(S)$	0
Umidade	$G_2(S)$	0	0	0	0	$G_3(S)$
Pressão	0	0	$G_3(S)$	$G_3(S)$	0	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

A geração do controlador MPC via MATLAB® ocorre via linha de comando através da função *mpc* ou através da ferramenta *MPC Designer*, digitando *mpcDesigner* na linha de comando. Em ambos os métodos, todas as informações obtidas são necessárias para executar a primeira simulação e realizar os primeiros ajustes de sintonia.

2.4.3 Parâmetros de sintonia para o controle MPC

Conforme apresentado na seção 2.3.4, o problema de otimização requer parâmetros de sintonia que refletem diretamente na performance do sistema em malha fechada. Os trabalhos de Trierweiler e Farina (2003) e Campos, Gomes e Perez (2013) sugerem valores de sintonia de modo a haver um equilíbrio entre performance e estabilidade. Conforme a revisão bibliográfica de Santos (2016), os valores adequados para sintonia de controladores GPC são apresentados abaixo.

Para que o processo de obtenção dos parâmetros de sintonia seja adequado, recomenda-se a normalização das variáveis, de modo que seus valores estejam representados dentro de uma escala entre 0 e 1, ou seja, entre os valores mínimos e máximos admitidos para as variáveis. Para isso, utilizam-se os parâmetros s_n^y para cada variável de processo n e os parâmetros s_m^u para cada variável manipulada m .

- Horizonte de Predição ($N1$ e $N2$):

Os parâmetros $N1$ e $N2$ correspondem aos valores do intervalo de tempo futuro relacionado com o horizonte de predição, no qual se deseja o seguimento de referência em malha fechada. O intervalo de tempo entre o instante atual (k) e o valor $N1$ futuro será desconsiderado na função custo, podendo levar a planta para um ponto de operação indesejado caso o valor escolhido seja muito elevado, pois os instantes iniciais de resposta da planta são desconsiderados das predições. O valor de $N1$,

portanto, deve ser escolhido no caso de haver atraso de transporte no processo desejando-se obter um melhor desempenho computacional. Segundo Trierweiler e Farina (2003), valor de $N2$ deverá ser igual ou levemente inferior ao tempo de assentamento do processo em malha aberta, para que toda a dinâmica da planta possa ser predita dentro do horizonte de predição escolhido.

- Horizonte de Controle (C):

O horizonte de controle (C) é a quantidade de intervalos de amostragem no qual são considerados os incrementos de controle na predição da planta. Após esse período de tempo, os incrementos de controle são considerados nulos para o processo de otimização, ou seja, os valores das variáveis manipuladas futuras se mantêm constantes após esse instante de tempo da janela de predição. Portanto, é natural que seja escolhido um valor $C < N2$, porém não muito próximo de $N2$, pois além de gerar um peso computacional elevado devido ao tamanho das matrizes, no caso de processos com fase não mínima, o sistema em malha fechada poderá adquirir instabilidade. Segundo Trierweiler e Farina (2003), o valor adequado de C deverá ser em torno de 25% do valor do horizonte de predição, mantendo desta forma um compromisso entre estabilidade e performance.

- Peso para o seguimento de referência para a saída de processo (w^y):

Os pesos para o seguimento de referência são valores que são interpretados pela etapa de otimização como o grau de importância das saídas do processo. Através do aumento dos valores escolhidos para w^y para determinada saída n , haverá maior esforço de controle direcionado para essa saída, enquanto a diminuição desse valor permite uma maior liberdade de direcionamento de energia das variáveis manipuladas para seguimento de referência de outras saídas. Dessa forma, pode-se eleger a importância das variáveis de saída do processo através da escolha dos valores contidos na matriz w^y .

- Peso para a supressão de movimento das variáveis manipuladas ($w^{\Delta u}$):

Os valores escolhidos para os pesos de supressão de movimento estão diretamente relacionados a velocidade de reação do sistema em malha fechada, portanto interferem no consumo de energia do processo. Pesos mais elevados penalizam os incrementos de controle tornando o sistema mais lento, enquanto a diminuição dos valores de $w^{\Delta u}$ permitem a utilização de maior energia as variáveis manipuladas para levar o sistema às condições de seguimento de referência.

- Peso para seguimento de referência das variáveis manipuladas (w^u):

Em determinados processos, pode haver a necessidade de determinada variável manipulada seguir um valor desejado, que está relacionado normalmente com objetivos de consumo da planta, ou características do processo. Nesse caso, são escolhidos pesos para w^u de modo que os valores mais elevados da matriz correspondem a maior importância da variável manipulada relacionada. Deste modo a etapa de otimização deverá obter uma solução que permita o sistema cumprir os objetivos de controle com o menor desvio possível da referência escolhida para as variáveis manipuladas.

- Peso para penalidade de violação de restrição (ρ_ε)

Conforme apresentado na seção 2.3.4, o problema de otimização tem como objetivo obter os valores para as variáveis manipuladas conforme apresentado na equação (15). Um dos elementos obtidos a partir da otimização quadrática é o termo ε_k , que atua como um relaxamento da restrição atribuída a determinada variável.

$$u_k^T = [u(k|k) \ u(k+1|k) \ \dots \ u(k+C|k)]^T \ \varepsilon_k \quad (15)$$

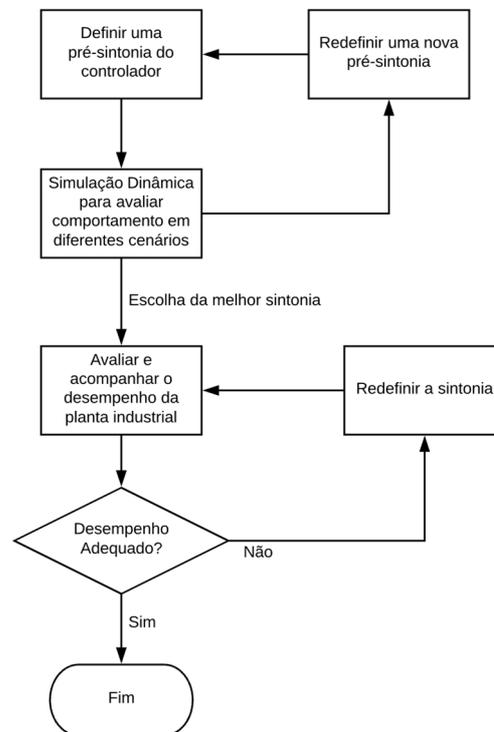
Por exemplo, no caso de haver uma restrição de variável de saída do processo n , a desigualdade relacionada a restrição desta variável é apresentada na equação (16):

$$y_{n,\min}(k) - \varepsilon_k \rho_{\varepsilon,\min} \leq y(t+k|k) \leq y_{n,\max}(k) + \varepsilon_k \rho_{\varepsilon,\max} \quad (16)$$

Considerando-se que os valores escolhidos para ρ_ε sejam zero, haverá pouca suavidade e portanto, não haverá solução factível para o problema de otimização no caso em que perturbações levem as variáveis para fora da faixa de operação. Do mesmo modo, considerando-se que os valores escolhidos para ρ_ε sejam elevados, haverá um nível de suavidade tal, que permitirá ao problema de otimização eleger valores de ε_k em u_k que permitam a minimização da função custo. Deste modo, a violação de uma restrição levará a resultados de ε_k elevados que penalizará a função custo e assim o problema de otimização será forçado a buscar uma nova combinação de u_k que leve as variáveis para dentro da faixa de operação. Naturalmente, buscase valores pequenos de ρ_ε para que as restrições sejam respeitadas e permita um bom resultado em performance.

Um procedimento para obtenção da sintonia (escolha dos pesos) do controlador MPC foi apresentado por Campos, Gomes e Perez (2013), baseado na avaliação do desempenho da planta em malha fechada, e é apresentado na figura (9).

Figura 11 – Procedimento de sintonia definido com base no desempenho da planta industrial



Fonte: Campos, Gomes e Perez (2013)

2.4.4 Ajuste do controlador MPC para faixas de operação

Segundo Santos (2016), existem sistemas de controle não quadrados que por sua natureza não possuem graus de liberdade suficientes para levar a planta ao setpoint desejado. Uma estratégia utilizada para liberar graus de liberdade do sistema de controle é ajustar determinadas variáveis controladas para seguirem uma faixa desejada ao invés de um valor de *setpoint*.

Segundo González e Odloak (2009) para se utilizar o ajuste de uma variável por faixas, deve-se ajustá-la com o adequado peso para seguimento de referência, e então no momento em que a variável estiver dentro da faixa desejada, deve-se alterar o peso da variável controlada para zero, liberando desta forma recursos dos atuadores para as demais variáveis controladas. A desvantagem da utilização dessa abordagem é a não linearidade relacionada a mudança do peso das variáveis quando ocorre a transição sobre o limite da faixa, porém em determinados sistemas o impacto dessa não linearidade pode não ser significativo no atendimento aos requisitos de controle.

Ao longo do capítulo 2 foram apresentados os seguintes tópicos:

- Conceitos relacionados aos fundamentos de salas limpas;
- Fundamentos de fenômenos de transporte: Abordagem dos temas mais importantes para estudo dos trocadores de calor tipo serpentina, e conceitos de psicrometria;
- Fundamentos do controle preditivo: Conceito de horizonte deslizante, estrutura do MPC, estratégia de predição para o caso GPC MIMO, abordagem do problema de otimização quadrática do algoritmo MPC;
- Síntese do controle preditivo: Análise do processo e configuração do MPC, desenvolvimento do modelo MIMO do processo, revisão dos parâmetros de sintonia do controlador MPC MIMO, e conceitos relacionados à estratégia de controle de variáveis por faixas de operação;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentadas a revisão bibliográfica referente as técnicas necessárias para resolução do problema proposto, como base da pesquisa científica.

3.1 MODELAGEM DOS SISTEMAS HVAC

Ao longo das últimas décadas, inúmeros trabalhos foram realizados para elaboração, simplificação, simulação e validação de modelos matemáticos que pudessem descrever o comportamento dinâmico dos sistemas HVAC. Dentre os principais interesses na comunidade científica destaca-se o desenvolvimento de estratégias avançadas de controle (tais como controle preditivo, que necessita um modelo de predição) para redução do nível de consumo energético tão representativo no cenário mundial. (KWADZOGAH; ZHOU; LI, 2013).

Nesta seção serão descritos os pontos relevantes dos métodos abordados em estudos recentes, que devem orientar a metodologia desta dissertação. Serão divididos em tópicos relacionados por características comuns, onde serão destacadas as suas diferenças e características que podem ser aproveitadas ao longo deste trabalho.

3.1.1 Desenvolvimento de modelos baseados em plataformas de simulação

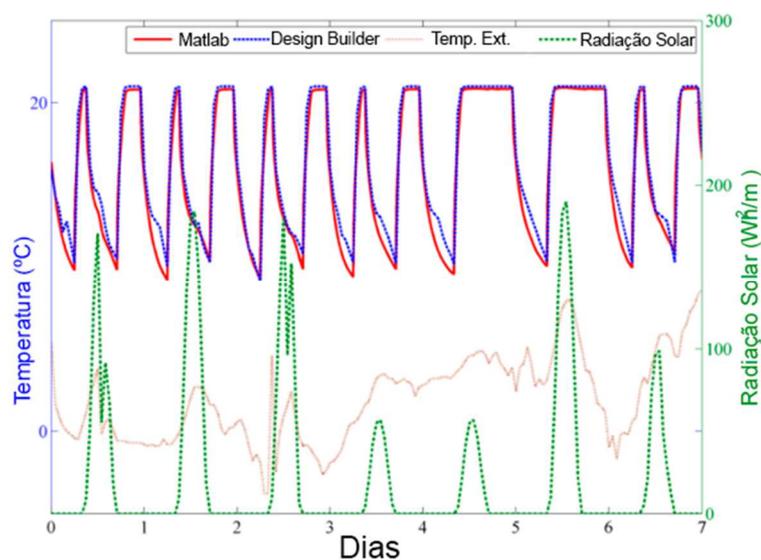
Com o advento da informática, especialmente a partir da década de 90, os métodos de modelagem fenomenológicos conhecidos passaram integrar as bibliotecas de software, onde tornou-se possível criar modelos complexos com facilidade, testando várias características dinâmicas do sistema. Dentre as plataformas mais utilizadas na simulação de sistemas HVAC destaca-se o Simulink® devido a sua popularidade e capacidade de integração com módulos dedicados ao projeto de controle e tratamento de dados. (AFRAM; JANABI-SHARIFI, 2015; BÉGUERY *et al.*, 2015; KARMACHARYA *et al.*, 2012; LAHRECH *et al.*, 2001; LI *et al.*, 2014; NOVAK; MENDES, 2004; NOVAK; MENDES; OLIVEIRA, 2005; WETTER, 2009).

Os métodos descritos nos trabalhos pesquisados muitas vezes levam em conta uma validação de uma modelagem fenomenológica realizada através da simulação

com bibliotecas de software, assim como Novak e Mendes (2004) realizaram ao descrever detalhadamente as equações diferenciais baseadas no balanço de energia e massa de um volume de controle. Para integrar a simulação do modelo fenomenológico foi utilizada a plataforma ASTECCA[®] como uma nova proposta de modelagem promissora, uma vez que é baseada em Simulink[®], tendo uma fácil integração a simulação de controle de processo. Apesar da grande contribuição, os autores não realizaram a validação do modelo utilizando um sistema físico real. Da mesma forma, o método descrito por Barbosa e Mendes (2003) apresenta a comparação entre as equações diferenciais apresentadas por Clarke (2001) e o software ESP, também sem contribuir na validação baseada em um sistema real.

Outras contribuições focadas em simulação podem ser encontradas, como o método de Karmacharya et al. (2012) que além de contribuir na elaboração de um modelo simplificado baseado na analogia térmico – elétrica para um ambiente com múltiplas zonas, comparou os resultados com dois softwares diferentes (Matlab e Design Builder), obtendo resultados muito próximos, conforme apresentado figura 12.

Figura 12 – Resultados obtidos na simulação entre Simulink[®] e IEA[®]



Fonte: Karmacharya et al. (2012).

Outros trabalhos focados em simulação de sistemas HVAC baseados na integração de dois softwares – um para simular o comportamento do volume de controle em função das condições ambientais, outro para simular os elementos do HVAC e os sistemas de controle – foram publicados, com destaque para o trabalho

de Béguery et al. (2015). Neste trabalho foi possível a simplificação de modelos complexos em Simulink® através de um algoritmo que identifica automaticamente as características prediais geradas por um software dedicado e cria os modelos de simulação na plataforma, tornando o processamento da simulação 100 vezes mais rápida do que os métodos conhecidos na época. Uma característica interessante deste método é a caracterização da temperatura como variável de controle apenas, desconsiderando-se a umidade e conseqüentemente as características de um sistema multivariável. (BARBOSA, 2006; LI *et al.*, 2014).

3.1.2 Trabalhos baseados em modelagem paramétrica

Uma outra linha de pesquisa começou a surgir nas últimas duas décadas, baseada em modelos lineares paramétricos (abordagem caixa-preta). Apesar de se tratar de um sistema não linear, os sistemas HVAC podem ser bem representados por modelos paramétricos lineares uma vez que operem próximos a um ponto de equilíbrio. Por outro lado, também é possível considerar as não linearidades do sistema no caso de utilizar-se de uma abordagem caixa-cinza, onde parte-se de uma abordagem fenomenológica que gera uma estrutura de equações e obtém-se os seus coeficientes por técnicas de aproximação, como mínimos quadrados recursivo. (ABDO-ALLAH; IQBAL; POPE, 2017; AFRAM; JANABI-SHARIFI, 2015; CASTELLANOS MOLINA; VEGA LARA; MONTEAGUDO YANES, 2014; HARIHARAN; RASMUSSEN, 2010; MUSTAFARAJ; CHEN; LOWRY, 2010; PLATT *et al.*, 2010; ROYER *et al.*, 2014; SARABI *et al.*, 2013; WU; SUN, 2012; ZAJIC *et al.*, 2010).

No trabalho de Mustafaraj et al. (2010) foram apresentadas alternativas para modelagem paramétrica utilizando-se estruturas diferentes e validando-as diante dos valores medidos de uma planta real. Para estimação dos parâmetros foi utilizado o método do erro de predição (*Prediction Error Method*) e aplicados alguns indicadores que são utilizados para medir a qualidade do modelo, tais como MSE (*Mean squared error*), MAE (*Mean Absolute Error*) e GOF (*Goodness of Fit*). O coeficiente de determinação, comumente conhecido por “R²” chegou a valores próximos a 0,9 nas predições de temperatura e umidade, utilizando-se a estrutura ARMAX, indicando um grande potencial para esse método.

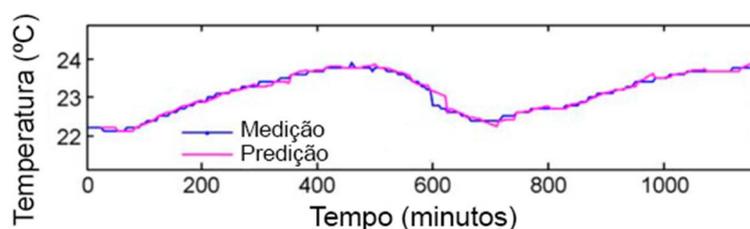
No mesmo ano, outros trabalhos podem ser citados com características semelhantes, como os trabalhos de Hariharan e Rasmussen (2010), Zajic et al. (2010), Platt et al. (2010).

Embora a contribuição de Hariharan e Rasmussen (2010) esteja mais voltada para a estimação de parâmetros do sistema HVAC como vazão mássica de ar no sistema e pressão no evaporador, também existe uma etapa onde o autor apresenta os resultados da estimação de parâmetros utilizando SIMPLEX e mínimos quadrados não linear, tendo uma aproximação visivelmente muito boa, apesar de não haver a apresentação de indicadores para avaliar a qualidade do modelo.

O trabalho de Zajic et al. (2011) utilizou uma abordagem semi-física caixa cinza baseada na obra de Ljung e Glad (1994) para obter o modelo para predição da temperatura de um ambiente. Foram utilizados um conjunto de dados coletados do sistema para realizar a aproximação com o modelo, obtendo uma aproximação de 89,8%. Uma etapa de validação utilizando-se o mesmo modelo para outro conjunto de dados foi aplicado, obtendo uma aproximação de 67,8%, o que indica que o modelo pode ter uma boa aproximação dependendo-se do ponto de operação do sistema.

Um método extremamente promissor na modelagem de sistemas HVAC é o método apresentado por Platt et al. (2010) onde se utilizou de técnicas meta-heurísticas para obtenção dos parâmetros do modelo (algoritmos genéticos), e filtro de Kalman para melhoria na predição, obtendo resultados extremamente promissores, conforme apresentado na figura 13:

Figura 13 – Parte dos resultados apresentados por Platt et al. (2010)



Fonte: Platt et al. (2010).

Outros autores desenvolveram métodos similares partindo-se de estruturas multivariáveis (espaço de estados) em virtude da crescente necessidade de técnicas de controle avançado como controle preditivo aplicadas a um sistema com grandezas acopladas (temperatura e umidade) como é o caso dos sistemas HVAC, porém

nenhum desses trabalhos apresenta uma validação consistente comparando-se a simulação do modelo paramétrico obtido com um sistema real. Desta forma, identifica-se nesse ponto um potencial para novos estudos nessa área. (ABDO-ALLAH; IQBAL; POPE, 2017; CASTELLANOS MOLINA; VEGA LARA; MONTEAGUDO YANES, 2014; ROYER *et al.*, 2014).

Um resumo dos principais trabalhos pesquisados, considerando suas vantagens e desvantagens, é apresentado ao final desta seção.

3.2 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PREDITIVO EM SISTEMAS HVAC

Ao longo das últimas décadas a comunidade científica passou a trabalhar na busca por alternativas para o aumento da eficiência dos sistemas de condicionamento de ar, frente ao relevante nível de consumo energético que tais sistemas representam na sociedade. É de conhecimento comum que alternativas tradicionais são tradicionalmente propostas para problemas com dinâmica dominante de primeira ordem, como controladores PI, porém percebeu-se que esta não é a melhor alternativa de controle para tais sistemas.

Levando-se em consideração que os sistemas de condicionamento de ar, independentemente do fim ao qual são destinados, possuem inúmeras variáveis e objetivos particulares, uma alternativa avançada passou a ser necessária. Foram comprovados com os estudos nas últimas duas décadas o grande potencial dos sistemas de controle preditivo baseados em modelo (MPC) na redução de consumo energético em sistemas complexos, uma vez que se baseiam na elaboração de um problema de otimização voltado para minimizar uma função objetivo particular.

Uma revisão dos estudos voltados a esse tema foi realizada por Kwadzogah et al. (2013) onde são levantados os aspectos relevantes da aplicação de MPC em sistemas HVAC, os quais serão apresentados nessa seção. Ainda que as revisões sejam de suma importância para o tema, deve-se salientar que nenhum dos trabalhos nelas relacionados considera a umidade relativa como variável controlada do sistema. Apesar disso, sabe-se que a versatilidade do algoritmo MPC permite a elaboração de uma função custo específica para cada problema. Outras publicações relevantes cujo objetivo foi apresentar uma revisão sobre o tema foram Mařík et al. (2011) e o trabalho de Serale *et al.* (2018), o qual apresenta uma síntese completa dos conceitos

relacionados a aplicação de controle preditivo em sistemas HVAC, sendo um excelente ponto de partida na pesquisa sobre o tema.

O trabalho de Parisio *et al.*, (2014) apresenta os desafios de se implementar um controle MPC em um sistema HVAC devido a suas não linearidades e os distúrbios geralmente encontrados em sistemas prediais, gerando um controlador preditivo para definir setpoint de controladores PI (proporcionais e derivativos) de baixo nível para controlar o nível de CO₂ e temperatura de uma sala. A mesma definição de hierarquia de controle foi proposta por Rawlings *et al.* (2018) porém nesta publicação é proposta a implementação de controle em grande escala de um conjunto de sete edificações, justificando essa decisão.

