

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**AUTOMAÇÃO DE UM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO
HÍBRIDO COM FOCO NO PROCESSO EVAPORATIVO
VISANDO CONFORTO TÉRMICO E USO RACIONAL DA
ENERGIA**

PEDRO IVO ELIAS VIANNA

ORIENTADOR: ADOLFO BAUCHSPIESS

Brasília, julho de 2012

Sumário

1. INTRODUÇÃO

- 1.1 Motivação
- 1.2 Objetivos

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- 2.1 Índice de Conforto Térmico – PMV
- 2.2 Propriedades físicas da mistura ar – vapor d’água
 - 2.2.1 Lei de Dalton para Pressão Parcial
 - 2.2.2 Umidade absoluta
 - 2.2.3 Umidade relativa
 - 2.2.4 Volume específico
 - 2.2.5 Entalpia específica
 - 2.2.6 Temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido
- 2.3 A carta Psicrométrica
- 2.4 Modelagem Matemática
 - 2.4.1 Modelo estruturado *first-principles*
- 2.5 ZigBit
 - 2.5.1 Protocolo ZigBee
 - 2.5.2 Módulo ZigBit
 - 2.5.3 ZigBeeNet – BitCloud

3. DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Ambiente de Estudo
- 3.2 Sensor de temperatura e umidade SHT71
- 3.3 Rede de sensores wireless
- 3.4 Sistema de Controle Full Gauge

4. IDENTIFICAÇÃO

- 4.1 Captação dos dados
- 4.2 Identificação caixa-preta
 - 4.2.1 Abordagem MISO
 - 4.2.2 Abordagem MIMO

4.3 Identificação caixa-cinza

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A demanda por energia elétrica cresce cada vez mais, num ritmo bastante acelerado, e também cresce as preocupações sobre o futuro do planeta e em formas de se conseguir um desenvolvimento sustentável. Grande parte da energia consumida por ambientes residenciais e comerciais se destina ao uso de equipamentos de ar-condicionado. A forma que mais se tem buscado para suprir essa demanda por energia elétrica é aumentando a matriz energética, que por diversas vezes gera um impacto ambiental.

Uma forma alternativa e ambientalmente mais correta é fazer com que essa demanda energética diminua ou cresça mais lentamente. Para isso o desenvolvimento de ambientes inteligentes procura fazer o uso racional da energia, proporcionando o máximo de economia e gerando impactos ambientais bastantes reduzidos.

Ambientes prediais normalmente são muito complexos, porém com o avanço da tecnologia e das técnicas de automação e controle, tem-se desenvolvido redes de sensores sem fio e protocolos de comunicação que permitem a criação desses ambientes por permitir o retrofitting em prédios já construídos, por não necessitar de mudanças na infra-estrutura que podem ser bastantes dispendiosas.

Assim um ambiente inteligente faz uso desses recursos para prover o conforto térmico de seus ocupantes fazendo o uso racional da energia. Na sala de reuniões do Laboratório de Automação e Robótica (LARA), há uma planta instalada de um equipamento de ar-condicionado híbrido, que funciona nos modos evaporativo e convencional (compressor), que será alvo de estudo deste projeto, com foco no aspecto evaporativo do processo e na umidade.

Através de técnicas de identificação de sistemas dinâmicos, procura-se um modelo matemático da umidade em função dos sinais que a influenciam, como temperaturas internas e externas, radiação solar e radiação térmica média, para que se possa descrever esse ambiente. Para este projeto há o

foco na identificação por princípios fundamentais, que possui significado físico e utiliza-se de um conhecimento prévio do sistema para se fazer uma boa identificação. Assim será possível aplicar técnicas de controle da umidade que interaja com o controle da temperatura, para se fazer o uso do equipamento híbrido de forma que ele provenha o máximo de economia de energia com conforto térmico.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste projeto é fazer o controle de um equipamento de ar-condicionado híbrido de forma que ele ofereça conforto térmico com o máximo de economia de energia. Para isso deve-se fazer a instrumentação de uma rede de sensores e atuadores sem fio através de módulos que utilizam a tecnologia Zigbit, da MeshNetics/Atmel. Esses módulos se comunicam através do protocolo Zigbee (IEEE 802.15.4), permitindo a coleta de dados das variáveis que sejam pertinentes para o controle do ambiente. Procura-se então obter um modelo matemático que represente de maneira satisfatória a sala de reuniões do LARA. Para isso são feitas duas abordagens, uma sendo caixa preta e a outra caixa cinza, utilizando-se de princípios fundamentais. De posse do modelo matemático será possível aplicar uma técnica de controle que se mostre eficiente ao objetivo deste projeto.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO – PMV

A definição de conforto térmico não é algo muito simples, pois além dos fatores físicos, envolve uma gama de fatores pessoais que acabam tornando sua definição subjetiva. Assim o conforto térmico pode ser analisado por dois aspectos: pessoal e ambiental. Do ponto de vista pessoal, conforto térmico é uma condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico. Do ponto de vista físico, como os seres humanos são homeotérmicos, eles tendem a manter a temperatura interna constante independentemente do ambiente, assim confortável é o ambiente cujas condições permitam a manutenção da temperatura interna sem a necessidade que o organismo humano precise de regulá-lo, ou seja, que o organismo humano esteja em balanço térmico com o meio.[1]

Segundo a ASHRAE (American Society of Heating Refrigeration and Air Conditions) Standard 55-92, conforto térmico é definido como: “Conforto térmico é a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”. Há ainda, de acordo com Ole Fanger (1970) em [12] o termo neutralidade térmica, que é assim definida: “Neutralidade térmica é a condição na qual uma pessoa não prefira nem mais calor nem mais frio no ambiente ao seu redor”. Esse conceito de neutralidade térmica está mais próxima da maneira subjetiva de como as pessoas expressam satisfação com a temperatura do ambiente. Assim sendo pode-se dizer que a neutralidade térmica é uma condição necessária mas não suficiente para que haja conforto térmico.[2] Por exemplo, uma pessoa exposta a uma forte rajada de vento pode estar em neutralidade térmica porém não estará com conforto térmico.

Assim para se tornar o critério de avaliação de sensação térmica padronizada, são adotados critérios e normas existentes. Primeiramente devem ser definidas as variáveis que influenciam o conforto térmico, sendo elas:

- Atividade desempenhada, W (W/m^2);

- Isolamento térmico das roupas utilizadas, I_{cl} ;
- Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);
- Temperatura radiante média, T_{rm} ($^{\circ}\text{C}$);
- Velocidade do ar, V_a (m/s);
- Umidade relativa do ar;

As duas primeiras variáveis são chamadas de pessoais, enquanto as outras são chamadas de variáveis ambientais, sendo a umidade relativa do ar o foco principal para este projeto. O critério adotado será a norma ISO 7730/94 – *Ambientes térmicos moderados – Determinação dos índices PMV e PPD e especificações das condições para conforto térmico*. Esta norma propõe um método para previsão da sensação térmica e o grau de desconforto das pessoas expostas a ambientes térmicos moderados, especificando condições térmicas aceitáveis para o conforto. Assim a avaliação de conforto térmico será feita calculando-se os índices PMV (Predicted Mean Vote ou Voto médio previsível) e PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied ou Percentagem Previsível de Insatisfeitos).

O corpo humano é uma fonte de calor, oriunda do metabolismo dos alimentos que ingerimos. A fim de que não haja um aumento exagerado da temperatura interna, o corpo necessita dissipar esse calor. Essa dissipação ocorre através de trocas térmicas com o ambiente, sendo elas:

- Através da pele:
 - Perda sensível de calor por convecção (C);
 - Perda sensível de calor por radiação (R);
 - Perda latente de calor, por evaporação do suor (E_{sw});
 - Perda latente de calor, por dissipação da umidade de pele (E_{dif}).
- Através da respiração:
 - Perda sensível de calor: convecção (C_{res});
 - Perda latente de calor: evaporação (E_{res}).

O modelo utilizado na norma ISO 7730, utiliza o “estado estacionário”, ou permanente, desenvolvido por Fanger, o qual assume que o corpo, num ambiente, encontra-se em estado de equilíbrio, não ocorrendo portanto acúmulo de calor em seu interior [2]. Assim a taxa metabólica do corpo

humano - M (W^2/m^2) deve ser igual a dissipação de energia. A expressão do balanço de energia entre o corpo e o ambiente pode então ser escrita assim:

$$M = W + C + R + E_{sw} + E_{dif} + C_{res} + E_{res}$$

E a carga térmica - L (W^2/m^2) a qual um corpo está submetido é dada por[3]:

$$L = M - E_{dif} - E_{sw} - C_{res} - E_{res} - R - C$$

Podemos concluir que há uma relação entre a sensação térmica e a carga a qual ela está submetida, que é uma função do calor interno produzida pela pessoa. Assim o índice PMV pode ser calculado como se segue:

$$PMV = (0,303 e^{-0,036M} + 0,028) L$$

Com o índice podendo variar de acordo com as seguintes escalas:

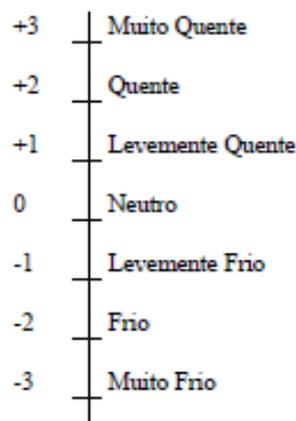


Figura 2.1 Índice PMV relacionado com conforto térmico

E a partir do PMV é possível calcular o índice PPD como:

$$PPD = 100 - 95 e^{(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2)}$$

Esses índices se relacionam de acordo com o gráfico a seguir:

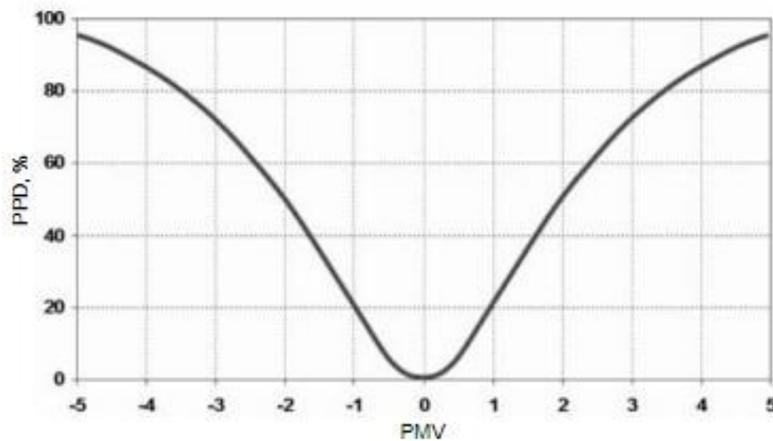


Figura 2.2 Relação entre os índices PMV e PPD

Sendo que para um ambiente aceitável termicamente, onde estima-se que 90% de seus ocupantes terão aceitabilidade térmica e 85% não estarão insatisfeitos[2], temos que:

$$-0,5 < PMV < +0,5$$

Assim o controle do ambiente da sala de reuniões deverá ser tal que o cálculo desses índices, através das medidas das variáveis pelos sensores, deverá estar dentro desta margem.

2.2 PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS DA MISTURA AR – VAPOR D’ÁGUA

Para se conseguir um modelamento correto do comportamento da umidade em um ambiente é necessário conhecer as leis físicas a seu respeito. Como a umidade é uma medida que relaciona o vapor d’água e o ar seco do ambiente, devem-se considerar as leis que regem os gases.

2.2.1 Lei de Dalton para Pressão Parcial

A Lei de Dalton para Pressão Parcial diz que se uma mistura de gases ocupa um dado volume a uma dada temperatura, a pressão total exercida pela mistura é igual à soma das pressões dos componentes, cada um sendo

considerado ao mesmo volume e temperatura da mistura [13]. Na prática é mais conveniente enumerá-la em duas partes:

- A pressão exercida por cada gás na mistura de gases é independente da presença de outros gases;
- A pressão total exercida pela mistura é igual a soma das pressões parciais.

A figura a seguir ilustra estas ideias.

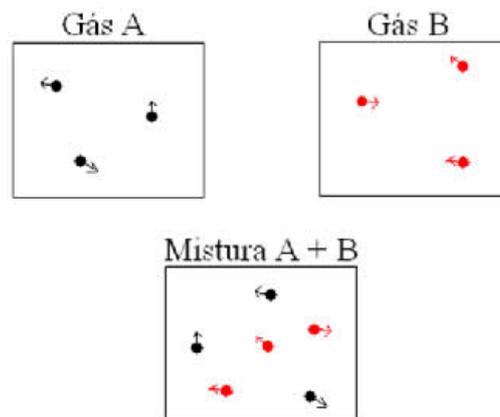


Figura 2.3 Lei de Dalton para Pressões Parciais.