3.2.1 A modelagem inserida no algoritmo de controle preditivo

De acordo com inúmeros estudos, o sistema HVAC possui características não lineares que dificultam a resolução do problema de otimização em um mínimo global. Por esse motivo, a revisão dos estudos relacionados nos últimos anos afirma que modelos fenomenológicos muito próximos da dinâmica real do sistema produzirão uma função custo não convexa, trazendo uma grande carga computacional para resolução do problema, que deve avaliada em termos de viabilidade. Como alternativas propostas nestes estudos, está a utilização de modelagem paramétrica linear ou linearização do modelo off-line ou por *feedback linearization*. A importância de se buscar o mínimo global foi especialmente estudada por Kelman et al. (2011), onde é avaliado o impacto da otimização em um mínimo local no resultado final da implementação do controle preditivo.(KELMAN; BORRELLI, 2011; KELMAN; MA; BORRELLI, 2011; KWADZOGAH; ZHOU; LI, 2013; MAASOUMY; SANGIOVANNI-VINCENTELLI, 2012; OLDEWURTEL; JONES; MORARI, 2008; ŠIROKÝ *et al.*, 2011; YU, 2012; ZHOU; LI; SPANOS, 2015; ZUCKER; FERHATBEGOVIC; BRUCKNER, 2012)

Desta forma, conforme apresentado por Kelman et al. (2011), deve existir uma constante atenção sobre a resolução do problema de otimização, e um bom entendimento sobre o espaço de soluções desse problema. Nesse procedimento os autores utilizaram-se de uma ferramenta de otimização não linear com características locais (gradiente) chamado *Ipopt*, contribuindo para uma melhoria da busca partindo-se de uma estratégia de escolha das condições iniciais baseadas no modelo

fenomenológico, e dividindo o espaço de soluções em seções, inicialmente descartando os espaços de busca em regiões menores.

Por outro lado, os sistemas HVAC muitas vezes possuem influência de distúrbios medíveis com características estocásticas, como radiação solar, temperatura e umidade externas, e ocupação do prédio. Por esse motivo, outra linha de estudos cresce nos últimos anos, com a aplicação de modelos estocásticos no problema de otimização dos sistemas HVAC, onde são percebidos ganhos em termos de economia de energia, e na mesma medida uma maior carga computacional em virtude da maior quantidade de dados. (DOBBS; HENCEY, 2014; KWADZOGAH; ZHOU; LI, 2013; OLDEWURTEL; JONES; MORARI, 2008; YUDONG; MATUSKO; BORRELLI, 2015).

Finalmente, publicações com aplicações baseadas em simplificação do modelo fenomenológico pela analogia térmico-elétrica foram encontradas, como o trabalho de Široký et al. (2011). Além disso, uma comparação com um controlador por histerese (HC) foi elaborada com foco somente na temperatura interna, onde os ganhos foram relatados entre 15% e 28% dependendo de fatores climáticos.

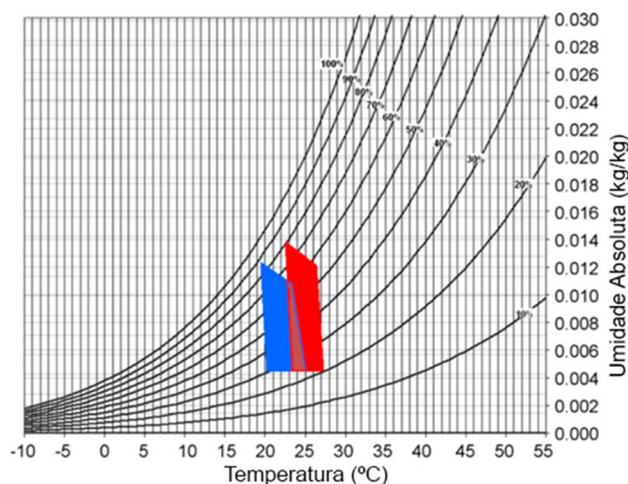
3.2.2 Estudos mais relevantes para o problema das salas limpas

Dentre os trabalhos que apresentaram soluções para problemas onde há necessidade de controle da umidade e temperatura de forma simultânea, pode se citar a publicação de Freire et al. (2008) onde os autores aplicam uma restrição de conforto térmico baseados em uma região da carta psicrométrica, conforme apresentado na figura 14. Como método alternativo, os testes dinâmicos foram submetidos a um indicador denominado PMV (*Predicted Mean Vote*), que é uma função de inúmeras variáveis, como temperatura, velocidade do ar, taxa metabólica, etc. A síntese do MPC elaborado contemplou como variáveis controladas a temperatura e umidade relativa do ambiente interno, e como distúrbios a temperatura, umidade relativa e radiação solar externa em uma estrutura multivariável, apresentando bons resultados, obtendo indicadores de conforto térmico próximos do ideal.

A dissertação de Pereira (2019) foi desenvolvida dentro do mesmo grupo de trabalho no Itt-Chip/UNISINOS e portanto teve inúmeras contribuições e influências ao longo deste trabalho. Apesar de ter uma diferente abordagem, as ideias

apresentadas pelo autor são fundamentais para a complementação do entendimento do problema e de soluções alternativas para o controle de salas limpas.

Figura 14 – Regiões de operação desejadas baseadas no diagrama psicrométrico.



Fonte: Freire et al. (2008).

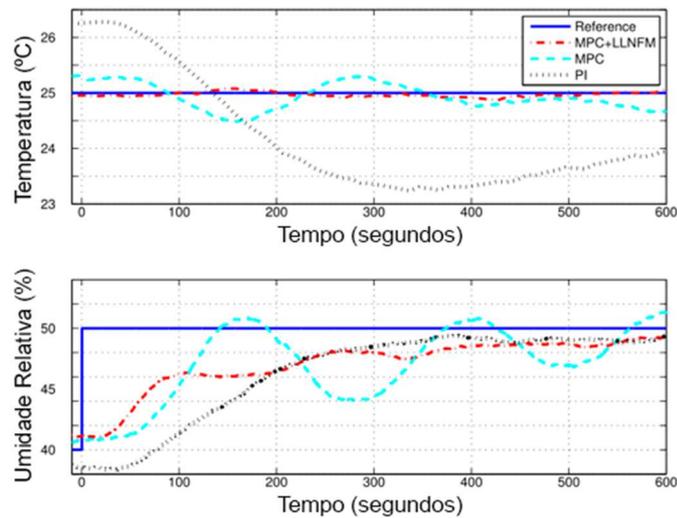
Outro estudo de suma importância para o segmento de controle para salas limpas, onde há a consideração da umidade relativa no problema de controle, é o estudo de Schwingshackl et al. (2013) no qual os autores elaboram uma estratégia de modelagem com algoritmo *LoLiMoT* (*Local Linear Model Tree*) que segmenta o modelo completo não linear em seções lineares, facilitando a resolução do problema de otimização. Além disso, a modelagem e resolução do problema por MPC considerando a umidade e temperatura obteve excelentes resultados no segmento de referência frente a um controlador PI, apesar de haver um comportamento transitório. Deve-se levar em consideração que a planta onde foram executados os experimentos dos autores possui uma capacidade grande de atuação, onde se possui uma boa mobilidade do ponto de operação sobre a carta psicrométrica. Na figura 15 é apresentado parte dos resultados no controle de umidade e temperatura pelo método de Schwingshackl et al. (2013).

3.2.3 Avaliação do consumo energético de sistemas de controle

No trabalho de Mohammad *et al.* (2019) foi apresentada uma comparação entre duas estratégias de controle, MPC e PID *Fuzzy*, e como avaliação do consumo

energético foi apresentada técnica de avaliação através do indicador ECI (*Energy Consumption Index*) conforme detalhamento na equação (17):

Figura 15 – Comportamento transitório para o método de Schwingshackl et al. (2013)



Fonte: Schwingshackl et al. (2013)

$$ECI = \sum_{t=0}^{\infty} \|e(t)\|^2 + \sum_{t=0}^{\infty} \|u(t)\|^2 \quad (17)$$

Sendo $e(t)$ o erro de seguimento de referência, e $u(t)$ o valor da variável manipulada, pode-se verificar o que o primeiro termo está diretamente relacionado com o seguimento de referência e rejeição de perturbações do processo em malha fechada, enquanto o segundo termo está relacionado com o esforço de controle, ou também pode-se dizer que tem relação direta com o consumo energético do processo.

A técnica apresentada por Mohammad *et al.* (2019) possui considerável facilidade de implementação, uma vez que utiliza os próprios sinais das malhas de controle na avaliação do consumo de energia, sem a necessidade da estimação de parâmetros relacionados aos modelos fenomenológicos da planta. Além disso, a técnica apresenta um grande potencial para realizar-se a comparação entre dois tipos de controladores, devido ao fato que ambos os sinais utilizados são obtidos a partir de ambas estratégias.

A mesma estratégia foi utilizada no trabalho de Minchala-Avila *et al.* (2016), a partir das ideias de Bakhtiar e Hara (2004) e Chen, Hara e Chen, (2002) nas quais os autores buscam a obtenção da lei de controle através de estratégias de otimização

restrita ao consumo energético do processo, utilizando ECI como um indicador de performance.

Portanto, é de grande potencial o uso da técnica de obtenção de um indicador de consumo energético como forma de *benchmark* (utilizando-se um controlador como referência) para o caso do itt-Chip da Unisinos.

3.2.4 Considerações finais sobre controle preditivo aplicado a sistemas HVAC

Para melhor sustentação das vantagens em termos de eficiência energética na aplicação dos métodos de controle preditivo foram desenvolvidos inúmeros trabalhos comparando-se a aplicação dessa estratégia avançada de controle frente a outras estratégias, como controle por histerese , por Starčić et al.,(2016); Controle On-Off, por Razmara et al. (2015); Controlador PID, por Maasoumy e Sangiovanni-Vincentelli (2012), tendo resultados melhores em termos de economia de energia na aplicação das estratégias de controle preditivo.

Uma vez consolidada a viabilidade da aplicação de controladores preditivos em sistemas HVAC, entende-se como natural prosseguir a pesquisa deste trabalho pelo caminho da elaboração de um algoritmo MPC multivariável voltado para o estudo de caso. Além disso, a revisão bibliográfica não localizou publicações referentes a apresentação da mudança do ponto de operação na carta psicrométrica, sendo essa estratégia uma contribuição na forma de apresentação dos resultados no contexto de ambientes climatizados.

Por outro lado, também comprovada a importância da obtenção de um bom modelo para o sistema, a partir da pesquisa realizada conclui-se que o problema proposto requer uma modelagem paramétrica linear ao redor de um ponto de operação, podendo ser caixa cinza, uma vez que se conhece o sistema *a priori*, ou até mesmo caixa-preta. Além disso, conclui-se ainda que as variáveis estocásticas envolvidas nesse problema em forma de distúrbios podem entrar no algoritmo de controle tendo em vista os resultados promissores nesse segmento de pesquisa.

A seguir são apresentadas um resumo das referências bibliográficas relacionadas à aplicação de controles preditivos em sistemas HVAC e à modelagem destes sistemas.

Autor	Características	Vantagens	Desvantagens
Vašak e Starčić (2014)	Simulação da síntese MPC aplicada a HVAC com utilização da otimização via Matlab	Elaboração do problema de otimização em função da potência do sistema	Não há detalhamento do algoritmo MPC utilizado; não há consideração sobre umidade
Starčić et al. (2016)	Avaliação da aplicação de MPC em comparação com HC (controle por histerese)	Redução dos picos de energia, redução do consumo médio global em comparação com HC	Sem detalhamento do algoritmo MPC, não realizada comparação com outros métodos
Razmara et al. (2015)	Comparação da aplicação de MPC (XMPC e EMPC) com controle On-Off	Comprovação de ganhos de energia com o método, avaliação baseada em estudo de caso;	Estudo considera apenas a variável de temperatura, somente com aquecimento
Yudong et al. (2015)	Melhorias em controle preditivo com base em dados estocásticos ambientais	Melhorias na previsão de grandes e complexos ambientes	Não foi percebida desvantagens no método do autor
Dobbs e Hency (2014)	Simulação do controlador MPC baseada em modelo estocástico de ocupação predial	Grande vantagem na aplicação de previsão de ocupação em prédios de grande porte	Trabalho é realizado em nível de simulação, sem a validação em nível de aplicação
Maasoumy e Sangiovanni-Vincentelli (2012)	Comparação entre estratégias de controle On-Off e PID com algoritmo MPC	Aplicação prática, validação do modelo, bons resultados demonstrados	Função custo não leva em consideração a umidade do ambiente
Kelman e Borrelli (2011)	Aplicação de MPC em um sistema HVAC baseado em um modelo bilinear	Modelo simplificado serve de base para modelos mais completos	Função custo não leva em consideração a umidade do ambiente
Široký et al. (2011)	Aplicação de MPC com base em modelo de analogia térmico-elétrico	Validação realizada em nível de aplicação, desenvolvimento em espaço de estados	Não há consideração da umidade no problema de controle
Žáčková e Privara (2012)	Avaliação do impacto de diferentes modelos na aplicação de um MPC	Desenvolvimento em espaço de estados, consideração dos distúrbios na previsão	Não há consideração da umidade no problema de controle
Kelman et al. (2011)	Avaliação da obtenção do ótimo local na otimização do algoritmo MPC	Contribuição na metodologia de otimização adequada a problemas similares	Não há consideração da umidade no problema de controle
Rehrl e Horn (2011)	Aplicação de Feedback linearization no problema não linear MPC	Bons resultados na linearização por feedback, usando-se modelo fenomenológico simplificado	Não há consideração da umidade no problema de controle
Oldewurtel et al. (2008)	Elaboração de modelo estocástico para implementação de MPC baseado em premissas de conforto térmico	Bons resultados na aplicação de modelos estocásticos no problema MPC	Não há consideração da umidade no problema de controle
Freire et al. (2008)	Desenvolvimento de HVAC MIMO com foco em set point de conforto térmico e melhoria de eficiência	Modelagem MIMO, restrições baseadas na carta psicrométrica, consideração da temperatura e umidade	Desenvolvimento em nível de simulação
Salsbury e Mhaskar (2013)	Desenvolvimento MPC multivariável comparado a controle PI	Contribuição na apresentação de comprovações a respeito de ganhos em termos de economia do MPC sobre PI tradicional;	Desenvolvimento em nível de simulação, não considera a umidade como variável de controle
Schwingshackl et al. (2013)	Aplicação de controle MPC com modelo linear local no controle da umidade e temperatura	Modelo multivariável linearizado reduz carga computacional, problema resolve o controle de umidade e temperatura	Não foi percebida desvantagens relevantes no método do autor

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 – Resumo das referências bibliográficas para modelagem de sistemas HVAC

Autor	Características	Vantagens	Desvantagens
Lahrech et al. (2001)	Comparação entre modelo computacional (Simulink) e sistema real em malha aberta e malha fechada	Baixa complexidade matemática, facilidade de validação, facilidade na etapa de projeto do controlador	Alta dependência de bibliotecas de software na representação do sistema real, custo para utilização do software;
Barbosa e Mendes (2003)	Simulações baseadas no modelo matemático presente em Clarke (2001)	Detalhamento das equações diferenciais, base para criação de modelos específicos para determinado sistema;	Complexidade matemática e computacional, necessidade de validação comparando-se a um sistema real
Novak e Mendes (2004)	Modelagem fenomenológica, validação via software	Detalhamento das equações diferenciais e processo de simulação via Simulink/ASTECCA, boa integração com outras plataformas;	Não utiliza um sistema real na validação da modelagem
Mustafaraj et al. (2010)	Modelagem a partir da obtenção de parâmetros de estruturas de modelos lineares paramétricos	A validação é realizada utilizando-se um sistema físico real; comparação de resultados entre diversas estruturas de modelo, e diferentes cenários;	Necessidade de testes em diferentes estruturas em virtude da obtenção da melhor aproximação possível;
Zajic et al. (2010)	Estimação do modelo matemático por uma abordagem <i>grey-box</i> a partir de dados experimentais	A abordagem permitiu que não linearidades do sistema estejam presentes no modelo; fácil aplicação uma vez reconhecida a estrutura correta;	Necessita validação em outros períodos do ano, considerando-se diferentes dados experimentais
Platt et al. (2010)	Abordagem fenomenológica com suporte de algoritmos genéticos para aproximação dos parâmetros de forma recursiva	Excelente aproximação dos resultados estimados com os resultados reais; Aplicação de Kalman filter para melhoria da saída estimada	Alta carga de processamento do algoritmo genético em cada ciclo de amostragem
Karmacharya et al. (2012)	Modelagem e simulação via Simulink da dinâmica térmica de um sistema HVAC	Simplificação do modelo térmico pela analogia de um circuito elétrico; Utilização de diferentes plataformas de simulação para o mesmo modelo	A validação ocorreu com a comparação entre outro software, sem considerar a dinâmica real; Não considera dinâmica de umidade;
Wu e Sun (2012)	Modelagem paramétrica linear de um sistema HVAC com estrutura ARMAX	Estratégia obteve excelente aproximação do modelo com a variável medida;	É necessário um conhecimento prévio do modelo fenomenológico do sistema
Castellanos Molina et al. (2014)	Modelagem utilizando abordagem multivariável discreta, comparando o modelo com outras estratégias <i>black-box</i>	Redução da complexidade matemática, excelentes resultados na validação da simulação	A validação do modelo ocorreu somente em nível de simulação;
Royer et al. (2014)	Modelagem <i>black box</i> via estrutura MIMO	Excelente resultado em comparação com a simulação, estrutura MIMO	A validação do modelo ocorreu somente em nível de simulação;
Béguery et al. (2015)	Modelagem de um sistema HVAC via Simulink baseado nos parâmetros obtidos via simulação predial	Redução da complexidade matemática, excelentes resultados na validação da simulação	Necessidade de levantamento de todas as características prediais e detalhes do sistema
Afram e Janabi-Sharifi (2015)	Modelagem via abordagem <i>grey-box</i> ARMAX com simulação via Simulink	Validação obteve ótimos resultados utilizando-se um sistema real;	Abordagem <i>grey-box</i> tem dependência com o modelo fenomenológico
Abdo-Allah et al. (2017)	Modelagem <i>black box</i> via estrutura MIMO	Redução da complexidade matemática devido a obtenção dos parâmetros via software;	Não apresenta validação dos resultados, apenas detalhamento do método

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao final do capítulo 3 foram abordados os seguintes tópicos:

- Revisão bibliográfica relacionada à modelagem de sistemas HVAC: Trabalhos baseados em utilização de ferramentas de software para obtenção dos modelos, e trabalhos baseados na obtenção de modelos paramétricos; As referências que tiveram maior impacto no desenvolvimento deste trabalho foram: Barbosa e Mendes (2003), Mustafaraj et al. (2010) e Castellanos e Molina (2014).
- Revisão bibliográfica relacionada a aplicação de estratégias de controle preditivo em sistemas HVAC: Trabalhos relacionados a avaliação da modelagem utilizada pelo algoritmo de controle, outros trabalhos relevantes ao tema, trabalhos que utilizam avaliação do consumo energético de sistemas de controle, e considerações finais; As referências que tiveram maior impacto no desenvolvimento deste trabalho foram: Maasoumy e Sangiovanni-Vincentelli (2012), Salsbury e Mhaskar (2013), Schwingshackl et al. (2013) e Mohammad *et al.* (2019).

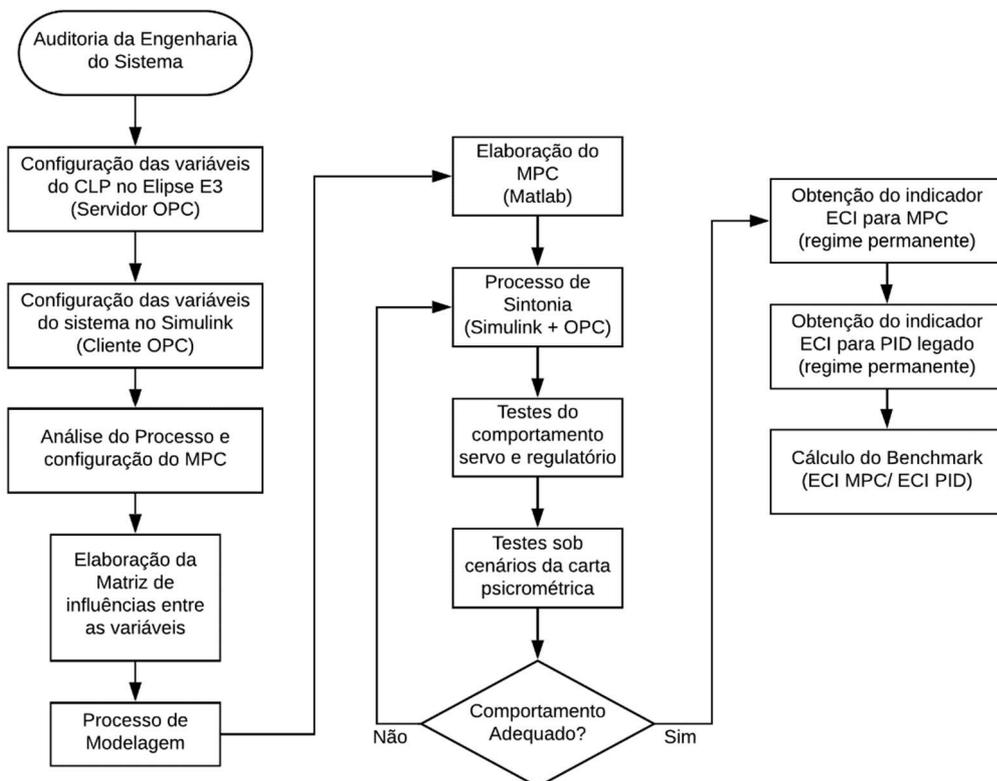
4 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentadas as ferramentas, as técnicas e procedimentos que foram utilizados para cumprir com os objetivos deste estudo. Os softwares utilizados para desenvolver cada uma das etapas do trabalho serão descritos, uma vez citadas as técnicas necessárias na seção de fundamentação teórica.

Ao longo desta seção são apresentadas soluções criadas através de livrarias do software Matlab® o qual foi devidamente licenciado para versão de pesquisa na Universidade Unisinos.

Na figura 16 é apresentado o fluxograma que representa as etapas da metodologia implementada neste trabalho, iniciando pela auditoria da engenharia do sistema, até a obtenção dos resultados da aplicação do controle MPC. O detalhamento de cada um dos processos será abordado ao longo deste capítulo.

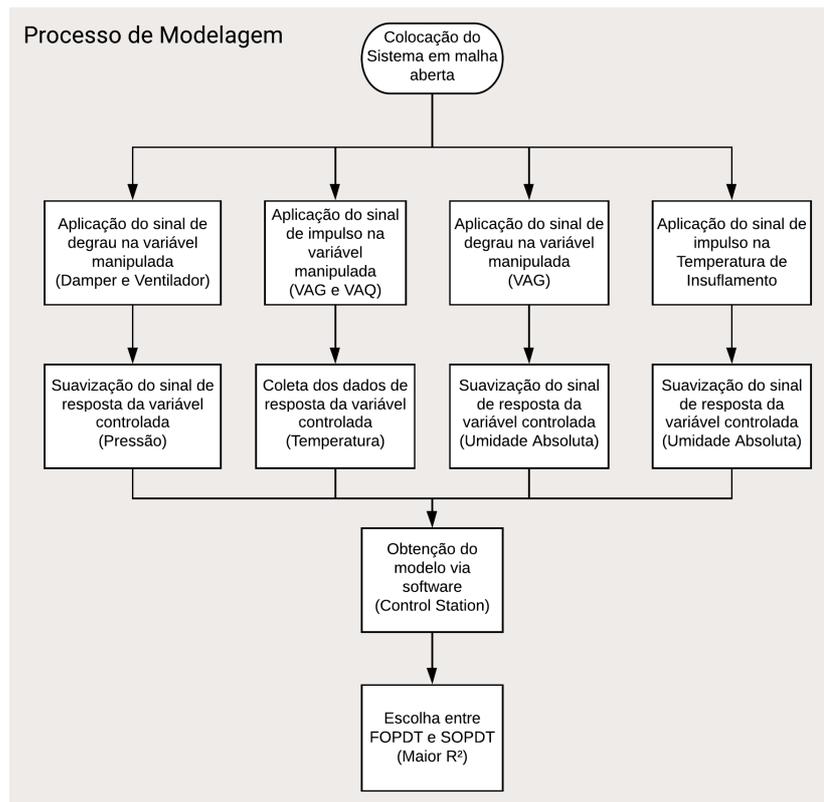
Figura 16 – Fluxograma representativo da metodologia implementada



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura 17 é apresentado o fluxograma dos processos envolvidos na etapa de modelagem paramétrica do sistema multivariável. Mais detalhes a respeito de cada um dos processos serão abordados ao longo deste capítulo.

Figura 17 – Fluxograma representativo ao processo de modelagem realizado



Fonte: Elaborada pelo autor.

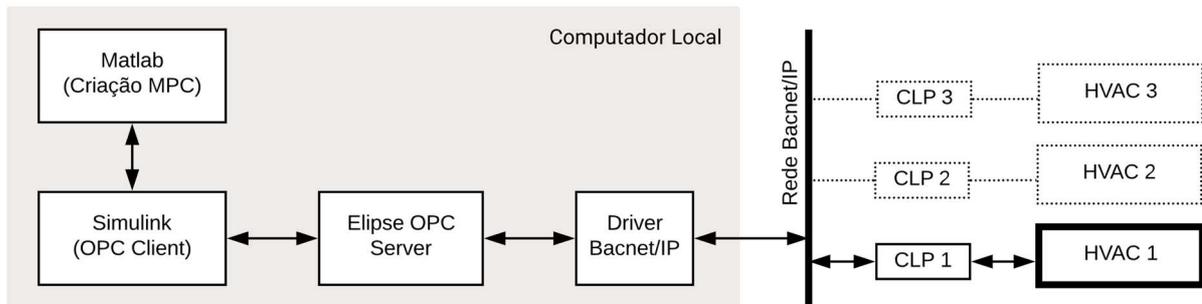
4.1 AUDITORIA DA ENGENHARIA DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE

Uma avaliação completa das malhas de controle em operação é necessária como primeira etapa do projeto e implementação de uma nova estratégia de controle avançado. Nesta etapa são avaliadas as condições da instrumentação e infraestrutura de controle locais, buscando anomalias que interferem no resultado da lei de controle, como por exemplo, ruídos elevados nos sinais das variáveis, verificando o funcionamento de atuadores, posicionamento de sensores, ajustes das escalas dos sensores para a grandeza pretendida, entre outros. Não foram feitas modificações na estratégia de controle legada nem foi realizada uma nova sintonia. (PEREIRA; SANTOS; MEJÍA, 2019).

4.2 INTEGRAÇÃO DA APLICAÇÃO DA ARQUITETURA COM O MPC

Após realizar uma auditoria completa das malhas de controle em operação no sistema HVAC do itt-Chip, foi necessário também avaliar um meio de realizar a integração da infraestrutura local com o controlador MPC em nível de aplicação provisória. Com base nisso, o levantamento da infraestrutura local foi elaborado, avaliando-se alternativas para a realização da leitura e escrita das variáveis necessárias, processamento da lei de controle e aquisição de dados, conforme apresentado na figura 18.

Figura 18 – Representação da infraestrutura de testes e implementação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a etapa de leitura e escrita das variáveis do sistema HVAC físico, foi utilizado o padrão OPC® (*Open Platform Communications*) a partir do software Elipse® E3 que além de atuar como servidor OPC, também foi utilizado para desenvolvimento da aplicação SCADA, para monitoramento e aquisição de dados. Desta forma, um computador foi instalado na rede local com a função de proporcionar a interface com o sistema SCADA, e executar o Matlab® e Simulink® onde foi criado e executado o controlador MPC, respectivamente.

4.2.1 Plataforma de desenvolvimento Elipse® E3

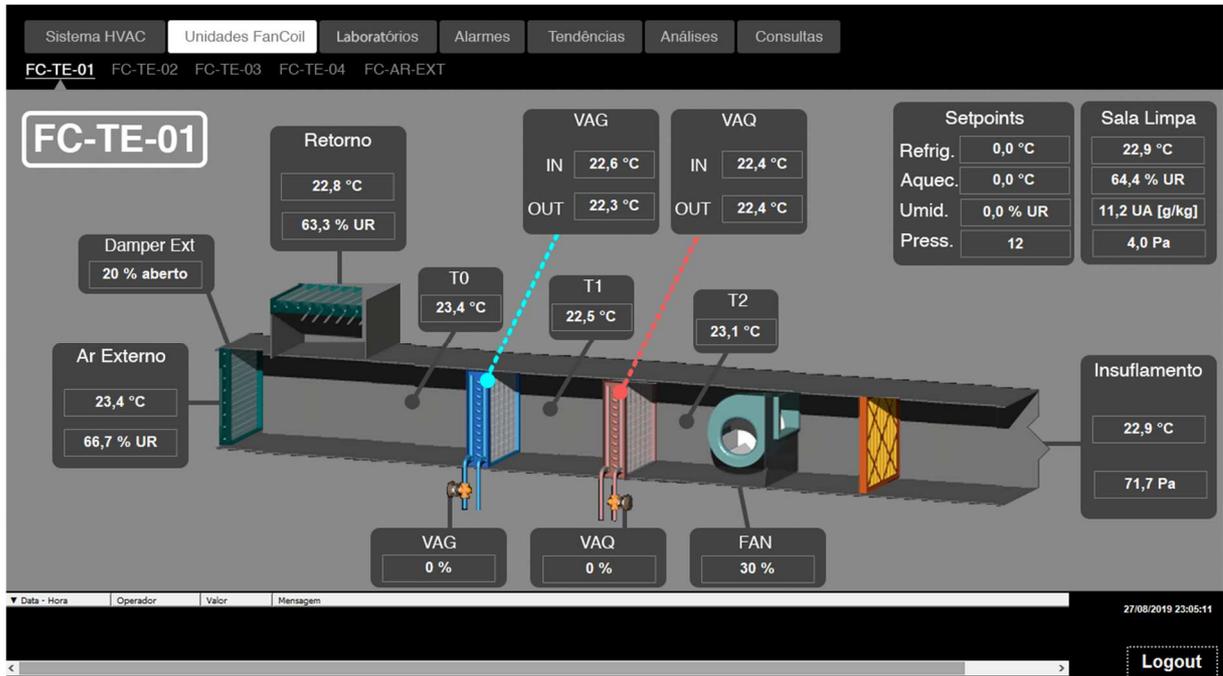
A plataforma de desenvolvimento Elipse® E3 é uma ferramenta de desenvolvimento de um ambiente HMI/SCADA para monitoramento e controle de processos. Para o desenvolvimento do projeto, três softwares de Elipse® foram utilizados: E3 Studio, utilizado para desenvolvimento e configuração da aplicação; E3 Server, utilizado como o servidor das aplicações, sincronismo e redundância dos

dados, o qual será executado no computador local; E3 Viewer, utilizado para execução da aplicação desenvolvida como interface de operação do sistema e visualização de dados *on-line*, a qual foi executada no computador local, com possibilidade de execução remotamente.

Na figura 19 é apresentada uma das telas da HMI do SCADA desenvolvido para o processo relacionado às salas limpas do itt-Chip/Unisinos. Conforme mostra a figura, é possível a visualização das variáveis do processo em tempo real, para cada uma das unidades de tratamento de ar (AHU), além da possibilidade de acessar via menu superior:

- Visualização da lista de alarmes da planta;
- Tendências das variáveis (representação gráfica temporal);
- Consultas de relatórios;
- Visualização geral das condições de operação de cada laboratório do instituto;

Figura 19 – Tela da interface HMI/SCADA – Menu Unidades Fancoil

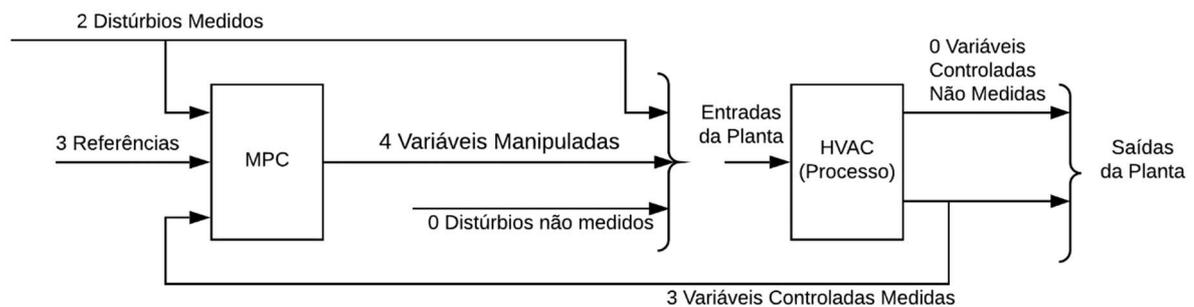


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 ELABORAÇÃO DO CONTROLADOR MPC

O controlador MPC foi elaborado segundo as premissas apresentadas na seção 2, visando atender aos objetivos de controle. Para criação das configurações do MPC, foram utilizadas as bibliotecas dos softwares Matlab® e Simulink® a partir das informações resultantes da análise do processo. Após a análise do sistema de controle foram identificadas e definidas as variáveis controladas, variáveis manipuladas e distúrbios medidos, bem como os seus limites de operação os quais são apresentados na tabela 7. A arquitetura utilizada para elaboração do controlador está apresentada na figura 20.

Figura 20 – Arquitetura do Controlador Preditivo implementado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 7 – Lista de variáveis que compõe o sistema de controle MPC

Descrição da variável	Tipo de Variável	Condição de Custo Ideal	Operação Desejada	Limite Min	Limite Max
Temperatura da Sala Limpa	Controlada	23	Setpoint Fixo	20	26
Umidade Absoluta da Sala Limpa	Controlada	11	Faixa	5	11
Pressão da Sala Limpa	Controlada	5	Setpoint Fixo	4	15
Temperatura de ar externo	Distúrbio Medido	-	-	-	-
Umidade Absoluta do ar externo	Distúrbio Medido	-	-	-	-
Abertura da VAG	Manipulada	0	Target	0	100
Abertura de VAQ	Manipulada	0	Target	0	100
Abertura Damper Ar externo	Manipulada	20	Target	0	100
Velocidade do Ventilador	Manipulada	-	Livre	0	100

Fonte: Elaborada pelo autor.

A lista de variáveis apresentada na tabela 7 foi obtida a partir da etapa de análise do sistema, após a observação, simulação e verificação dos resultados dos primeiros testes dinâmicos. Outras versões de estrutura foram elaboradas contemplando um menor número de variáveis, porém a estrutura apresentada nesta

seção foi aquela que apresentou melhor desempenho e compromisso com os objetivos de controle. Importante lembrar que devido a importância de se estabelecer uma renovação do ar do ambiente controlado, é necessário definir-se um percentual de abertura do Damper de ar externo. Deseja-se, portanto, que o Damper Externo permaneça aberto em um valor fixo, com valor pequeno suficiente para garantir a entrada de ar no sistema, sem prejudicar o consumo de energia de maneira considerável. Porém, em caso de necessidade de aumento da pressão interna da sala, deve ser prevista a atuação do ventilador preferencialmente, e caso essa atuação não seja suficiente, o Damper de Ar externo deverá ser fechado para que ocorra o aumento da pressão¹.

Após a elaboração de uma versão piloto do controlador, foi necessário testar o controlador MPC frente a perturbações, visando observar o comportamento das variáveis manipuladas. A simulação foi desenvolvida utilizando-se a aplicação “*MPC Design*” contida na biblioteca “*MPC Toolbox*” do software Matlab® e Simulink®. A definição da sintonia foi obtida a partir de inúmeros testes em nível de aplicação conforme seção 2.4.3, o que resultou nos valores declarados na tabela 8. Os fatores de escalonamento utilizados para normalização das variáveis de processo e variáveis manipuladas são apresentados na tabela 9.

4.4 MODELAGEM E ANÁLISE DO SISTEMA HVAC

Conforme as técnicas descritas nas seções 2.3 e 2.4, foi feita inicialmente a análise do processo, seguida pela modelagem do sistema proposto para estudo, tendo em vista a necessidade de se representar o seu comportamento dinâmico com boa aproximação, de modo a atender as expectativas de projeto com grau significativo de confiabilidade.

A análise do sistema foi feita por observação, considerando-se os aspectos construtivos e de projeto da planta, conforme já descrito na seção de fundamentação teórica. O procedimento de elaboração de cada modelo necessita de esforço computacional provido primordialmente pelo software Matlab® e Control Station®, cujas ferramentas são melhor descritas a seguir.

¹ O comando enviado para o damper de ar externo implica na condição de abertura oposta no damper de retorno. Desta forma, quando o damper de Ar externo está 20% aberto, o damper de retorno está 20% fechado.

Tabela 8 – Parâmetros de sintonia adotados no controle MPC

Símbolo	Descrição	Variável Relacionada	Sintonia Agressiva	Sintonia Conservativa
$w_{n,k}^y$	Peso para o seguimento de referência para a saída de processo n , referente ao instante k do horizonte de predição	Temp. Sala	1000	
		Umidade Abs. Sala	1000	
		Pressão Ambiente	80	
$w_{m,k}^u$	Peso para o seguimento de referência para a variável manipulada m , referente ao instante k do horizonte de predição	Válvula Água Gelada	100	400
		Válvula Água Quente	100	400
		Ventilador	0	0
		Damper Ar Externo	80	80
$w_{m,k}^{\Delta u}$	Peso para a supressão de movimento para a variável manipulada m , referente ao instante k do horizonte de predição	Válvula Água Gelada	1	
		Válvula Água Quente	1	
		Ventilador	1	
		Damper Ar Externo	1	
T_s	Tempo de Amostragem do controle preditivo	-	10 segundos	
$N1$	Horizonte de predição inicial	-	Zero (0)	
$N2$	Horizonte de predição final	-	1500/ T_s	
C	Horizonte de controle	-	375 (=N2/4)	
ρ_ε	Peso para penalidade de violação de restrição;	Temp. Sala	0.01	
		Umidade Abs. Sala	0.01	
		Pressão Ambiente	0.05	
		Temp. Insuflamento	0.01	
		Válvula Água Gelada	1	
		Válvula Água Quente	1	
		Ventilador	1	
		Damper Ar Externo	1	
ε_k	Variável de relaxamento da restrição no instante k ;	Temp. Sala	1e5	
		Umidade Abs. Sala	1e5	
		Pressão Ambiente	1e5	
		Temp. Insuflamento	1e5	
		Válvula Água Gelada	1e5	
		Válvula Água Quente	1e5	
		Ventilador	1e5	
		Damper Ar Externo	1e5	

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 9 – Fatores de escalonamento utilizados para normalização das variáveis

s_n^y	Fator de escalonamento para a variável de saída do processo n	Temp. Sala	6 (20 a 26°C)
		Umidade Abs. Sala	6 (5 g/kg a 11g/kg)
		Pressão Ambiente	10 (5Pa a 15Pa)
		Temp. Insuflamento	15 (15 a 30°C)
s_m^u	Fator de escalonamento para a variável manipulada m	Válvula Água Gelada	100 (0 a 100%)
		Válvula Água Quente	100 (0 a 100%)
		Ventilador	100 (0 a 100%)
		Damper Ar Externo	100 (0 a 100%)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na tabela 10 são apresentadas as influências entre as variáveis do sistema de controle MPC. As quatro primeiras colunas são relacionadas às variáveis manipuladas enquanto as duas últimas colunas são relacionadas aos distúrbios medíveis de umidade e temperatura. As informações contidas na matriz de influências entre as variáveis foram de extrema importância no sentido de verificar e comparar a relação estabelecida com os modelos obtidos.

Tabela 10 – Matriz de influências entre as variáveis do sistema HVAC do itt-Chip

	Abertura da VAG	Abertura da VAQ	Abertura Damper Ar externo	Velocidade do Ventilador	Distúrbio de Temperatura (Ar Externo)	Distúrbio de Umidade (Ar Externo)
Temperatura da Sala Limpa	--	++			+	
Umidade Absoluta da Sala Limpa	--					+
Pressão da Sala Limpa			++	++		

Fonte: Elaborada pelo autor.

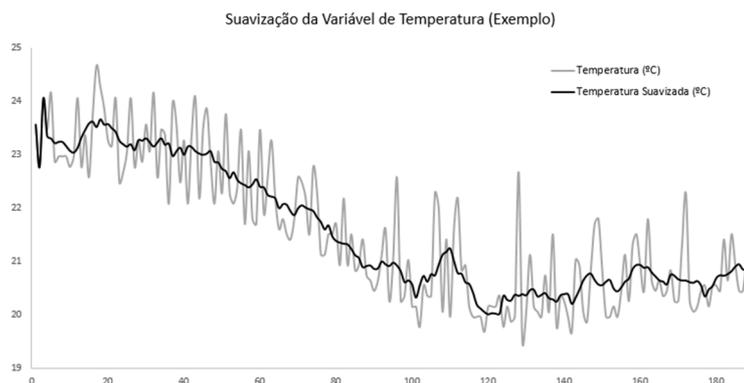
4.4.1 Estimação dos parâmetros das funções de transferência do sistema

Tendo em vista a natureza multivariável do problema proposto em virtude do acoplamento das variáveis e da estrutura do controlador preditivo, foi necessário a utilização de uma ferramenta que fosse capaz de fornecer um modelo em funções de transferência no domínio da frequência complexa, para cada entrada-saída da planta, conforme descrito na equação (14) da seção 2.4.2. Nesse caso, foi prevista a elaboração de uma interface para aplicação de sinais de perturbação no sistema em malha aberta, bem como a aquisição dos dados e observação em tempo real. Além disso, foi necessário aplicar uma etapa de pré-processamento em alguns sinais mais ruidosos, de forma a assegurar a qualidade dos dados, neste sentido alguns sinais ruidosos foram suavizados. A suavização foi realizada utilizando um filtro de média móvel com uma janela de tamanho 9, obtendo-se como valor da variável suavizada a média aritmética dos valores dentro desta janela. Desta forma, o valor da variável filtrada no instante k é igual ao valor da média dos valores contidos dentro da janela de tamanho $n = 10$, conforme equação (18) apresentada abaixo:

$$y_{filtrada}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y\left(k - i + \frac{n}{2}\right) \quad (18)$$

Para exemplificar o resultado do processo de suavização dos dados, a figura 21 é apresentada.

Figura 21 – Exemplo do efeito da suavização aplicada aos sinais ruidosos da planta



Fonte: Elaborada pelo autor.

O procedimento utilizado para obtenção das funções de transferência foi repetido para cada combinação entrada-saída da planta, conforme segue:

- Estabilizar o sistema no ponto de operação da planta, ou seja, observar um equilíbrio entre a temperatura de insuflamento e temperatura de retorno, com todos os atuadores no valor mínimo;
- Aplicar uma mudança positiva no atuador com valor em torno de 50% do limite máximo de operação;
- Aguardar a variável de saída do processo mudar de valor;
- Retornar a variável manipulada para a posição inicial (mínimo);
- Aguardar um intervalo de tempo suficiente para capturar a dinâmica da variável de saída do processo;

Com a aquisição dos dados gerados de cada ensaio, foi utilizado o software Control Station® para obtenção das funções de transferência segundo a estrutura de modelo com menor erro de estimação, conforme apresentado na figura 24.

Nas tabelas 11 e 12 são apresentadas as funções de transferência obtidas no domínio das frequências complexas.