Outro conceito importante quando trabalhamos com a umidade é o conceito de saturação. Consideremos um exemplo prático. Um recipiente isolado fechado contém uma amostra d'água. Após certo período de tempo, o espaço acima da água que anteriormente estava no vácuo, passa a conter vapor d'água até que esse vapor atinja a mesma temperatura da água. Nestas condições ele é dito saturado. Para chegar nesse estado a água perdeu moléculas, que são representadas pela perda de energia cinética. Já que a perda de energia cinética representa perda de calor, a temperatura da água teve que cair até chegar ao ponto de equilíbrio. Um ambiente gasoso que possui vapor d'água e ar seco se comporta de maneira análoga, assim a relação entre temperatura de saturação e pressão de saturação é a mesma para a água líquida em contato apenas com seu vapor. Conclui-se daí um fato muito importante: a pressão de vapor de saturação depende somente da temperatura [13].

2.2.2 Umidade absoluta

A umidade absoluta é definida como a massa de vapor d'água em quilogramas por massa de ar seco em quilograma numa mistura vapor d'água e ar. A partir desta definição podemos escrever a seguinte equação:

$$w = m_v/m_a$$

Usando a Lei de Dalton, pode-se aplicar a Lei Geral dos Gases a cada um dos componentes da mistura de ar úmido, de forma independente. Temos:

$$pV = mRT \text{ (equação geral)}$$

Assim:

$$p_v V_v = m_v R_v T_v \text{ (para o vapor d'água)}$$

$$p_a V_a = m_a R_a T_a \text{ (para o ar seco)}$$

A Lei Geral dos Gases pode ser rearranjada de modo que a massa seja expressa em termos das outras variáveis.

$$m = \frac{pV}{RT}$$

Substituindo esta equação nas equações para o vapor d'água e ar seco e utilizando o conceito de umidade absoluta, temos a seguinte expressão:

$$w = \frac{p_v V_v R_a T_a}{R_v T_v p_a V_a} = \frac{R_a p_v}{R_v p_a}$$

Uma vez que vapor d'água e ar seco tem o mesmo volume. A razão entre R_a e R_s é a densidade relativa do vapor d'água com o ar seco, depende da razão entre suas massas moleculares, portanto este valor é de 0,622. Assim a umidade absoluta pode ser definida em razão da pressão parcial do vapor d'água pela pressão parcial do ar seco, ou simplesmente pela pressão parcial do vapor d'água pela pressão atmosférica, conforme a equação abaixo:

$$w = 0,622 \frac{p_v}{p_a} = 0,622 \frac{p_v}{P - p_v}$$

2.2.3 Umidade relativa

Por definição a umidade relativa é a razão entre a pressão parcial de vapor d'água numa dada temperatura e a pressão parcial que o vapor d'água teria se o ar úmido estivesse saturado nessa mesma temperatura.

$$\phi = \frac{p_v}{p_{vs}} 100$$

A umidade relativa varia de zero (ar seco) a 100% (ar úmido saturado). Deve-se sempre observar que as pressões parciais sempre devem estar na mesma temperatura.

2.2.4 Volume específico

No geral as propriedades específicas são dadas por unidade de massa da substância de interesse. Na psicometria convencionou-se referenciar tais propriedades a massa de ar seco (e não a massa da mistura), isto se deve ao fato de que o vapor d'água pode ser retirado ou adicionado ao ambiente, enquanto que o fluxo de ar seco permanece constante. [pimenta]

Volume específico é a razão entre o volume ocupado pela mistura e a massa de ar presente no mesmo.

$$v = \frac{V}{m_a}$$

A partir desta expressão e considerando a simplificação de gases perfeitos, se utiliza da Lei dos Gases Perfeitos:

$$PV = nRT$$

Como as constantes de gases para o ar seco e para o vapor d'água são conhecidos, o mais conveniente é utilizar:

- A massa e a pressão parcial de ar seco, ou;
- A massa e a pressão parcial do vapor d'água.

Para determinar o volume específico.

2.2.5 Entalpia Específica

Entalpia é um conceito físico definido na termodinâmica como a forma de medir a máxima energia do sistema. Em um processo de transferência de energia térmica, a variação de entalpia pode ser medida utilizando-se a primeira lei da termodinâmica e calculando a quantidade de calor adicionada ou removida do sistema.