Tabela 11 – Composição das funções de transferência no modelo do sistema HVAC

	Abertura da VAG	Abertura da VAQ	Abertura Damper Ar externo	Velocidade do Ventilador	Distúrbio de Temperatura (Ar Externo)	Distúrbio de Umidade (Ar Externo)
Temperatura da Sala Limpa	$G_1(s)$	$G_3(s)$	-	-	$G_6(s)$	-
Umidade Absoluta da Sala Limpa	$G_2(s)$	-	-	-	-	$G_7(s)$
Pressão da Sala Limpa	-	-	$G_4(s)$	$G_5(s)$	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 12 – Parâmetros das funções de transferência do sistema HVAC

	Modelo Paramétrico	R ²		Modelo Paramétrico	R ²
$G_1(s)$	$\frac{-0,6947 e^{-157,8s}}{(564,7s + 1)^2}$	0,996	$G_5(s)$	$\frac{0,168e^{-5,2s}}{(9,22s + 1)^2}$	0,9713
$G_2(s)$	$\frac{-0,0682 e^{-100,9s}}{260,2s + 1}$	0,9967	$G_6(s)$	$\frac{0,6769 e^{-88,5s}}{(355,1s + 1)^2}$	0,9948
$G_3(s)$	$\frac{0,3057 e^{-226,5s}}{(491,7s + 1)^2}$	0,997	$G_7(s)$	$\frac{1e^{-100s}}{200s + 1}$	-
$G_4(s)$	$\frac{0,1049e^{-1,5s}}{1,24s + 1}$	0,9755			

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.1.1 Considerações a respeito da obtenção dos parâmetros das funções de transferência dos distúrbios medíveis

A função de transferência $G_8(s)$ que relaciona o distúrbio de temperatura que ocorre através da entrada do ar externo no sistema, com a temperatura da sala limpa, foi obtida gerando-se uma perturbação na temperatura de insuflamento, abrindo-se a válvula de água quente por um período curto de tempo, e fechando-a em seguida. Uma vez que a diferença de temperatura entre a caixa de mistura e a sala limpa é consideravelmente pequena, avaliou-se obter o modelo a partir de uma perturbação mais expressiva, com apenas um erro de estimação pelo atraso gerado pela passagem do ar através da AHU.

A função de transferência $G_9(s)$ que relaciona o distúrbio medível de temperatura com a temperatura de insuflamento não foi estimada computacionalmente, uma vez que o distúrbio de temperatura que ocorre na caixa de mistura da AHU deve impactar diretamente e de forma aproximadamente instantânea na temperatura de insuflamento. Portanto, foi aproximada essa dinâmica com um ganho estático unitário.

A função de transferência $G_{10}(s)$ que relaciona o distúrbio medível de umidade absoluta com a umidade absoluta da sala não foi estimada computacionalmente devido ao fato de que não há sensor de umidade absoluta na caixa de mistura. Uma aproximação foi aplicada, considerando-se que a umidade absoluta estimada que entra na caixa de mistura deve impactar na umidade da sala com ganho unitário, considerando-se um atraso pelo deslocamento pela AHU somado ao tempo da diluição do ar insuflado com distúrbio pelo ambiente.

4.5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

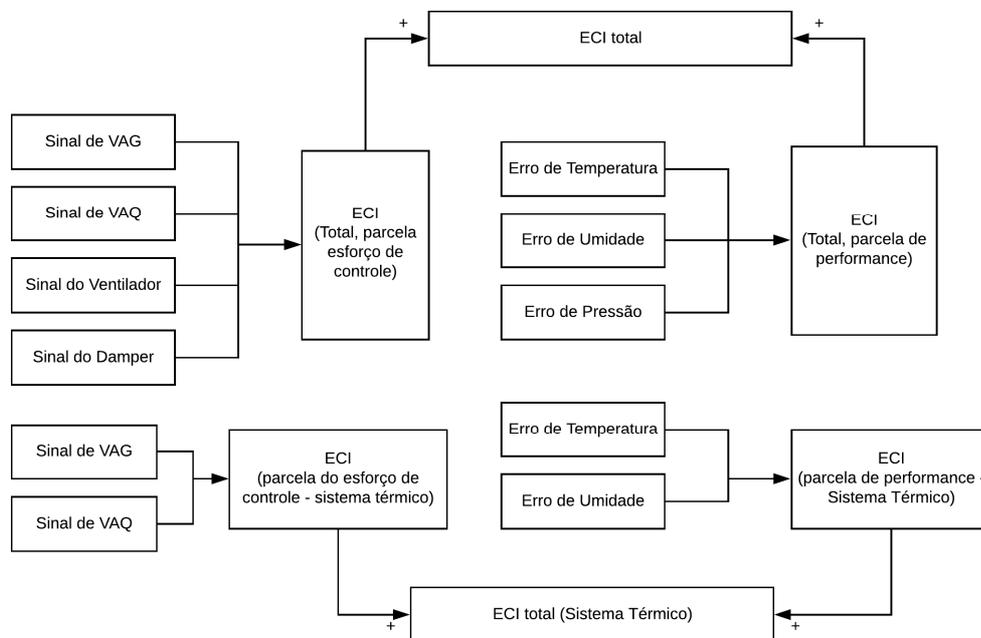
Os resultados foram avaliados com o objetivo de avaliar a performance do controlador preditivo submetendo-o a mudanças de setpoint e a avaliação do consumo energético através de aplicação do indicador ECI, conforme mencionado anteriormente na seção 3.2.3. Portanto, após a síntese do controlador preditivo, foram aplicados uma série de testes, numerados na tabela 13.

Os primeiros testes realizados (teste 1 a 5) mostram o seguimento de referência, rejeição de perturbações, e o respeito às restrições aplicadas a variável de temperatura da sala limpa. Os testes relacionados à aplicação do índice de consumo energético ECI (testes 7 e 8) foram realizados sob condição de regime permanente, em um controlador por vez e no mesmo HVAC, podendo haver uma pequena interferência da variação de temperatura externa nos resultados.

Os ensaios de performance do controlador preditivo foram realizados através da mudança de referências considerando-se quatro cenários distintos de mudança da posição do ponto de operação na carta psicrométrica, conforme apresentado na figura 23, os quais contemplam, a mudança de ambas as variáveis de umidade e temperatura, enquanto a variável de pressão ambiente permaneceu estável com referência fixa em 5 Pa.

Os testes realizados para obtenção de um *Benchmark* relacionando o indicador ECI do controlador preditivo frente ao indicador do controle tradicional do itt-Chip (T7 e T8) foram realizados levando-se o sistema ao ponto de operação e mantendo-o sob a mesma referência por um período de 10.000 segundos. Ao final desta etapa, foi obtido um vetor de dados contendo a evolução deste indicador frente à evolução do indicador do controle PID legado do itt-Chip, ao longo dos 10.000 segundos. Além disso, foram avaliadas as parcelas correspondentes a cada grupo de variáveis manipuladas e variáveis controladas, conforme apresentado na

Figura 22 – Sinais utilizados na obtenção do indicador de consumo energético e suas parcelas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados utilizados na avaliação dos resultados foram obtidos a partir da aquisição dos dados experimentais dentro do Simulink® através da utilização do Elipse® OPC Server.

Tabela 13 – Mapa dos testes realizados para obtenção dos resultados

	Controle MPC (Sintonia agressiva)			Controle MPC (Sintonia Conservativa)			Controle PID itt-Chip Unisinos		
	Temperatura da Sala	Umidade da Sala (fora da faixa)	Pressão da Sala	Temperatura da Sala	Umidade da Sala (dentro da faixa)	Pressão da Sala	Temperatura da Sala	Umidade da Sala	Pressão da Sala
Seguimento de Referência	T1			T2			T6		
Rejeição de perturbações	T4		T3	T2		T3			
Respeito a restrições	T1			T5					
Consumo Energético (Regime Permanente)	T7			T8			T7 e T8		
Performance (Cenário 1)	T9								
Performance (Cenário 2)	T10								
Performance (Cenário 3)	T11			T13					
Performance (Cenário 4)	T12			T14					

Fonte: Elaborada pelo autor.

O procedimento realizado para elaboração de cada um dos ensaios de alteração de referência (testes de performance, cenários 1 a 4) para o controle MPC é listado a seguir:

- Selecionar o ponto de operação como referência inicial do sistema de controle;
- Inicializar o ambiente de testes, descartando-se o primeiro resultado das variáveis manipuladas obtidas do MPC;
- Aguardar o sistema estabilizar o valor das variáveis no ponto de operação;
- Alterar as referências conforme cada um dos cenários;
- Aguardar a estabilização das variáveis controladas nas referências escolhidas;
- Aplicação do Algoritmo para obtenção do indicador e consumo energético, desde o instante onde ocorreu a mudança de referência até a estabilização das variáveis controladas;

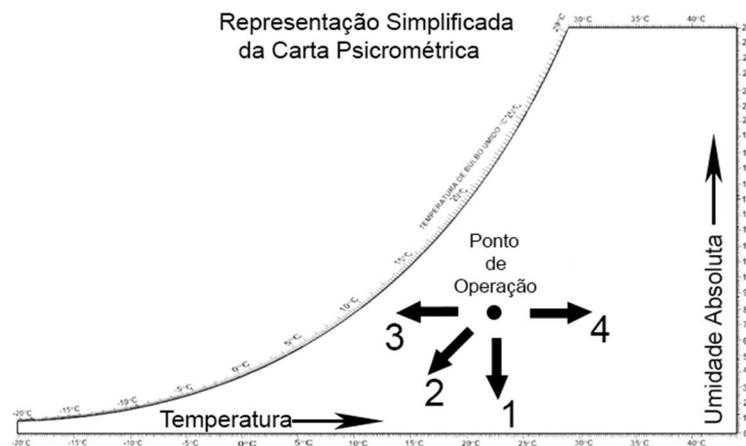
Os pesos utilizados no controlador preditivo para sintonia conservativa ou agressiva foram apresentados na tabela 8, na página 68.

Tabela 14 – Valores de referências considerados como cenários para avaliação do desempenho do controle preditivo

Referências	Temperatura da Sala Limpa (°C)	Umidade Relativa máxima da Sala Limpa (%)	Pressão Ambiente (Pa)
Ponto de Operação Inicial	23	60	5
Cenário 1	23	50	5
Cenário 2	20	50	5
Cenário 3	20	60	5
Cenário 4	26	60	5

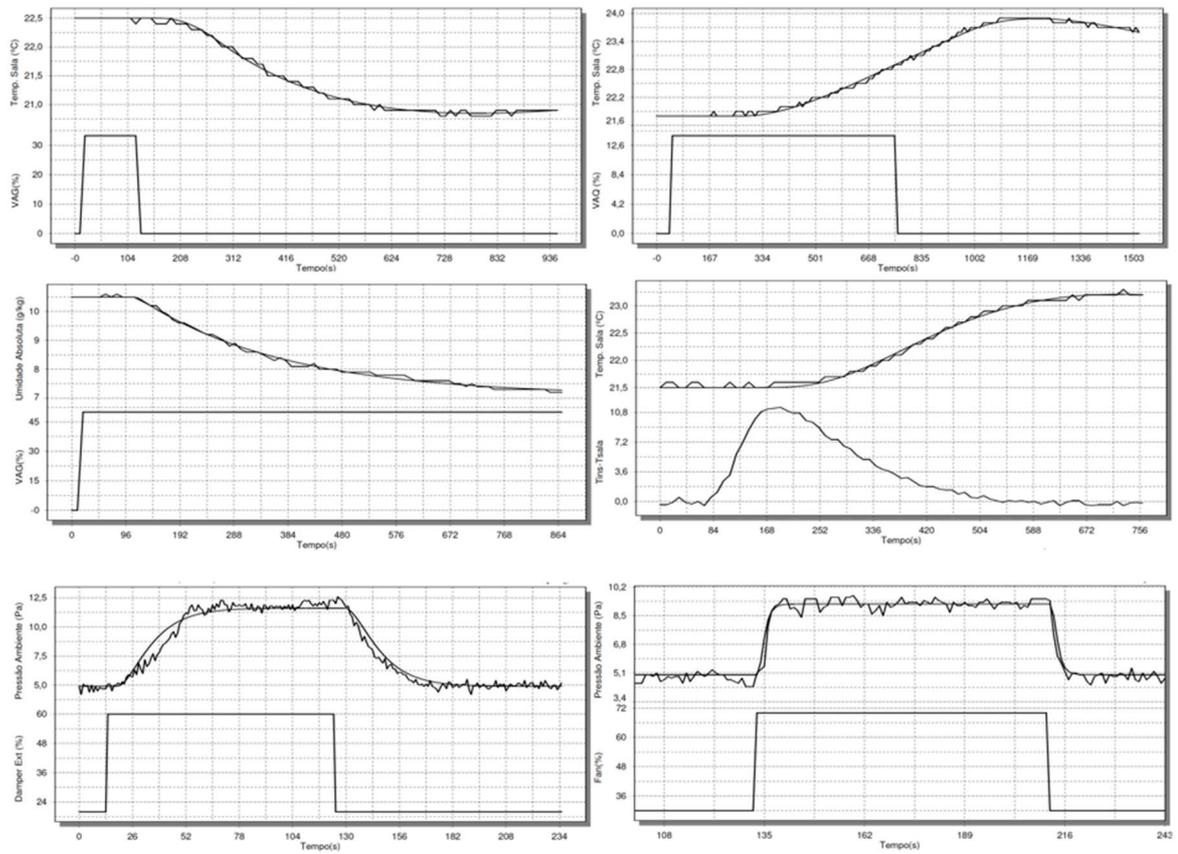
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23 – Cenários de alteração de referência para avaliação dos resultados de consumo energético dos sistemas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – Ensaio em malha aberta e validação das funções de transferência do processo



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos conforme procedimentos apresentados na seção de Metodologia, seguindo-se a seguinte sequência:

- Testes de performance (seguimento de referência, rejeição de perturbações e respeito a restrições, T1 a T6);
- Testes de mudanças de referência (cenários pré-estabelecidos, de T9 a T14);
- Testes para aplicação do indicador de consumo energético, ECI (T7 e T8);

Os valores aplicados no MPC para sintonia agressiva e sintonia conservativa estão apresentados na tabela 8 na página 68.

Ao longo da seção de resultados, será percebida oscilações na variável de temperatura de insuflamento, o que possui um relativo grau de importância: A temperatura de insuflamento serve apenas de parâmetro de análise de tendência que a variável controlada de temperatura da sala limpa possui ao longo do horizonte futuro. Além disso, considerando-se que o distúrbio medido de temperatura (MD-T) foi definido como a diferença entre a temperatura de insuflamento e a temperatura da sala, é natural que o controle preditivo obtenha uma lei de controle que compense os distúrbios, e ao fazê-lo são esperadas oscilações na temperatura de insuflamento.

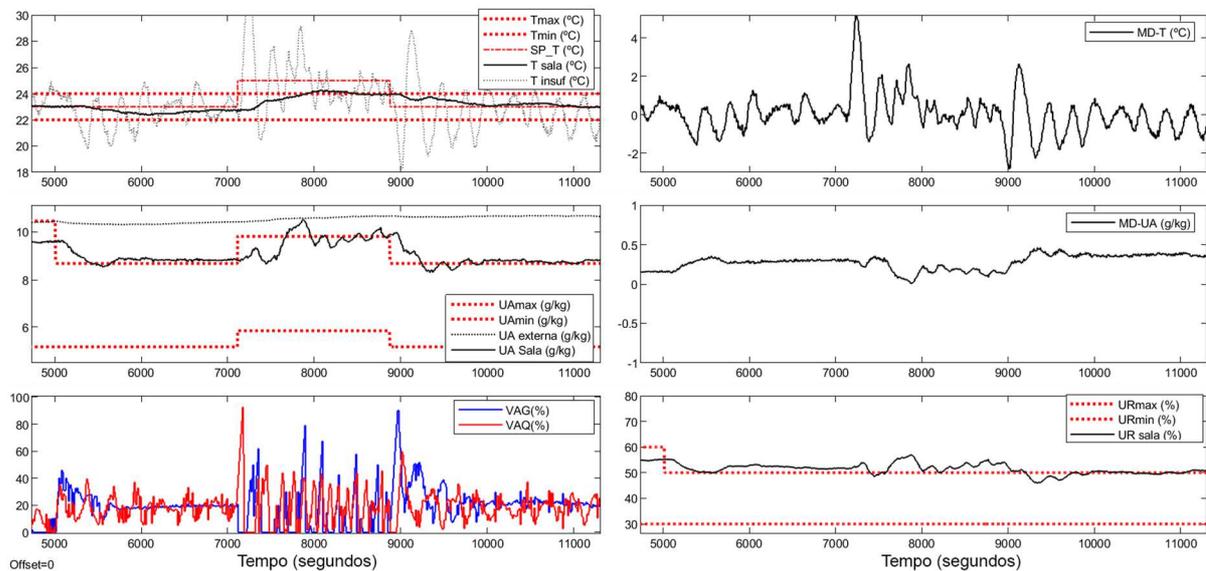
5.1 COMPORTAMENTO SERVO DO MPC COM SINTONIA AGRESSIVA (TESTE 1)

Conforme apresentado na figura 25, foram estabelecidos limites para as variáveis de temperatura da sala e Umidade absoluta da sala. As restrições aplicadas à variável controlada de temperatura da sala correspondem a 1°C acima e abaixo do ponto de operação de 23°C, portanto, ao selecionar um setpoint acima desta faixa de restrição, o controlador preditivo deve manter a variável dentro das restrições, uma vez que a sintonia foi ajustada para uma suavidade baixa das restrições. Percebe-se, portanto, o seguimento de referência da variável de temperatura e umidade absoluta, sob mudança das referências no instante aproximadamente igual a 7000 segundos e novamente retornando para a restrição no instante próximo a 9000 segundos. No instante de tempo igual a 8000 segundos é percebido que a referência está fora da

faixa de restrições, porém a variável permanece com valor máximo de 24°C, ou seja, o limite superior da restrição para temperatura.

No ensaio T1 a umidade absoluta externa está consideravelmente acima do setpoint de umidade absoluta desejada. Portanto, ao abrir-se o damper de ar externo, uma perturbação de umidade está agindo sobre o sistema, a qual é corrigida ao longo do tempo. Além disso, sabe-se que a umidade absoluta é levemente perturbada durante o processo de aquecimento, o que produz as oscilações na umidade absoluta (e conseqüentemente na umidade relativa).

Figura 25 – Resultados do comportamento servo e regulatório com uma sintonia agressiva no MPC



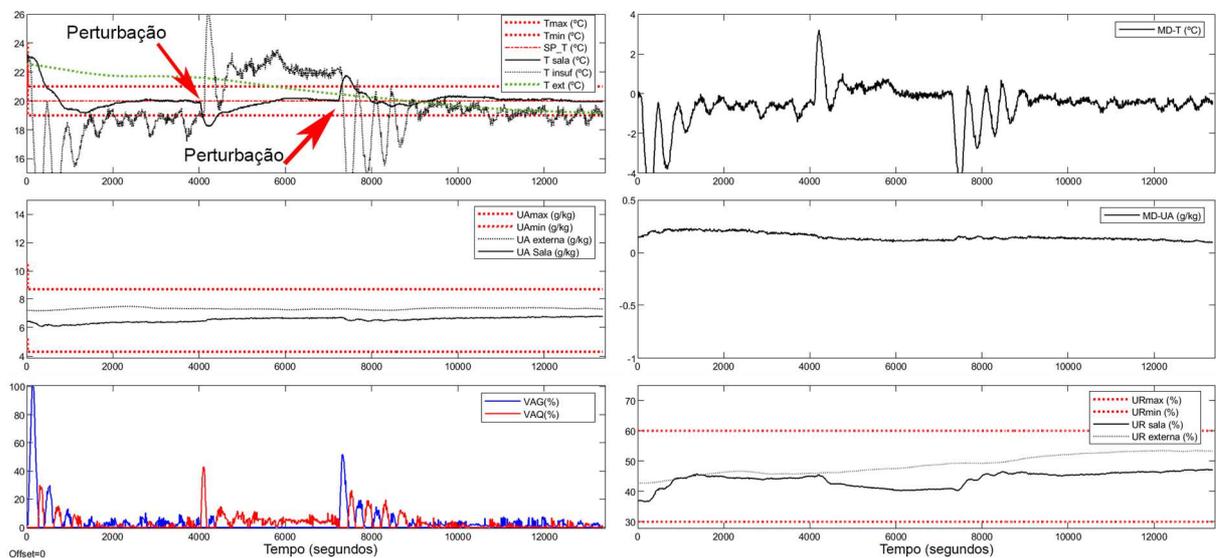
Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

5.2 COMPORTAMENTO SERVO E REGULATÓRIO DO MPC COM SINTONIA CONSERVATIVA (TESTE 2)

Na figura 26 é possível verificar-se que a variável controlada de temperatura parte de uma condição inicial de 23°C e sua referência imediatamente é alterada para 20°C. Após aproximadamente 2500 segundos a variável controlada de temperatura é estabilizada no valor de referência, enquanto a variável controlada de umidade absoluta se encontra dentro da faixa. Conforme já mencionado, a operação por faixas implica na aplicação de peso de seguimento de referência igual a zero para a variável quando ela se encontra na faixa.

Aproximadamente após 4000 segundos, foi aplicada uma perturbação de temperatura de ganho unitário e constante de tempo de 80 segundos na realimentação do controlador, através do Simulink®. As setas indicam o instante em que a perturbação ocorre, e percebe-se dentro de alguns segundos, a rejeição destas perturbações. Devido ao fato que as perturbações excediam o valor das restrições, o teste de respeito a restrições não foi conclusivo neste teste, sendo realizado no teste T5.

Figura 26 – Resultados do comportamento servo e regulatório com uma sintonia conservativa no MPC



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

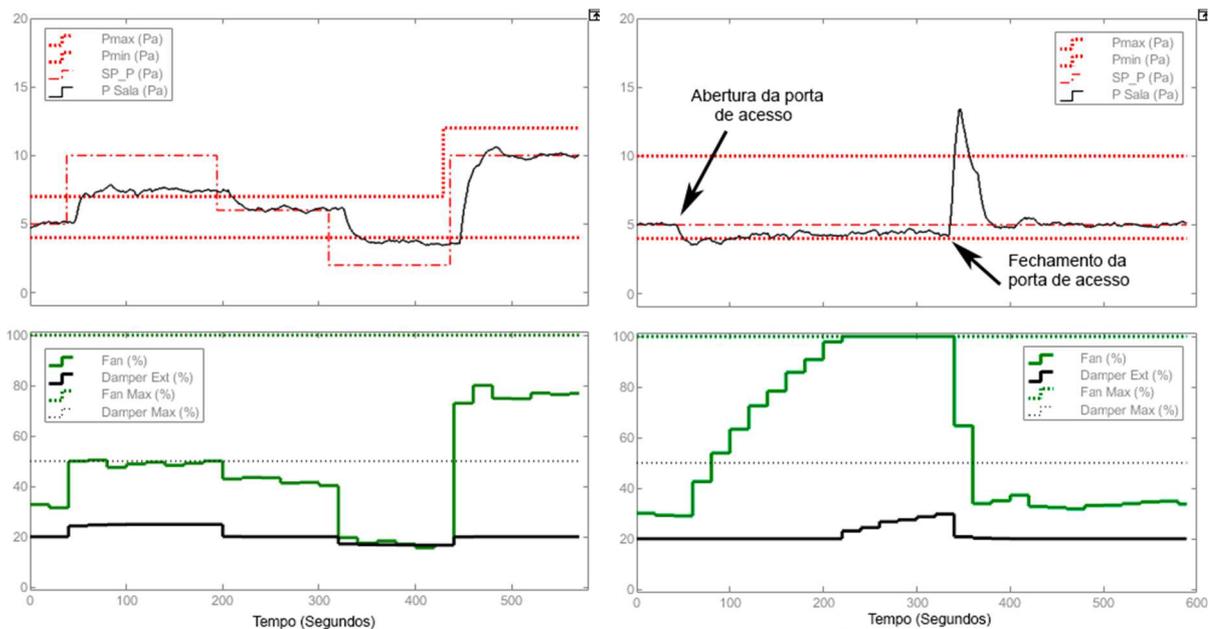
5.3 CONTROLE DE PRESSÃO INTERNA DA SALA LIMPA (TESTE 3)

Conforme definido na seção 4, foram feitos testes de seguimento de referência e rejeição de perturbação para a variável de Pressão interna da sala limpa. Além disso, foram estabelecidos limites de atuação da variável controlada, e então alterada a referência para um valor acima e abaixo dos limites. Foram então, ajustados os pesos para suavização da variável controlada de modo a respeitar as restrições estabelecidas. Pode-se verificar na figura 27 que a variável de pressão da sala seguiu referência, e rejeitou perturbação no instante indicado.

Conforme especificação do projeto, definida na tabela 7, a variável manipulada possui um *target*, ou seja, uma referência de 20%. Entretanto, para que existam graus

de liberdade suficiente para obtenção do controle da variável de Pressão, é necessário deixar a velocidade do ventilador como uma variável manipulada totalmente livre. Desse modo, a figura 27 mostra que o seguimento de referência ocorreu preferencialmente pela atuação do ventilador em detrimento da abertura do Damper de ar externo. A abertura do Damper, conforme já mencionado, permite a entrada de ar do meio externo para a sala limpa, o que é vantajoso para renovação de ar, porém o excesso de abertura perturba as variáveis controladas de umidade e temperatura da sala em um nível não desejado. Quando a velocidade do ventilador atinge o seu limite máximo, o damper de ar externo inicia o fechamento¹ com a intenção de levar a variável controlada para a referência.

Figura 27 – Resultados do comportamento servo e regulatório para a pressão interna da Sala Limpa



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

Conforme especificação do projeto, definida na tabela 7, a variável manipulada possui um *target*, ou seja, uma referência de 20%. Entretanto, para que existam graus de liberdade suficiente para obtenção do controle da variável de Pressão, é necessário deixar a velocidade do ventilador como uma variável manipulada totalmente livre. Desse modo, a figura 27 mostra que o seguimento de referência ocorreu

¹ A abertura do damper de ar externo implica no fechamento proporcional do damper de retorno, o que dificulta o retorno de ar, portanto aumenta-se a pressão interna da sala limpa.

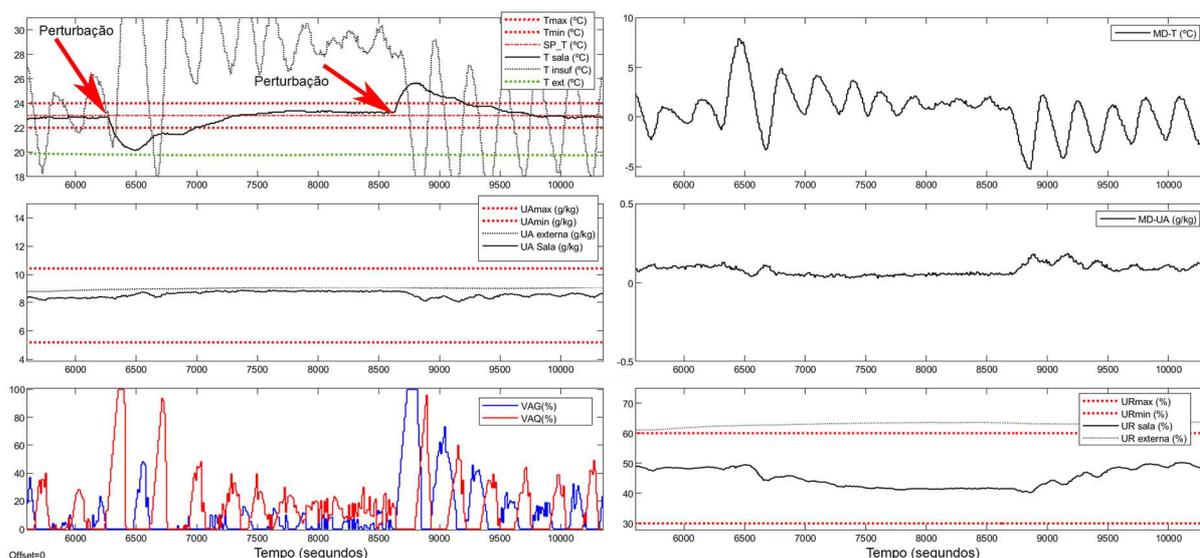
preferencialmente pela atuação do ventilador em detrimento da abertura do Damper de ar externo. A abertura do Damper, conforme já mencionado, permite a entrada de ar do meio externo para a sala limpa, o que é vantajoso para renovação de ar, porém o excesso de abertura perturba as variáveis controladas de umidade e temperatura da sala em um nível não desejado. Quando o ventilador atinge o seu limite máximo, o damper de ar externo inicia o fechamento² com a intenção de levar a variável controlada para a referência.

Após a abertura da porta de acesso da sala como perturbação, verificou-se que não ocorreu um bom seguimento de referência, uma vez que a porta aberta impossibilita o aumento de pressão. Por outro lado, ao retornar a porta de acesso para a posição fechada, houve um sobressinal e dentro de alguns segundos ocorreu o seguimento de referência normalmente.

5.4 COMPORTAMENTO REGULATÓRIO DO CONTROLADOR PREDITIVO COM SINTONIA AGRESSIVA (TESTE 4)

Conforme apresentado na figura 28, após o sistema estabilizar-se no ponto de operação, foram aplicadas perturbações na realimentação da variável controlada de temperatura, com amplitude de -3°C , o que provocou a redução abrupta do valor da variável percebida pelo controlador preditivo. Imediatamente após a aplicação da perturbação percebeu-se a reação das ações de controle no sentido de levar a variável novamente para o setpoint, o que ocorreu após 2000 segundos da aplicação da perturbação. Aproximadamente no instante de tempo $t=8500$ segundos foi retirada a perturbação, o que funcionou como uma aplicação de perturbação de valor oposto, ou seja, $+3^{\circ}\text{C}$. Nesse caso, também após aproximadamente 2000 segundos foi percebida a rejeição da perturbação com o seguimento de referência adequado, porém com um pouco mais de oscilação no sinal da temperatura de insuflamento. Conforme já mencionado, os atuadores empregados na AHU do itt-Chip e o próprio processo termodinâmico possuem um grau de não linearidade que na prática resulta em um desvio entre o modelo linearizado utilizado para predição e o valor efetivo da variável quando ela se afasta do ponto de operação.

Figura 28 – Resultado do comportamento regulatório para a temperatura da sala limpa



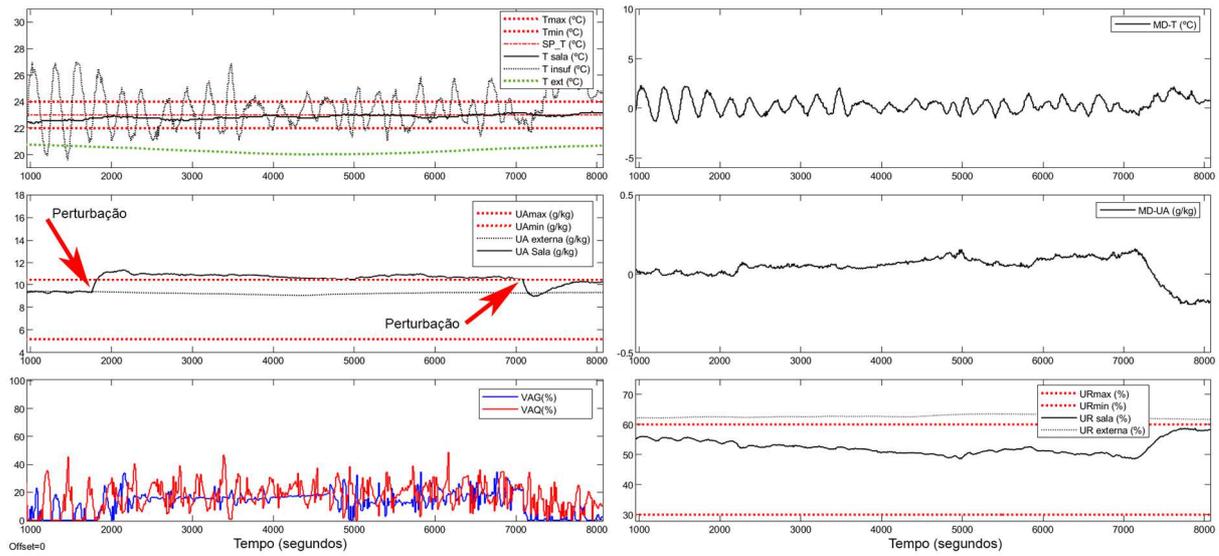
Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

Os resultados da aplicação de perturbação na variável controlada de umidade absoluta são apresentados na figura 29. Aproximadamente no instante de tempo $t=1500$ segundos foi aplicada uma perturbação de amplitude de 2 g/kg na realimentação do controlador preditivo, via software, o que fez com que a variável saísse da faixa de restrições. A partir deste momento as variáveis manipuladas relacionadas a ações de controle de desumidificação (VAG) e aquecimento (VAQ) começaram a operar para retirar a umidade (retirada do calor latente) e reposição do calor sensível, respectivamente, levando a variável controlada para dentro da faixa lentamente, após aproximadamente 3500 segundos do instante da aplicação da perturbação. Percebe-se que a partir do instante em que a variável entra na faixa, ela retorna imediatamente para fora da faixa, por conta do distúrbio medido não compensado pelas ações de controle uma vez que nesse momento a variável possui peso para seguimento de referência igual a zero. Portanto, uma vez que a umidade absoluta externa estiver acima do limite superior da faixa de restrições, a variável controlada deve apresentar esse comportamento, com suaves oscilações sobre a restrição superior, entrando e saindo da faixa.

No instante $t=7000$ segundos foi então removida a perturbação de -2 g/kg, percebendo-se uma perturbação positiva, entretanto nesse momento a variável entrou na faixa de restrições, recebendo peso de seguimento de referência igual a zero. O

movimento percebido pela variável controlada de umidade após a remoção da perturbação corresponde a distúrbios tanto do meio externo quanto distúrbios não medidos provocados pelo sistema de aquecimento.

Figura 29 – Resultado do comportamento regulatório para a Umidade Absoluta da sala limpa



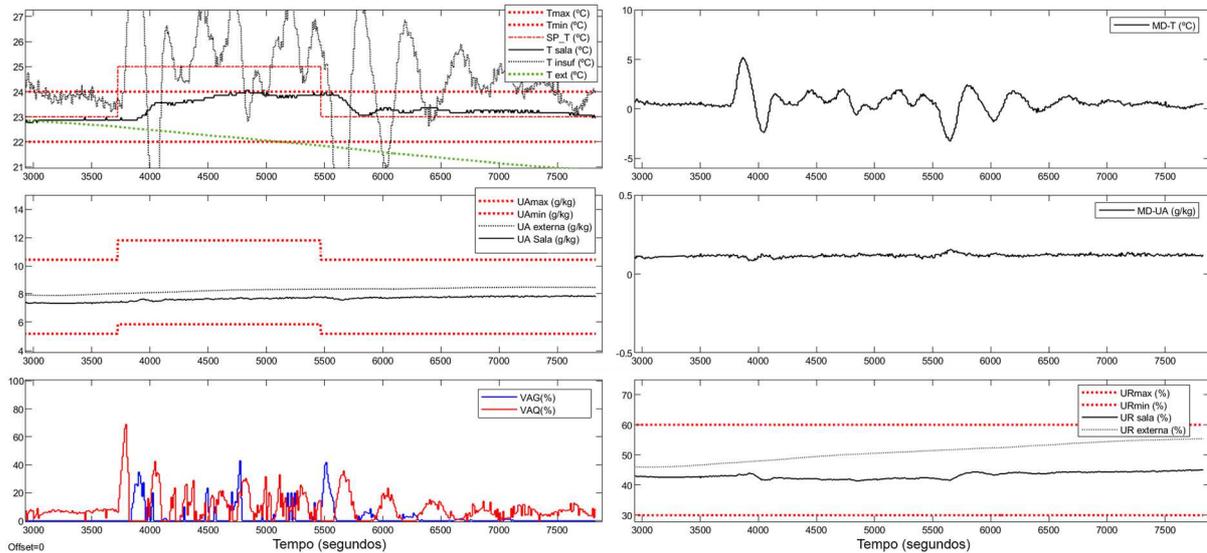
Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

5.5 TESTE DA APLICAÇÃO DE RESTRIÇÕES NO CONTROLE PREDITIVO COM SINTONIA CONSERVATIVA (TESTE 5)

Na figura 30 são apresentados os resultados do ensaio para verificação do respeito às restrições impostas à variável controlada de temperatura do controle preditivo. Fica evidente, no instante de tempo $t=3500$ segundos, o seguimento de referência com pequeno desvio da temperatura de 23°C , e as restrições cadastradas em 24°C (máxima) e 22°C (mínima). Então, no instante de tempo aproximadamente igual a 3750 segundos foi alterada a referência da variável de temperatura para fora da faixa de restrições, ou seja, 25°C . Verifica-se que ao longo desse período, onde a referência de temperatura permaneceu fora da faixa de restrições, que o MPC não permitiu que a variável de temperatura excedesse o valor máximo. Observa-se após o retorno da referência para dentro da faixa restrita um esforço de controle menos expressivo em comparação com o período em que havia maior esforço computacional por parte do MPC para cumprir as especificações de controle. Os valores de sintonia

ligados a suavidade das restrições escolhidos como valores baixos, além da configuração do distúrbio medido de temperatura ligado a temperatura de insuflamento são duas causas principais.

Figura 30 – Dados experimentais do teste de respeito a restrição de temperatura

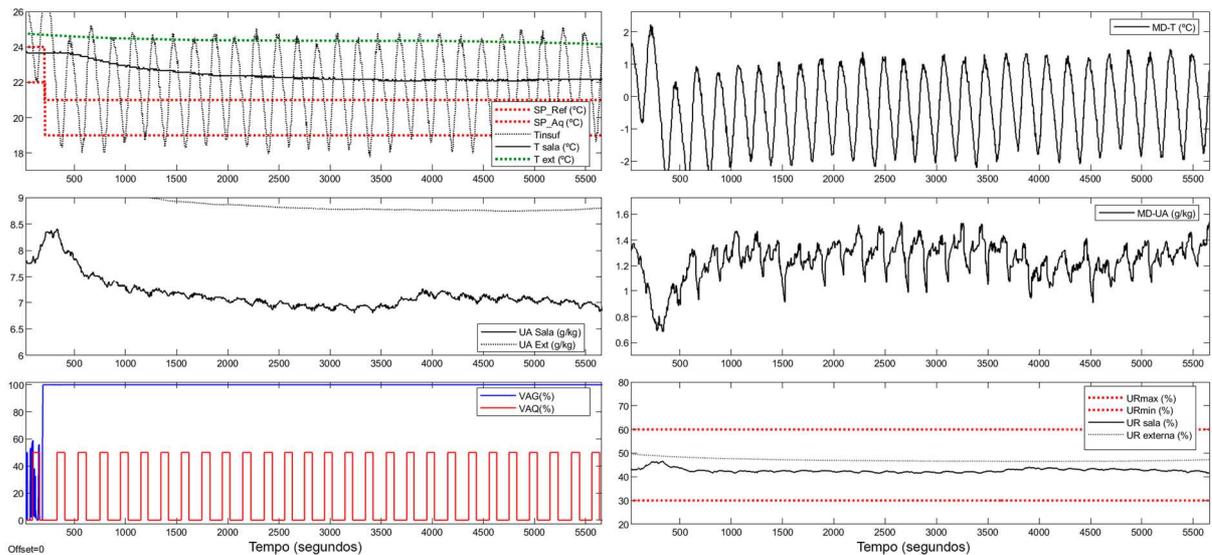


Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados experimentais.

5.6 COMPORTAMENTO SERVO DO CONTROLE PID LEGADO DO ITT-CHIP (TESTE 6)

Os resultados experimentais deste ensaio, apresentados na figura 31 mostram que o sistema de controle PID não possui a capacidade de seguir uma alteração da referência de refrigeração para 21°C. Ao longo do ensaio percebeu-se que a válvula de água quente permanecia em operação de abertura e fechamento, mesmo que neste cenário ela não fosse requerida. Os resultados apresentados mostram um excessivo consumo de energia na tentativa de levar a variável de controle de temperatura para dentro da faixa de referência, contudo o que se percebeu foi uma redução da umidade absoluta. Além disso, o ensaio mostra a importância de levar-se em consideração a Umidade Absoluta no controle em detrimento da Umidade Relativa, uma vez que a umidade relativa permaneceu estável enquanto uma quantidade excessiva de energia era gasta. A consideração da umidade relativa como variável controlada pode ser facilmente mal interpretada especialmente quando há alteração da temperatura em conjunto com a umidade absoluta.

Figura 31 – Resultados do comportamento servo do controle PID legado do itt-Chip



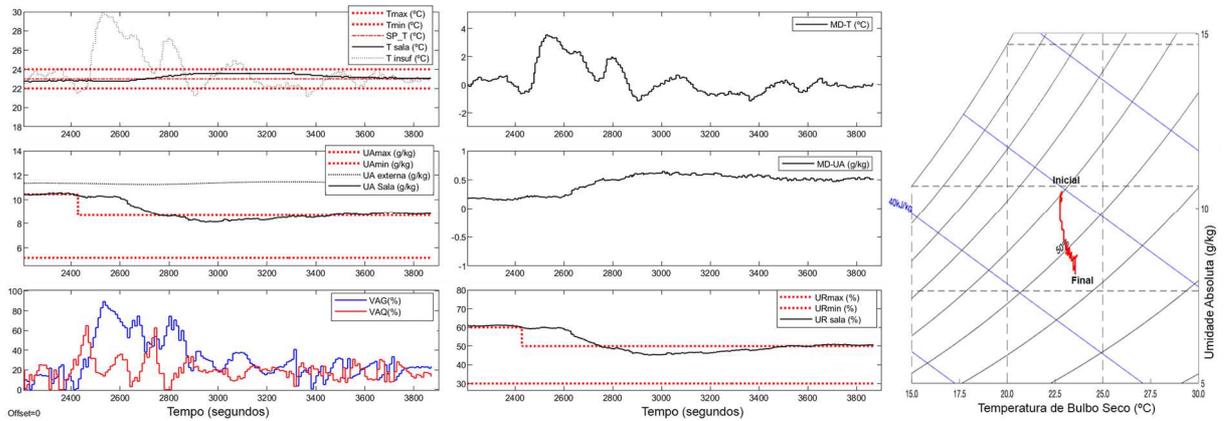
Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

5.7 CENÁRIO 1: PROCESSO DE DESUMIDIFICAÇÃO COM SINTONIA DO MPC AGRESSIVA (TESTE 9)

Os resultados experimentais referentes ao primeiro teste de performance considerando-se o cenário 1 é apresentado na figura 32, cujo objetivo de controle principal é a redução da umidade absoluta da sala limpa ao longo do tempo. Percebe-se a partir dos dados coletados, um desvio sutil da variável controlada de temperatura da sala do seu setpoint, devido ao fato de que o instante em que o controle preditivo iniciou a retirada de umidade através da abertura da válvula de água gelada, as predições indicariam que além de haver a redução da umidade, também haveria a redução da temperatura. A partir de então, o controle preditivo providencia a abertura da válvula de água quente para compensar a redução não desejada do calor sensível do HVAC, porém essa proporção de abertura não foi perfeita, o que indica um erro na predição, e, portanto, um erro relacionado ao modelo da temperatura da sala e a válvula de água quente. Avalia-se, porém, que o desvio foi de baixa amplitude, o que não implica em problemas em termos práticos para a operação do equipamento.

A partir da visão da carta psicrométrica à direita da imagem, verifica-se esse efeito já mencionado, onde o deslocamento no sentido vertical com uma leve curvatura para a esquerda se aproxima em grande parte de um deslocamento vertical ideal, em um processo puro de redução de umidade absoluta.