A entalpia total da mistura é igual à soma das entalpias individuais do ar seco e do vapor d'água

$$H = m_a h_a + m_v h_v$$

A entalpia específica é a entalpia total dividida pela massa de ar seco. Utilizando-se ainda da definição de umidade absoluta, temos:

$$h = h_a + w h_v$$

2.2.6 Temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido

A temperatura de bulbo seco (BS) é simplesmente a temperatura medida por um termômetro. A temperatura de bulbo úmido (BU) é a temperatura medida por um termômetro específico. Um termômetro BU é um termômetro comum (BS), cujo bulbo é encerrado num saco de pano ou pávio umedecido [15]. O pávio deve ser saturado com água limpa à temperatura BS do ar, e a velocidade do ar ao redor do pávio deve estar entre determinada faixa de velocidade. Um instrumento destinado a este propósito é o psicrômetro.

A menos que o ar esteja saturado em 100%, caso em que as temperaturas BS e BU serão as mesmas, a temperatura registrada por um termômetro BU será sempre mais baixa que a temperatura BS do ar. Isto se deve ao fato do pávio umedecido retirar calor do bulbo ao evaporar, reduzindo a

temperatura medida no termômetro. A quantidade de temperatura BU que é reduzida para se chegar à temperatura BS é chamada depressão BU.

Como um termômetro BU é influenciado pela umidade do ar, enquanto que a temperatura BS não é, a temperatura BU é uma medida de relação entre a temperatura BS do ar e o teor de umidade deste [15].

2.2.7 Temperatura de ponto de orvalho

A temperatura de ponto de orvalho (PO) é definida como a temperatura do ar saturado que tem a mesma pressão de vapor que o ar úmido [13]. Sendo assim quando a pressão parcial do vapor d'água é conhecida, a temperatura de PO pode ser determinada pelas tabelas de vapor, e vice-versa.

2.3 A CARTA PSICROMÉTRICA

Segundo Dossat (1980) a carta psicrométrica é uma representação gráfica das propriedades psicrométricas do ar. Este diagrama permite uma análise gráfica de dados e processos psicrométricos de maneira muito prática, facilitando a solução de muitos problemas que, de outra maneira, requereriam soluções matemáticas muito mais complexas. A figura 2.4 mostra uma carta psicrométrica típica.

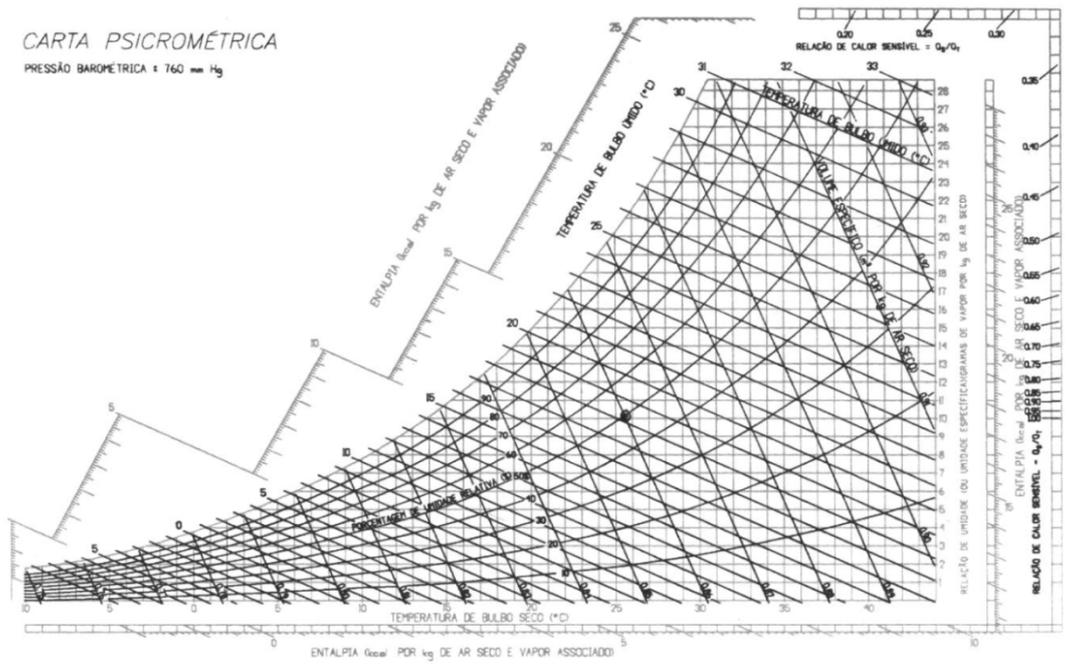


Figura 2.4 A carta psicrométrica

A carta psicrométrica é construída para uma pressão barométrica constante, convencionada como sendo a pressão ao nível do mar. Para outras regiões como Brasília, que está a 1.300m acima do nível do mar, deve-se utilizar uma carta psicrométrica corrigida ou utilizar expressões matemáticas levando em conta a pressão atmosférica correspondente. A figura 2.5 detalha a construção da carta psicrométrica.