Figura 32 – Cenário 1: Resposta de Controle MPC de desumidificação com sintonia agressiva



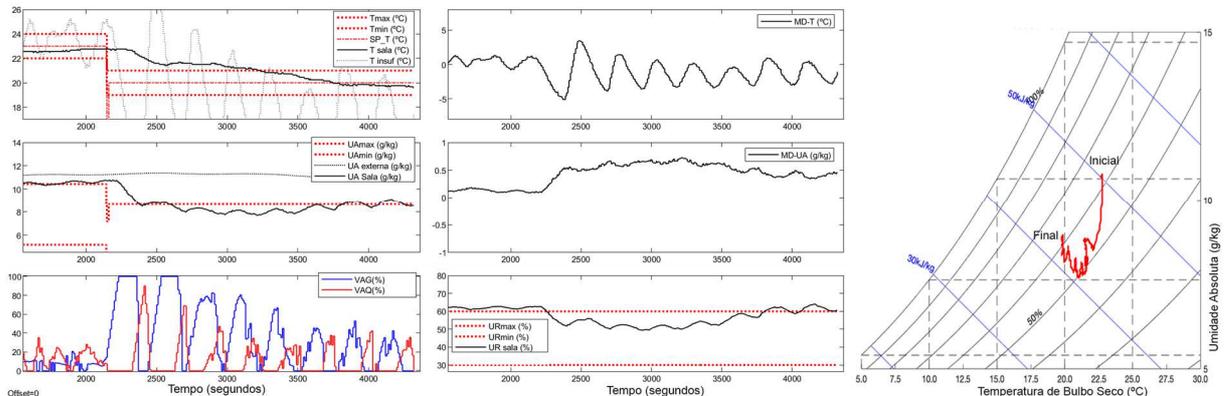
Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

É de extrema importância observar que a redução da umidade absoluta ocorre quando o ar úmido que passa pela AHU entra em contato com superfícies cuja temperatura estão abaixo do ponto de orvalho, ou ponto de saturação. Por esse motivo, há um limite técnico para redução da umidade, ou seja, quando o ponto de saturação do ar na caixa de mistura se aproxima da temperatura da água gelada, a taxa de condensação se aproxima de zero.

5.8 CENÁRIO 2: PROCESSO DE RESFRIAMENTO E DESUMIDIFICAÇÃO COM SINTONIA DO MPC AGRESSIVA (TESTE 10)

O ensaio relacionado ao cenário 2, ou seja, redução da umidade absoluta e temperatura de maneira simultânea, utilizando-se o MPC com sintonia agressiva é apresentado na figura 33. Era esperado como resultado ideal deste teste uma variação da umidade absoluta apenas, com mínima variação da umidade relativa (a diminuição da umidade absoluta e temperatura simultaneamente faz com que a umidade relativa se mantenha estável). Percebeu-se nos dados experimentais, uma redução de umidade absoluta um pouco acima do nível ideal, produzindo também uma pequena variação na umidade relativa. Percebe-se, porém, que a redução da umidade absoluta um pouco acima do necessário tem relação direta no controle da temperatura. Eventualmente, o sistema necessita tirar calor sensível do ar, e não é possível fazê-lo sob estas condições, sem que haja redução também do calor latente.

Figura 33 – Cenário 2: Resposta de Controle MPC no resfriamento e desumidificação com sintonia agressiva



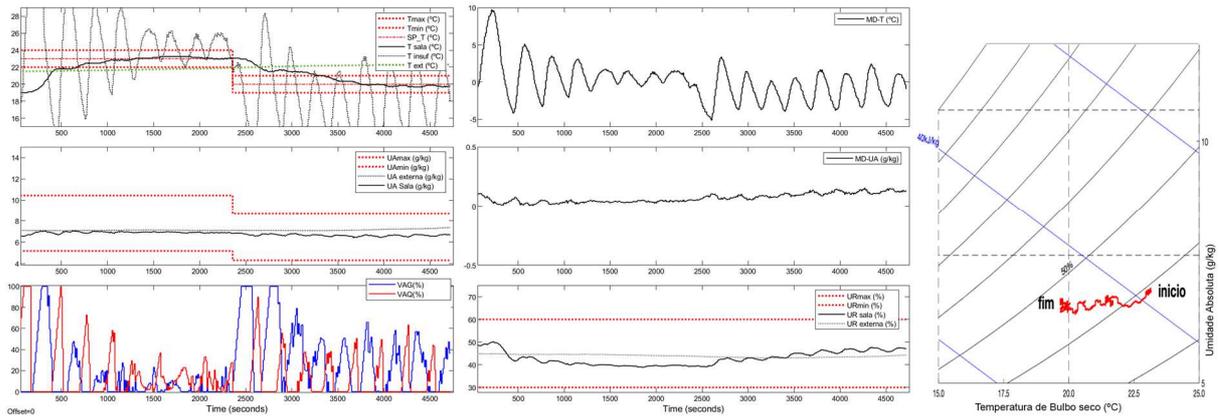
Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

Através do caminho do ponto de operação feito sobre a carta psicrométrica, percebe-se que ocorreu o seguimento da referência com um leve desvio na umidade relativa.

5.9 CENÁRIO 3: PROCESSO DE RESFRIAMENTO SECO COM SINTONIA DO MPC AGRESSIVA (TESTE 11)

Os resultados dos testes de redução da temperatura mantendo-se a umidade absoluta estável são apresentados na figura 34. Percebe-se nos resultados experimentais apresentados que a umidade absoluta se manteve dentro da faixa enquanto a temperatura seguiu a referência, sem impactar de maneira relevante na umidade. A leve redução da umidade ocorreu por conta da abertura da válvula de água gelada para produzir a redução do calor sensível, e, portanto, reduzindo o calor latente. Em um cenário em que a umidade absoluta externa fosse elevada, seria percebido um aumento da umidade absoluta, porém o controle MPC deve reduzir a umidade somente quando as predições indicarem que a umidade irá sair da faixa dentro do horizonte de predição.

Figura 34 – Cenário 3: Resposta de Controle MPC no resfriamento seco com sintonia agressiva



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

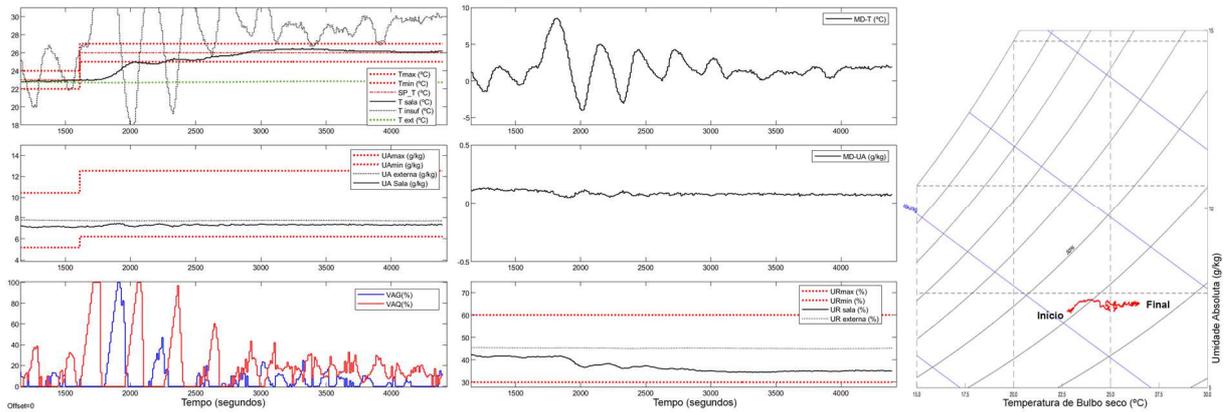
O caminho realizado pelo ponto de operação no plano da carta psicrométrica foi próximo do ideal, ou seja, o ponto de operação deslocou-se para a esquerda (redução da temperatura), com uma pequena redução na umidade absoluta (eixo vertical).

5.10 CENÁRIO 4: PROCESSO DE AQUECIMENTO SECO COM SINTONIA DO MPC AGRESSIVA (TESTE 12)

Os resultados experimentais da mudança da referência da temperatura utilizando-se o MPC com sintonia agressiva são apresentados na figura 34. Fica evidente que ocorre o seguimento de referência da temperatura e uma pequena oscilação na umidade absoluta, por conta do distúrbio provocado pela ação de aquecimento. Percebe-se ainda uma redução da umidade relativa, o que é natural por conta do aquecimento do ambiente. Ao longo da mudança de referência de temperatura, a variável controlada de umidade permaneceu dentro da faixa, e não teve alterações significativas por conta da baixa umidade absoluta externa.

Sob o ponto de vista da carta psicrométrica o caminho percorrido pelo ponto de operação foi próximo ao ideal, ou seja, um caminho horizontal para a direita do diagrama.

Figura 35 – Cenário 4: Resposta de Controle MPC no aquecimento com sintonia agressiva



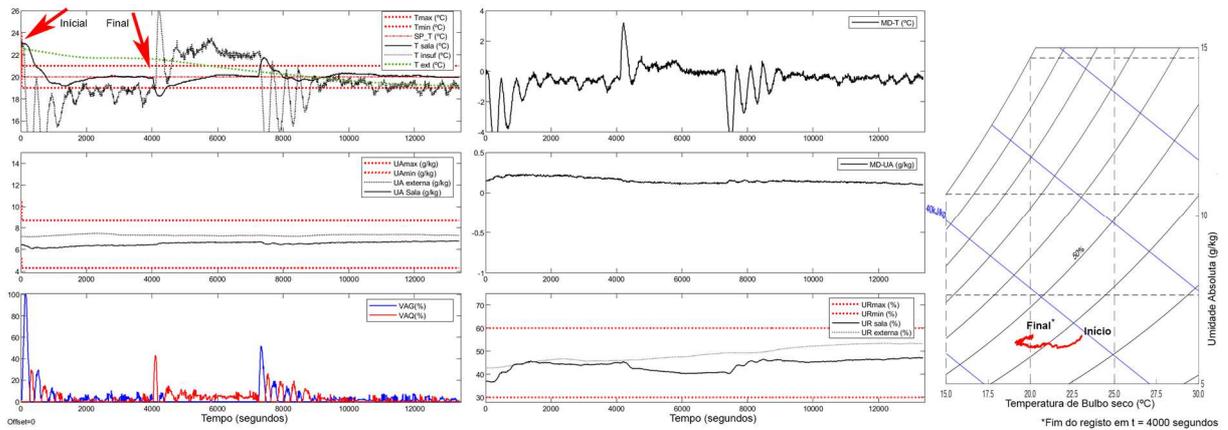
Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

5.11 CENÁRIO 3: PROCESSO DE RESFRIAMENTO SECO COM SINTONIA DO MPC AGRESSIVA (TESTE 13)

É possível observar na figura 36 que os instantes iniciais (indicados pelas setas vermelhas) do ensaio correspondem a alteração de temperatura de 23°C (ponto de operação) para 20°C. Neste ensaio percebe-se um *overshoot* negativo, devido a abertura excessiva da válvula de água gelada na mudança de referência. Esse fato pode ser justificado por conta de um erro no parâmetro de ganho estático da função de transferência que relaciona a válvula de água gelada com a temperatura da sala. Entretanto, apesar do desvio sutil da variável controlada, o sistema de controle fez com que houvesse seguimento de referência nos instantes subsequentes.

O caminho realizado pelo ponto de operação na carta psicrométrica indica o desvio evidente na resposta temporal. A redução na umidade absoluta nos primeiros instantes indica a perda de calor latente por conta da ação de controle da válvula de água gelada, mesmo que a variável de umidade absoluta estivesse dentro da faixa de restrições.

Figura 36 – Cenário 3: Teste da redução da temperatura utilizando-se MPC com sintonia conservativa

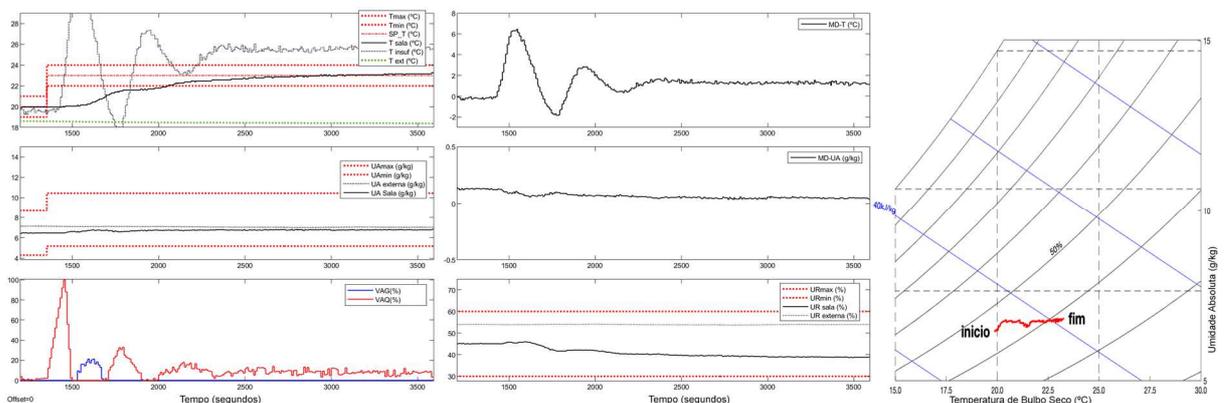


Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

5.12 CENÁRIO 4: PROCESSO DE AQUECIMENTO SECO COM SINTONIA DO MPC CONSERVATIVA (TESTE 14)

Na figura 37 é apresentado o resultado experimental do aumento de referência de temperatura utilizando-se MPC com sintonia conservativa. Percebe-se o aumento gradual da temperatura da sala, ao mesmo tempo que ocorre uma oscilação da temperatura de insuflamento. Devido ao fato de que o distúrbio medido está diretamente relacionado com a temperatura de insuflamento, é esperado certo nível de oscilação na variável de temperatura no instante em que ocorrem mudanças de referência.

Figura 37 – Cenário 4: Teste de aumento da temperatura utilizando-se MPC com sintonia conservativa



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

Do ponto de vista do deslocamento do ponto de operação no plano da carta psicrométrica, verifica-se que houve um deslocamento para a direita, de maneira próxima ao ideal, com uma pequena oscilação no eixo da Umidade Absoluta por conta das ações de controle e perturbações geradas ao longo do processo de controle da variável de temperatura.

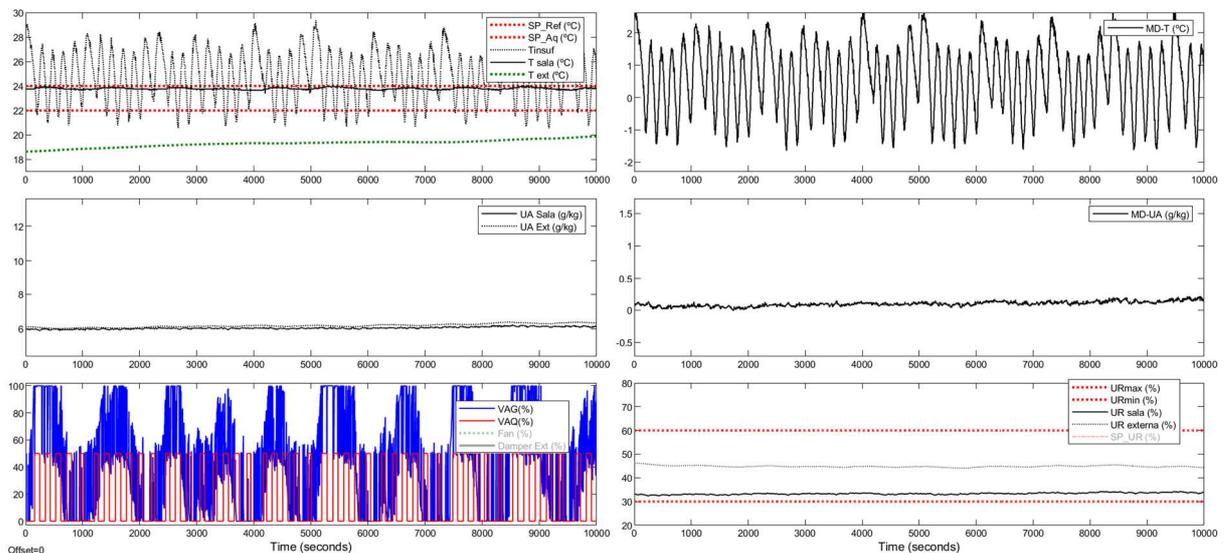
5.13 ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA DO MPC COM SINTONIA CONSERVATIVA (TESTE 8)

Conforme apresentado na seção 4.5, foram obtidos os valores do indicador de consumo energético ECI, separando-se as parcelas correspondentes ao sistema térmico, e a parcela correspondente ao erro de seguimento de referência. Essa estratégia foi importante para avaliar o impacto de cada uma das parcelas no indicador, e por consequência, avaliar com maior profundidade onde o controle preditivo se destaca sobre o controle PID legado, em termos do ECI.

Na figura 38 são apresentados os resultados experimentais do comportamento das variáveis do sistema controlado pelo controle PID legado do itt-Chip. Verifica-se visualmente o nível elevado de abertura das válvulas, mesmo em um cenário de umidade externa baixa, o que produz uma perda em um nível elevado. O seguimento de referência do sistema de controle PID legado cumpre o especificado, mantendo as variáveis dentro das faixas nas quais foi projetado.

Na figura 39 são apresentados os resultados experimentais da aplicação do controlador preditivo com sintonia conservativa. Assim como apresentado na síntese do controle preditivo, o MPC está configurado para controlar a variável de umidade absoluta por faixas, enquanto a variável de temperatura da sala possui um setpoint fixo. Percebe-se, portanto, o seguimento da referência das variáveis ao longo do intervalo de duração do teste, sem desvios, com a utilização de energia em um nível extremamente baixo, se comparado com o controle PID.

Figura 38 – Amostra de dados experimentais do sistema HVAC em regime permanente com controle PID legado

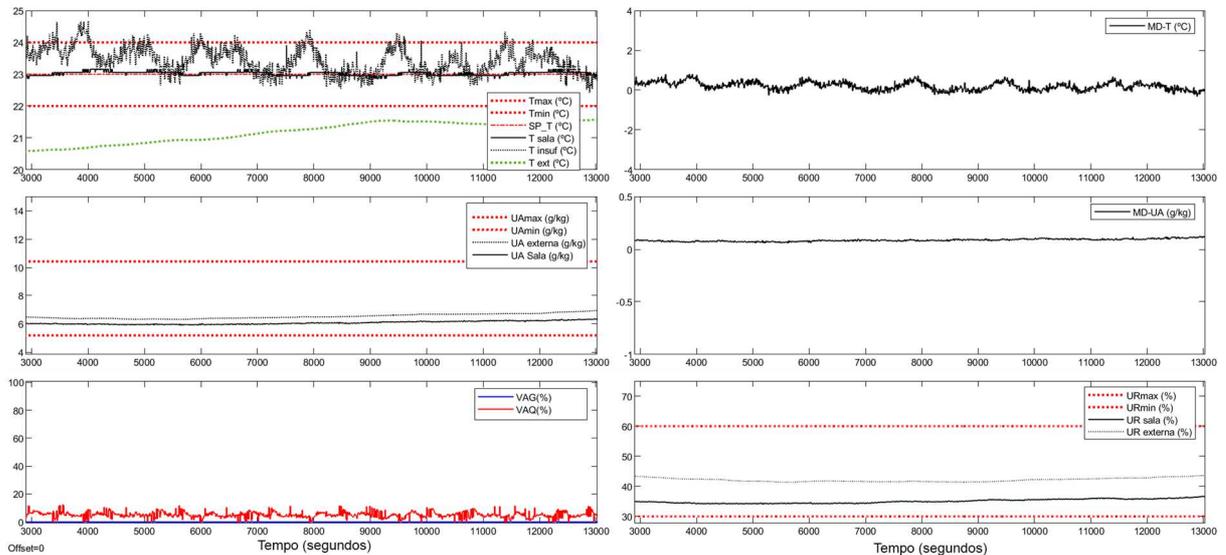


Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

Ao realizar os testes em ambos os controladores, foi possível obter-se o indicador de consumo de energia em ambos, e então gerar os resultados graficamente em forma de *Benchmark*, conforme apresentado na figura 40. Devido ao fato de que no sistema de controle PID legado as variáveis estiveram dentro da faixa para as quais o controlador foi projetado, a parcela relacionada com o erro das variáveis do sistema térmico (erro de Temperatura e Umidade absoluta) não foi apresentada. Uma vez que a divisão dos elementos do indicador ECI do controle preditivo por zero resulta em um valor infinito, não foi possível avaliar essa parcela. É possível verificar que a parcela correspondente ao erro de seguimento de referência é responsável pelo maior impacto no aumento do indicador, enquanto as parcelas relacionadas ao sistema térmico (malhas de controle de temperatura e umidade) são responsáveis pelo maior impacto na redução do indicador. Para obtenção de cada uma das parcelas do indicador apresentadas na figura 40 foram utilizados os sinais apresentados na figura 22.

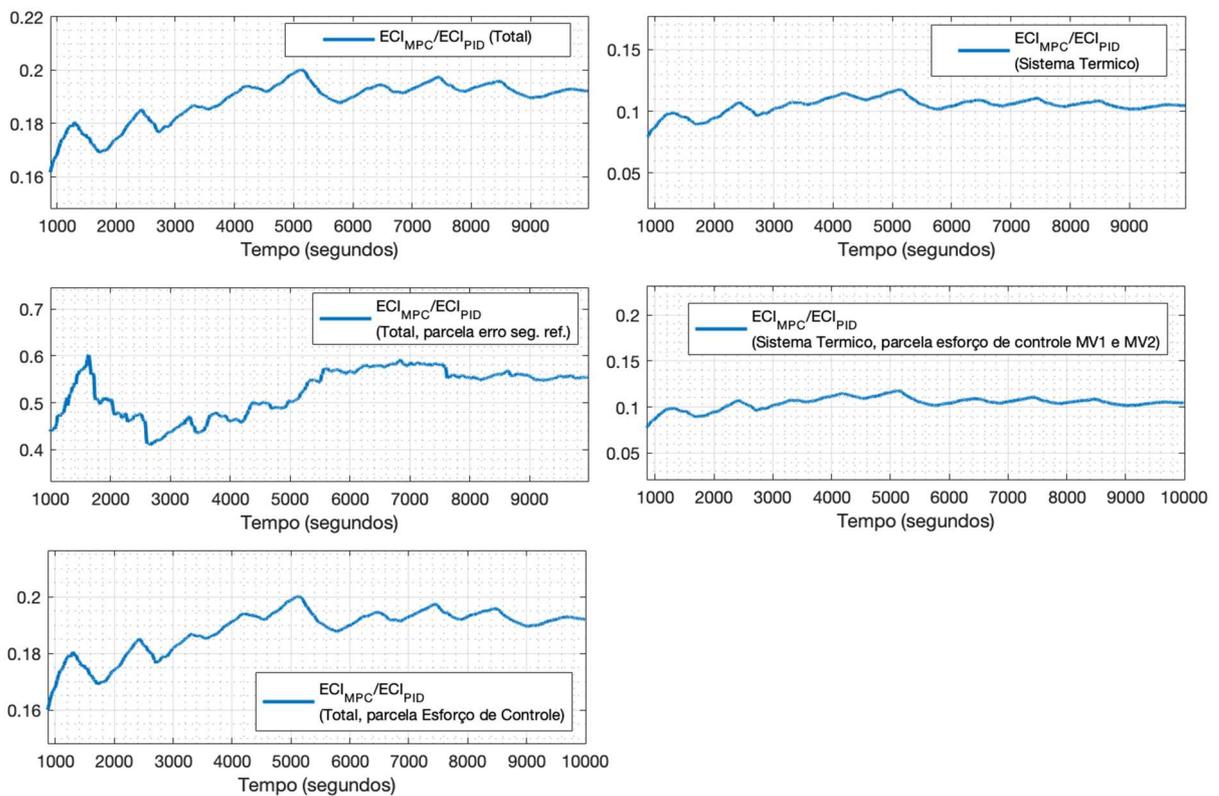
Verifica-se, portanto, que a aplicação do controlador preditivo com sintonia conservativa leva larga vantagem sobre o controle PID legado, fato comprovado observando-se a abertura das válvulas, e o *Benchmark* limitando-se em 0,2, ou 20% do ECI relacionado ao controle PID do itt-Chip.

Figura 39 – Dados experimentais do sistema HVAC em regime permanente com controle preditivo com sintonia conservativa



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

Figura 40 – Evolução da razão entre o indicador ECI do controle preditivo e o indicador do controle PID legado (*Benchmark*)

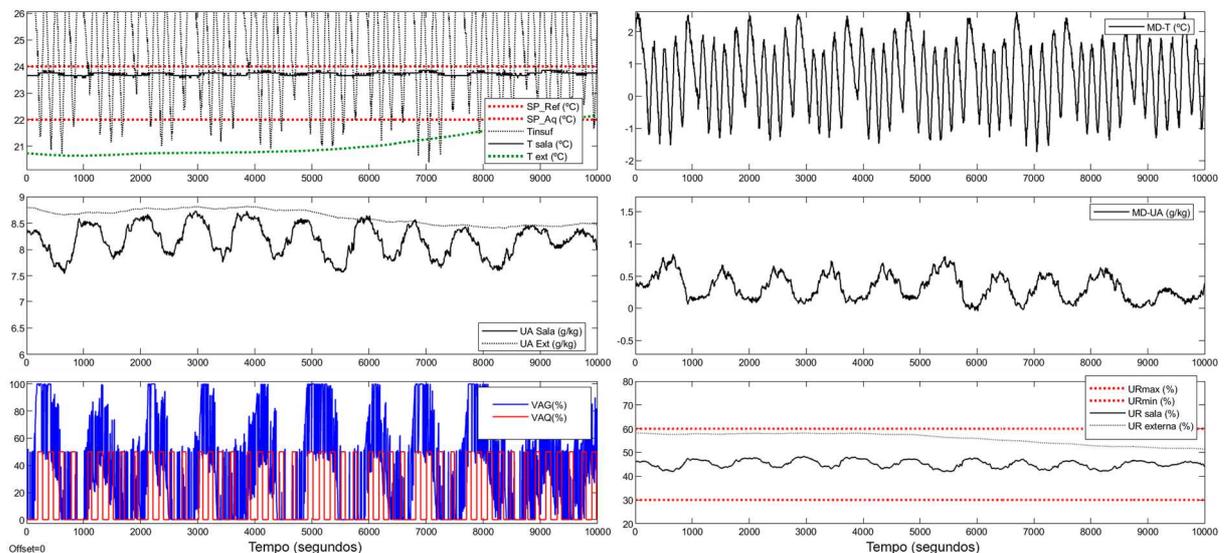


Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

5.14 ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA DO MPC COM SINTONÍA AGRESSIVA (TESTE 7)

Ao sintonizar-se o controlador preditivo com uma sintonia agressiva (figura 42), em comparação com o sistema de controle PID legado do itt-Chip apresentado na figura 41, ainda são percebidos ganhos em termos de abertura de válvulas, porém neste caso a agressividade gera mais oscilações na temperatura de insuflamento. Em termos de seguimento de referência, tanto o controlador preditivo com sintonia agressiva quanto o controlador PID legado obtiveram sucesso ao longo do ensaio, cumprindo as especificações de projeto. Porém a partir dos dados experimentais se observa um excessivo esforço de controle por parte do controle PID, provocando oscilações desnecessárias na temperatura e umidade da sala limpa.

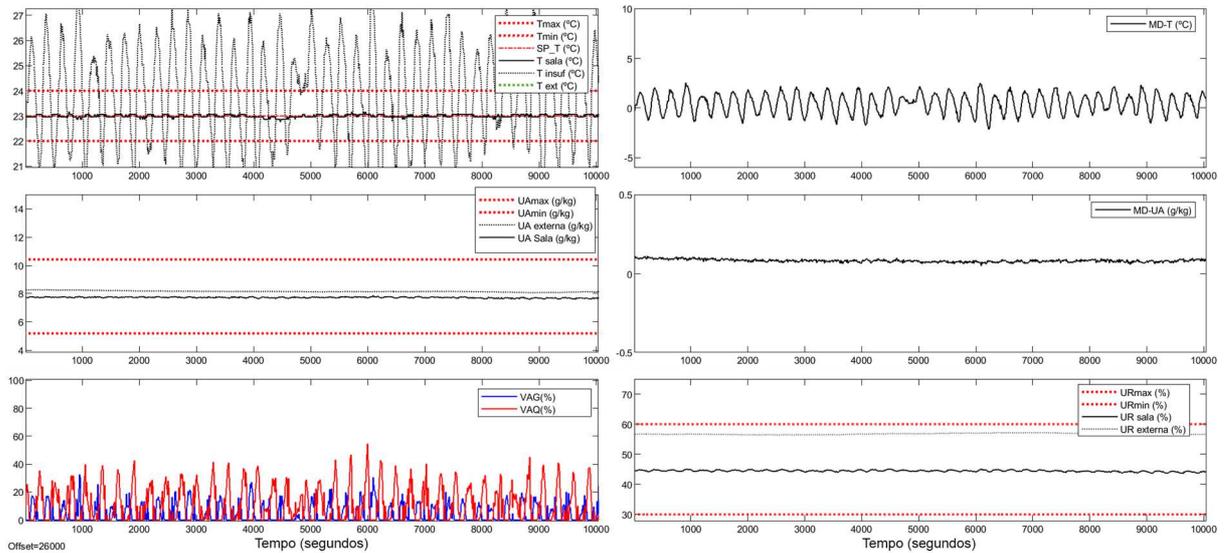
Figura 41 – Amostra de dados experimentais do sistema de controle PID legado em regime permanente



Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados experimentais.

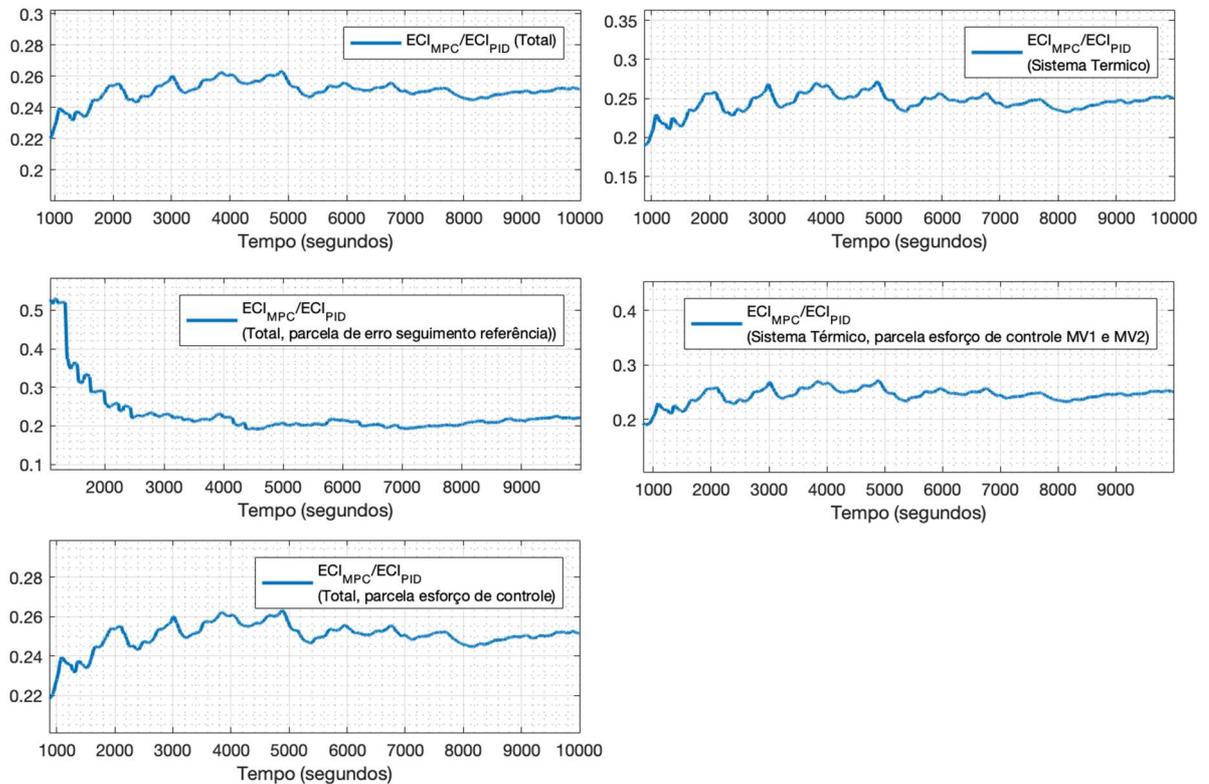
A razão entre os indicadores ECI obtidos a partir do controle preditivo com sintonia agressiva e os indicadores obtidos a partir do controle PID, são apresentados na figura 43. Percebe-se, portanto um aumento na relação do indicador do consumo de energia do controle preditivo sintonizado agressivamente, como era esperado, de qualquer forma, foram registrados ganhos expressivos na aplicação do controlador MPC.

Figura 42 – Dados experimentais do sistema HVAC em regime permanente com controle preditivo com sintonia agressiva



Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados experimentais.

Figura 43 – Evolução da razão entre o indicador ECI do controle preditivo e o indicador do controle PID legado (*Benchmark*)



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

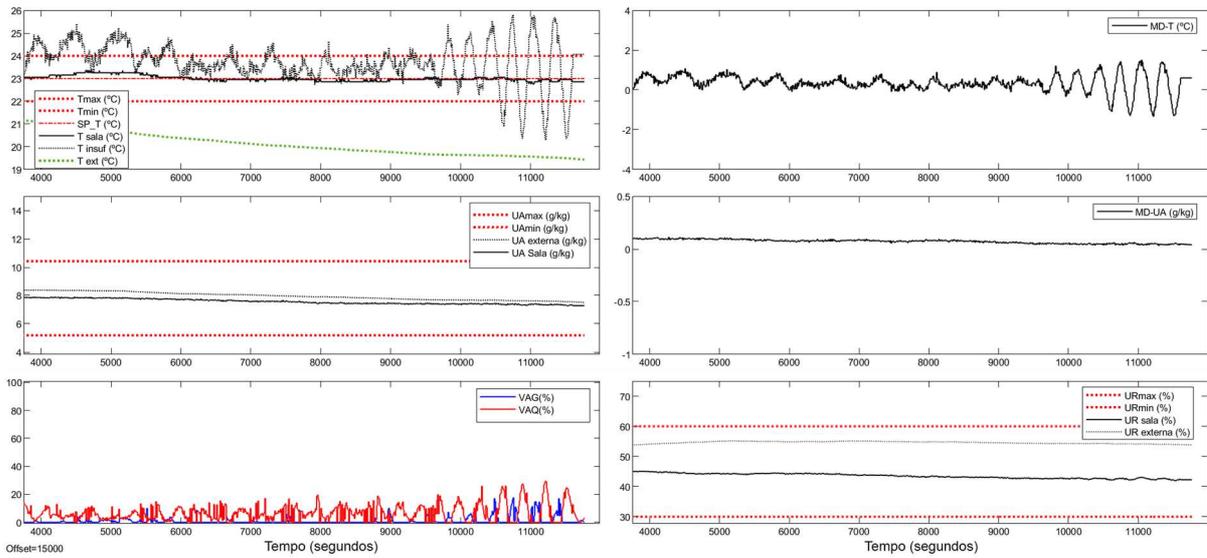
É possível verificar que a parcela correspondente ao erro de seguimento de referência é responsável pelo maior impacto na redução do indicador, e isso se deve ao fato que, com o controlador agressivo, a integral do erro de seguimento de referência do controle MPC ao longo do tempo é menor. Para obtenção de cada uma das parcelas do indicador apresentadas na figura 43 foram utilizados os sinais apresentados na figura 22.

5.15 CONSIDERAÇÕES SOBRE A SINTONIA DO CONTROLADOR PREDITIVO

Ao longo do processo de ajuste de sintonia do controlador preditivo foram observados comportamentos relevantes para registros de contribuições deste trabalho. Os pesos que impactam diretamente na agressividade de resposta do controle preditivo são o peso de seguimento de referência das variáveis controladas, w^y , e o peso de seguimento de referência das variáveis manipuladas, w^u . Portanto, no caso da aplicação do itt-Chip da Unisinos, em alguns casos o sistema de controle em malha fechada pode demonstrar instabilidade por conta da utilização do peso w^y muito elevado, o que colocaria mais importância no seguimento de referência em detrimento do consumo de energia. Na figura 44 é apresentado o experimento com pesos elevados em w^y (ajuste conservativo, com w_1^y ajustado em 2000), onde ocorre a instabilidade na temperatura de insuflamento. Isso ocorre devido ao fato de que a temperatura de insuflamento está relacionada com o distúrbio medido. Quando os pesos w^y estão elevados, o controle MPC dá preferência para as variáveis com peso elevado, podendo levar o sistema a reações abruptas, causando mudança brusca na temperatura de insuflamento e por consequência, no distúrbio medido. A tentativa de corrigir o distúrbio, causado pela reação brusca do controlador é o que causa a instabilidade.

Além disso, foram percebidos pontos positivos em ambas as formas de ajuste (conservativa e agressiva). A estratégia de ajuste conservativa permitiu um menor esforço de controle e conseqüentemente, um melhor resultado em termos da razão do indicador ECI apresentado nas seções 5.13 e 5.14. Por outro lado, é esperada uma reação mais lenta no seguimento de referência e rejeição de perturbações.

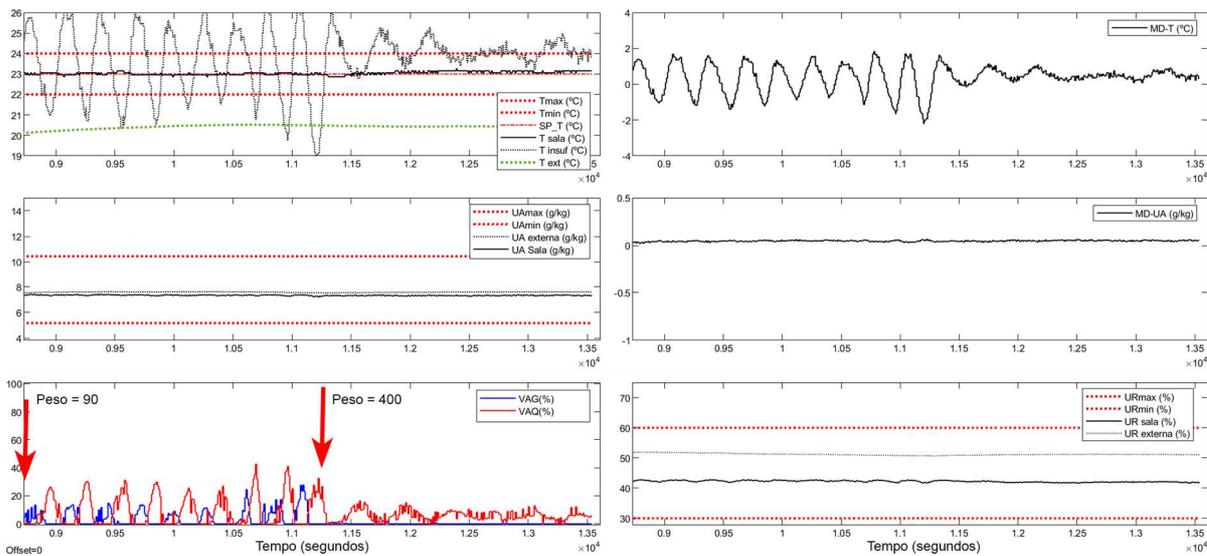
Figura 44 – Efeito da aplicação de peso w^y elevado na temperatura da sala



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

Conforme apresentado na figura 45, o aumento dos pesos w_1^u e w_2^u , ou seja, as válvulas de água gelada e água quente, resultam em um nível menor de abertura das válvulas, uma vez que a partir do aumento dos pesos para 400, o otimizador passa a dar uma maior importância no seguimento da referência nas variáveis controladas, cujos *targets* são iguais a zero, levando-as para um valor mais próximo da referência.

Figura 45 – Resultado experimental do aumento de peso w^u das válvulas de água quente e gelada



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

Ao final deste capítulo foram abordados os seguintes tópicos:

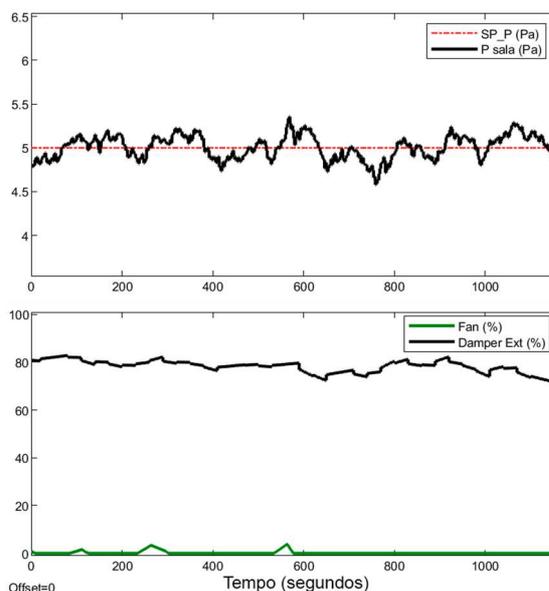
- Testes do comportamento servo e regulatório do MPC com sintonia conservativa e com sintonia agressiva, para as variáveis controladas de temperatura e umidade absoluta;
- Testes do comportamento servo e regulatório do MPC para a variável controlada de pressão interna da sala limpa;
- Testes de perturbações baseadas em quatro cenários de processos psicrométricos de desumidificação, resfriamento com desumidificação, resfriamento seco e aquecimento seco utilizando MPC com sintonia agressiva;
- Testes de perturbações baseadas em dois cenários de processos psicrométricos de resfriamento seco e aquecimento seco utilizando MPC com sintonia conservativa;

6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação à avaliação do controlador preditivo em termos de performance de mudanças de referências, pode-se concluir que a aplicação do controlador atende de maneira satisfatória o seguimento de referência e rejeição de perturbações das variáveis de temperatura, umidade e pressão interna do ambiente controlado. Também, como uma das principais vantagens na aplicação dessa estratégia avançada de controle, a aplicação do controlador se apresentou extremamente vantajosa para restringir as variáveis controladas dentro dos valores seguros para as instalações e a saúde das pessoas que ocupam a sala do instituto. Além disso, a avaliação dos resultados através da observação do caminho do ponto de operação na carta psicrométrica possibilitou a avaliação mais detalhada e precisa sobre desvios e ineficiência do sistema nesses cenários.

Com relação aos testes relacionados ao controle de pressão ambiente da sala, pode-se concluir que o controlador preditivo atende as especificações de projeto elevando o nível da obtenção da lei de controle para outro patamar. Isso é justificado diante da capacidade que o controlador preditivo possui de seguir valores de objetivo das variáveis manipuladas (*targets*) podendo desta forma estabelecer-se um valor ideal para abertura do damper, de modo a apenas garantir a renovação de ar do ambiente. Conforme mencionado ao longo deste trabalho, a abertura do Damper em excesso permite o aumento dos distúrbios através da entrada do ar externo na AHU, fazendo com que o controle tenha que compensar distúrbios sem necessidade, e assim, desperdiçando energia. Portanto, do modo como foi configurado o MPC neste projeto, foi possível atingir o controle da pressão de ar do ambiente, com o mínimo distúrbio, podendo-se permitir a abertura do damper externo acima do *target* desde que o outro atuador atinja sua capacidade máxima de atuação. Na figura 46 são apresentados os dados experimentais que mostram a forma com a qual o controle legado mantém a variável de pressão interna na sua referência: utilizando o damper de ar externo prioritariamente, e deste modo, aumentando o nível de distúrbios no sistema.

Figura 46 – Controle de pressão da sala limpa a partir do controle legado PID



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados experimentais.

Conforme apresentado na seção de análise de resultados, a aplicação do controlador preditivo no itt-Chip da Unisinos, conforme estabelecido na seção 4, resulta em uma redução no indicador de consumo energético em torno de 80% se sintonizado agressivamente e em torno de 90% se sintonizado de forma conservativa, considerando-se apenas as variáveis controladas de umidade e temperatura, e as variáveis manipuladas de válvula de água gelada e válvula de água quente, em um cenário de regime permanente. Os resultados da aplicação dos indicadores, portanto, mostram a elevada economia de energia possível com a aplicação dessa estratégia de controle, mesmo que com uma sintonia agressiva. É importante salientar que a sintonia do controlador PID legado não fez parte do escopo deste trabalho, contudo é possível que o desenvolvimento de um projeto de melhoria da sintonia das malhas de controle PID traga ao menos uma pequena parcela de melhoria nos níveis de consumo energético.

Observando-se os resultados gerais comparando-se ambas as formas de sintonia, pode-se concluir que a sintonia agressiva atende aos requisitos de controle em termos de performance de maneira mais eficiente, porém a sintonia conservativa resulta em um nível de eficiência ainda mais expressivo. A utilização da sintonia conservativa como modo de maior eficiência em conjunto com a sintonia agressiva em cenários onde se requer uma maior performance, se mostra como uma alternativa

para se extrair os maiores proveitos possíveis do controlador preditivo. Para efetivar a utilização do controlador MPC com sintonia conservativa em todos os cenários, será necessário submeter o controlador MPC sob este ajuste em cenários onde a umidade externa esteja em níveis mais elevados, de modo a garantir que o controlador irá abrir a válvula de água gelada em um nível capaz de produzir uma taxa de condensação suficiente para redução da umidade absoluta no interior da sala. Uma forma de configuração possível para o MPC é a aplicação programada da sintonia agressiva quando a umidade está fora da faixa (por exemplo, no período de verão), e a aplicação programada da sintonia conservativa quando a umidade absoluta estiver dentro da faixa (por exemplo, no período de inverno).

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Com relação ao parâmetro de número de trocas de ar da sala limpa, o que é de grande importância na operação do sistema HVAC de modo a atender os padrões de concentração de partículas descritos neste trabalho, o controle preditivo apresenta condições de comportar uma parcela da função custo dedicada ao cumprimento desta especificação. Para isso, será necessária a implementação de um instrumento do tipo tubo de pitot no duto de insuflamento, e assim acrescentar uma variável controlada: A vazão de ar insuflado. Apesar desta possibilidade de melhoria percebida no sistema, percebe-se que a infraestrutura atual do itt-Chip permitiria estabelecer *targets* para as variáveis manipuladas de modo a que seja possível atingir o número de trocas desejado.

Uma alternativa com grande potencial de contribuições é a aplicação de um método de estimação da concentração de partículas em função das fontes geradoras de partículas (pessoas, equipamentos, etc.). Essa estratégia pode ser desenvolvida via processamento de imagem, ou um novo método de medição alternativo aos métodos atualmente utilizados.

O desenvolvimento deste MPC como um controle em nível de processo abre inúmeras possibilidades e alternativas para implementação do controlador preditivo em uma arquitetura de controle que esteja em um nível acima do controle local. Desta forma, um processo de otimização global seria capaz de encontrar as leis de controle para todos os HVACs simultaneamente, obtendo resultados possivelmente ainda mais expressivos. Além disso, a implementação de um controle preditivo em nível global

possibilitaria a medição do consumo energético e a economia efetiva atingida de maneira mais exata.

Em virtude da complexidade e das não-linearidades do modelo fenomenológico do processo de controle de salas limpas, existe um grande potencial de contribuições envolvendo a análise da aplicação de um controle preditivo com modelos não lineares. Os modelos não lineares poderiam ser obtidos com a utilização de softwares específicos ou outras estratégias de estimação de parâmetros das equações diferenciais derivadas das relações de transferência de calor e massa do sistema. Com base nos resultados extraídos deste trabalho, e na revisão bibliográfica realizada, é possível que existam melhorias nos resultados em termos de performance e economia de energia, em virtude da aplicação de modelos mais fiéis ao comportamento real da planta.

A implementação desenvolvida ao longo deste trabalho, apesar de apresentar um potencial expressivo de economia, não se apresenta como uma solução definitiva para o caso das salas limpas do itt-Chip. Para implementação em campo, fora de um ambiente de laboratório como foi realizado, seria necessário repensar a estrutura de controle, implementando redundâncias e desenvolvendo um novo projeto de controle com estes objetivos desde sua concepção. Por conta disso, o presente trabalho contribui enormemente como ponto de partida para o desenvolvimento de uma solução de engenharia a ser aplicada no instituto, ou para novos trabalhos relacionados.

REFERÊNCIAS

- ABDO-ALLAH, Almahdi; IQBAL, Tariq; POPE, Kevin. Modeling and Analysis of an HVAC System for the S.J. Carew Building at Memorial University. 2017, St. John's, NL, Canada: [s.n.], 2017. p. 8–11.
- AFRAM, Abdul; JANABI-SHARIFI, Farrokh. Gray-box modeling and validation of residential HVAC system for control system design. *APPLIED ENERGY*, v. 137, p. 134–150, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.026>>.
- ANDERSON, Michael *et al.* MIMO robust control for HVAC systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 16, n. 3, p. 475–483, 2008.
- ÅSTRÖM, Karl Johan; HAGGLUND, Tore. *Advanced PID Control*. [S.l.]: ISA - Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. Disponível em: <[http://www.control.lth.se/media/Education/DoctorateProgram/2013/APID/Interaction eight.pdf](http://www.control.lth.se/media/Education/DoctorateProgram/2013/APID/Interaction%20eight.pdf)>.
- BAKHTIAR, T.; HARA, S. Tracking performance limits for SIMO Discrete-Time Feedback Control Systems. *SICE Annual Conference*, v. 2, p. 1825–1830, 2004.
- BAO-CANG, Ding. *Modern Predictive Control*. [S.l.: s.n.], 2009. Disponível em: <<http://www.crcnetbase.com/doi/book/10.1201/9781420085310>>.
- BARBOSA, Rogério Marcos. *Simulação de Sistemas de Climatização Combinada à Simulação Higrótérmica de Edificações*. 2006. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2006.
- BARBOSA, Rogério Marcos; MENDES, Nathan. Dynamic Simulation of Fan-Coil Systems. *Proceedings of COBEM*, v. 189, 2003.
- BÉGUERY, Patrick *et al.* Multi-zone reduced building models automated generation for district simulation. *Proceedings of BS2015: 14th Conference of the International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, 7-9th December*, p. 1790–1797, 2015.
- BERGMAN, Theodore L. *et al.* *Introduction to Heat Transfer*. 6ª edição ed. [S.l.: s.n.], 2011.
- BUTCHER, Ken; YARHAM, Robert. *Building control systems*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2000.
- CAMACHO, Eduardo F.; BORDONS, Carlos. *Model Predictive Control*. [S.l.: s.n.], 1999.
- CAMPOS, Mario Cesar M. Massa De; GOMES, Marcos Vinicius de Carvalho; PEREZ, José Manuel Gonzalez Tubio. *Controle Avançado e Otimização na indústria do Petróleo*. 1a edição ed. [S.l.: s.n.], 2013.
- CASTELLANOS MOLINA, L.M.; VEGA LARA, B.G.; MONTEAGUDO YANES, J.P. Model identification of a tropical hotel suite room. *2014 3rd International Congress of Engineering Mechatronics and Automation, CIIMA 2014 - Conference Proceedings*, p. 1–5, 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6983435/>>.

- CASTRO, José De. *Website da Disciplina de Fenômenos de Transporte - UNIVASF*. Disponível em: <<http://www.univasf.edu.br/~castro.silva/disciplinas/FT/fenomenos.html>>. Acesso em: 1 jan. 2018.
- CHEN, Jie; HARA, Shinji; CHEN, Gang. Best tracking and regulation performance under control effort constraint: Two-parameter controller case. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, v. 15, n. 1, p. 497–502, 2002.
- CLARKE, D. W.; MOHTADI, C.; TUFFS, O. S. Generalized predictive control Part I. The basic algorithm. *Automatica*, v. 23, n. 2, p. 137–148, 1987.
- CLARKE, Joe A. *Energy simulation in building design*. 2º edição ed. [S.l.: s.n.], 2001.
- CUTLER, C. R.; RAMAKER, B. L. Dynamic Matrix Control - a computer control algorithm. 1980, San Francisco: [s.n.], 1980.
- DOBBS, Justin R; HENCEY, Brandon M. Predictive HVAC Control Using a Markov Occupancy Model. 2014, [S.l.: s.n.], 2014. p. 1057–1062.
- FERNANDES, Raimundo Fernandes de Oliveira; KINOSHITA, Masatugu. *Leitura da carta psicrométrica - Animação em Flash*. . [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://youtu.be/hmDRHhjHliY>>. , 2011
- FREIRE, Roberto Z.; OLIVEIRA, Gustavo H C; MENDES, Nathan. Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings. *Energy and Buildings*, v. 40, n. 7, p. 1353–1365, 2008.
- GATLEY, Donald P. *Understanding Psychrometrics*. 3a ed. ed. [S.l.]: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013.
- GIORGETTI, Marcius Fantozzi. *Fundamentos de fenômenos de transporte para estudantes de engenharia*. 1a edição ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/book/9788535271652>>.
- GONZÁLEZ, Alejandro H.; ODLOAK, Darci. A stable MPC with zone control. *Journal of Process Control*, v. 19, n. 1, p. 110–122, 2009.
- HARIHARAN, Natarajkumar; RASMUSSEN, Bryan P. Parameter estimation for dynamic HVAC models with limited sensor information. *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, p. 5886–5891, 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5531211/>>.
- HAUGEN, Finn. *PID Control*. [S.l.: s.n.], 2004.
- KARMACHARYA, S. *et al*. Thermal modelling of the building and its HVAC system using Matlab/Simulink. *2nd International Symposium on Environment Friendly Energies and Applications, EFEA 2012*, p. 202–206, 2012.
- KELMAN, Anthony; BORRELLI, Francesco. *Bilinear model predictive control of a HVAC system using sequential quadratic programming*. [S.l.]: IFAC, 2011. v. 18. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03811>>.

- KELMAN, Anthony; MA, Yudong; BORRELLI, Francesco. Analysis of local optima in predictive control for energy efficient buildings. *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, n. April, p. 5125–5130, 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6161498/>>.
- KWADZOGAH, Roger; ZHOU, Mengchu; LI, Sisi. Model Predictive Control for HVAC Systems - A Review. 2013, [S.l.: s.n.], 2013. p. 442–447.
- LAHRECH, R *et al.* Simulation Models for Testing Control Systems for Hvac Applications. *Building Simulation*, p. 1225–1232, 2001.
- LEE, Kevin; ZHENG, Kyle. Energy Saving HVAC System Modeling and Closed Loop Control in Industrial and Commercial Adjustable Speed Drives. p. 1286–1292, 2014.
- LI, Pengfei *et al.* Recent advances in dynamic modeling of HVAC equipment. Part 2: Modelica-based modeling. *HVAC and R Research*, v. 20, n. 1, p. 150–161, 2014.
- LIPTAK, Bela G. *Instrument Engineer's Handbook - Process Control and Optimization, Vol.2.* 4th editio ed. [S.l.: s.n.], 2005.
- LJUNG, Lennart; GLAD, Torkel. *Modeling of dynamic systems.* [S.l.: s.n.], 1994.
- MAASOUMY, Mehdi; SANGIOVANNI-VINCENTELLI, Alberto. Total and Peak Energy Consumption Minimization of Building HVAC Systems Using Model Predictive Control. *IEEE Design & Test of Computers*, v. 29, n. 4, p. 26–35, 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6213589/>>.
- MACIEJOWSKI, Jan Marian. *Predictive control: with constraints.* [S.l.]: Pearson Education, 2002.
- MAŘÍK, Karel *et al.* Advanced HVAC Control : Theory vs . Reality. *18th IFAC World Congress*, p. 3108–3113, 2011.
- MARTINELLI, Luiz Carlos. *Refrigeração e Ar-Condicionado - Psicrometria.* , parte 4. [S.l.: s.n.], 2002. Disponível em: <<http://www.univasf.edu.br/~castro.silva/disciplinas/FT/fenomenos.html>>.
- MCDOWALL, Robert. *Fundamentals of HVAC Systems.* 1st. ed. [S.l.]: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, 2006.
- MINCHALA-AVILA, Luis I. *et al.* Comparison of the performance and energy consumption index of model-based controllers. *2016 IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting, ETCM 2016*, 2016.
- MOHAMMAD, Nurul Nadia *et al.* Performance comparison and energy consumption index between MPC and FuzzyPID in small-scaled agarwood distillation pot. *2018 9th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium, ICSGRC 2018 - Proceeding*, n. August, p. 156–161, 2019.
- MURATORI, Matteo *et al.* Energy consumption of residential HVAC systems: A simple physically-based model. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, p. 1–8, 2012.

MUSTAFARAJ, G.; CHEN, J.; LOWRY, G. Development of room temperature and relative humidity linear parametric models for an open office using BMS data. *Energy and Buildings*, v. 42, n. 3, p. 348–356, 2010.

NORMEY-RICO, J. E.; CAMACHO, E. F. *Control of Dead-time processes (Advanced Textbooks in control and signal processing)*. [S.l.: s.n.], 2007.

NOVAK, Paulo Rogerio; MENDES, Nathan. Simulação de análise de estratégias de controle para um sistema de condicionamento de ar do tipo Fan-Coil. *Proceedings of the 10o Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, n. 2003, 2004.

NOVAK, Paulo Rogerio; MENDES, Nathan; OLIVEIRA, Gustavo H C. Simulation of Hvac Plants in 2 Brazilian Cities Using. *Building Simulation*, p. 859–866, 2005.

OLDEWURTEL, Frauke; JONES, Colin N.; MORARI, Manfred. A tractable approximation of chance constrained stochastic MPC based on affine disturbance feedback. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, p. 4731–4736, 2008.

PARISIO, Alessandra *et al.* *Implementation of a Scenario-based MPC for HVAC Systems: an Experimental Case Study*. [S.l.]: IFAC, 2014. v. 47. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474667016416800>>.

PEREIRA, Tiago Anacleto. *SISTEMA DE CONTROLE BASEADO EM PSICROMETRIA APLICADO A UM SISTEMA HVAC: Estudo de Caso - Sala Limpa do Instituto itt-Chip / UNISINOS*. 2019. Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, 2019.

PEREIRA, Tiago Anacleto; SANTOS, Cristian Figueiredo Dos; MEJÍA, Rodrigo Iván Goytia. *AUDITORIA DA ENGENHARIA DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DO SISTEMA HVAC PARA SALAS LIMPAS DO itt-CHIP / UNISINOS*. [S.l.: s.n.], 2019.

PLATT, Glenn *et al.* Adaptive HVAC zone modeling for sustainable buildings. *Energy and Buildings*, v. 42, n. 4, p. 412–421, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.009>>.

RAWLINGS, James B. *et al.* Economic MPC and real-time decision making with application to large-scale HVAC energy systems. *Computers and Chemical Engineering*, v. 114, p. 89–98, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.10.038>>.

RAZMARA, Meysam *et al.* Exergy-Based Model Predictive Control for Building HVAC Systems. 2015.

RICHALET, J. *et al.* Model predictive heuristic control. Applications to industrial processes. *Automatica*, v. 14, n. 5, p. 413–428, 1978.

ROYER, Sullivan *et al.* Black-box modeling of buildings thermal behavior using system identification. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, v. 19, p. 10850–10855, 2014.

SALSBURY, Tim; MHASKAR, Prashant. Predictive Control Methods to Improve Energy Efficiency and Reduce Demand in Buildings. *Computers & Chemical Engineering*, v. 51, p. 77–85, 2013.

SANTOS, José Eduardo Weber Dos. *MÉTODO DE AJUSTE PARA MPC BASEADO EM MULTI- CENÁRIOS PARA SISTEMAS NÃO QUADRADOS*. 2016. UFRGS, 2016.

SARABI, Siyamak *et al.* Assessing the relevance of reduced order models for building envelop. *Conference of International Building Performance Simulation Association*, p. 3538–3545, 2013.

SCHWINGSHACKL, Daniel; REHRL, Jakob; HORN, Martin. Model Predictive Control of a HVAC System Based on the LoLiMoT Algorithm. 2013, Zürich, Switzerland: [s.n.], 2013. p. 4328–4333.

SERALE, Gianluca *et al.* Model Predictive Control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: Problem formulation, applications and opportunities. *Energies*, v. 11, n. 3, 2018.

ŠIROKÝ, Jan *et al.* Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system. *Applied Energy*, v. 88, n. 9, p. 3079–3087, 2011.

SIVAK, Michael. Potential energy demand for cooling in the 50 largest metropolitan areas of the world: Implications for developing countries. *Energy Policy*, v. 37, n. 4, p. 1382–1384, 2009.

STARČIĆ, Antonio; LEŠIĆ, Vinko; VAŠAK, Mario. Predictive control for heating power variance and peak reduction in buildings. 2016, [S.l: s.n.], 2016. p. 7089–7094.

STROBEL, Christian. *Psicrometria - Refrigeração e Ar condicionado*. . [S.l: s.n.], 2015. Disponível em: <http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM374/>.

THOMAS, Jeff *et al.* *High performance Cleanrooms - A Design Guidelines Sourcebook*. . [S.l: s.n.], 2011.

TRIERWEILER, J. O.; FARINA, L. A. RPN tuning strategy for model predictive control. *Journal of Process Control*, v. 13, n. 7, p. 591–598, 2003.

VAŠAK, Mario; STARČIĆ, Antonio. Model Predictive Control of a Heating , Ventilation and Air Conditioning System. p. 913–918, 2014.

VÖMEL, Holger. *Saturation vapor pressure formulations*.

WETTER, Michael. Modelica-based modelling and simulation to support research and development in building energy and control systems. *Journal of Building Performance Simulation*, v. 2, n. 2, p. 143–161, 2009.

WU, Siyu; SUN, Jian Qiao. A physics-based linear parametric model of room temperature in office buildings. *Building and Environment*, v. 50, p. 1–9, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.005>>.

YU, Yuebin. *MODEL-BASED MULTIVARIATE CONTROL OF CONDITIONING SYSTEMS FOR OFFICE BUILDINGS*. 2012. 267 f. Carnegie Mellon, 2012.

YUDONG, Ma; MATUSKO, J; BORRELLI, F. Stochastic Model Predictive Control for Building HVAC Systems: Complexity and Conservatism. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 1, p. 101–116, 2015.

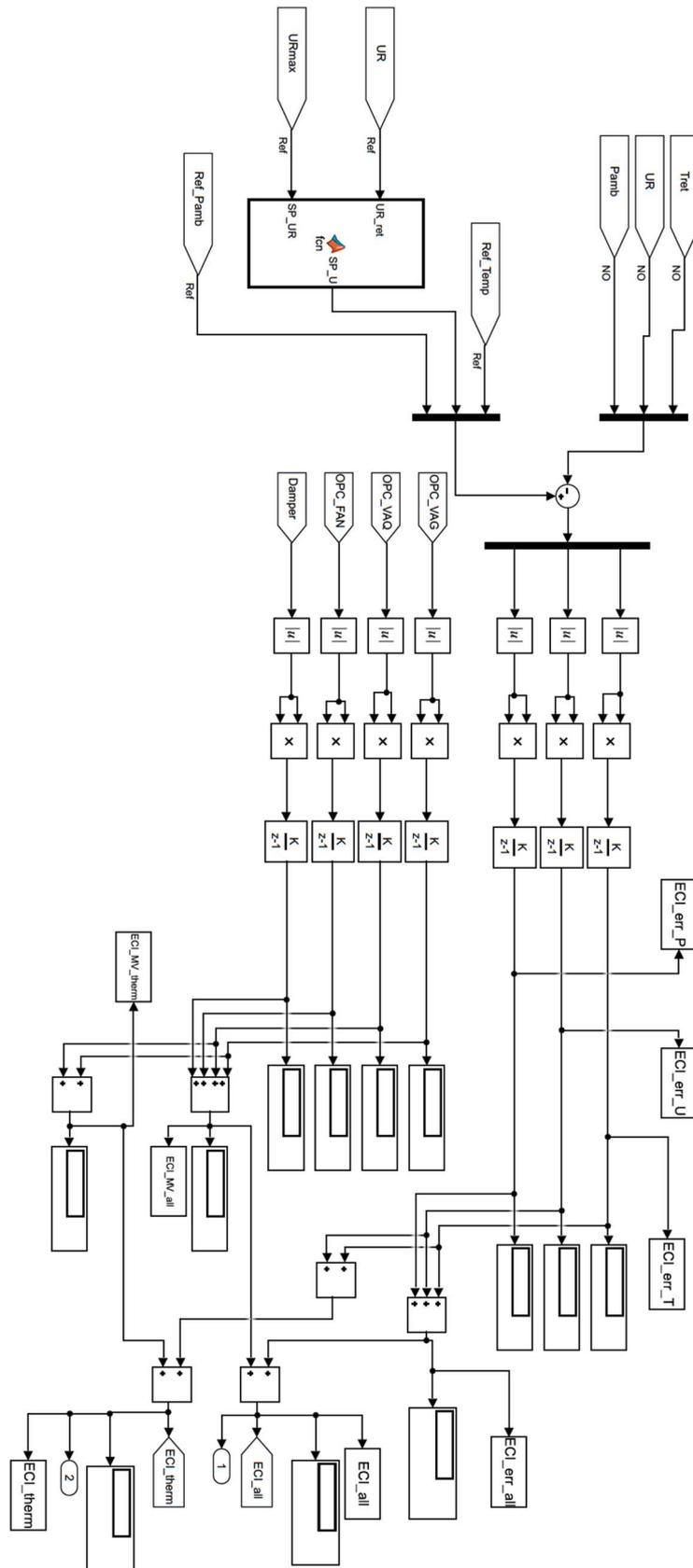
ZAJIC, Ivan *et al.* Temperature model of clean room manufacturing area for control analysis. *The institute of engineering and technology*, p. 1251–1256, 2010. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/ic.2010.0460>>.

ZAJIC, Ivan; LARKOWSKI, Tomasz; HILL, Dean. Energy consumption analysis of HVAC system with respect to zone temperature and humidity set-point. p. 4576–4581, 2011.

ZHOU, Yuxun; LI, Dan; SPANOS, Costas J. Learning Optimization Friendly Comfort Model for HVAC Model Predictive Control. 2015, [S.l.: s.n.], 2015.

ZUCKER, Gerhard; FERHATBEGOVIC, Tarik; BRUCKNER, Dietmar. Building automation for increased energy efficiency in buildings. *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, p. 1191–1196, 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6237258>>.

Figura 48 – Subsistema utilizado para obtenção do indicador ECI



Fonte: Elaborado pelo autor.