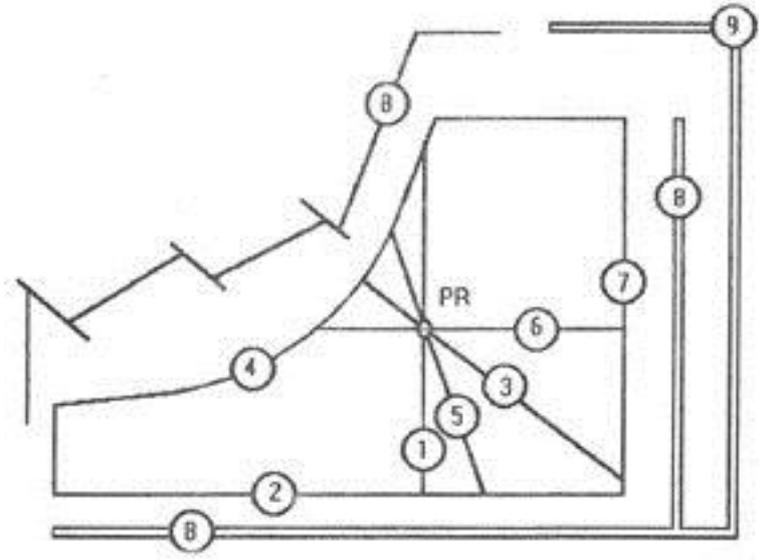


Figura 2.5 Propriedades da carta psicrométrica

Item	Propriedade
1	linha de temperatura de bulbo seco.
2	escala de temperatura de bulbo seco.
3	linha de temperatura de bulbo úmido.
4	escala de temperatura de bulbo úmido; escala de temperatura de ponto de orvalho; linha de umidade relativa.
5	escala de umidade relativa; linha de volume específico.
6	linha de umidade absoluta ou específica.
7	escala de umidade absoluta ou específica.
8	escala de entalpia.
9	escala de fator de calor sensível.

Tabela 2.1 Legenda das propriedades da carta psicrométrica

Os processos psicrométricos podem ser analisados no diagrama. A análise consiste em acompanhar as mudanças nas propriedades psicrométricas do ar ocorridas durante algum processo de condicionamento de ar. A figura 2.6 ilustra os processos fundamentais via carta psicrométrica, supondo-se que eles se iniciam na intersecção das linhas.

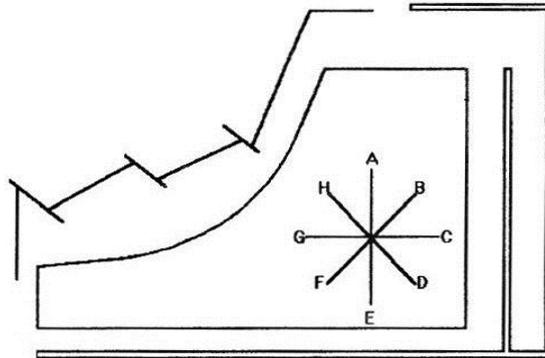


Figura 2.6 Processos na carta psicrométrica

Processo	Descrição
A	somente umidificação.
B	aquecimento e umidificação.
C	somente aquecimento sensível.
D	desumidificação química.
E	somente desumidificação.
F	resfriamento e desumidificação.
G	somente resfriamento sensível.
H	somente resfriamento evaporativo.

Tabela 2.2 Descrição dos processos via carta psicrométrica.

2.4 MODELAGEM MATEMÁTICA

A todo momento nós, seres humanos, nos baseamos em modelos para tomar decisões. O simples fato de dirigir um carro se baseia em um modelo mental adquirido e aperfeiçoado ao longo dos tempos. Assim como os modelos mentais, os modelos que podem ser representados por relações matemáticas são bastante úteis. Assim, modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda maneiras de construir e implementar modelos matemáticos de sistemas reais [4].

Há várias formas de se classificar modelos matemáticos. Na área de identificação de sistemas dinâmicos é comum agrupá-las em três categorias, denominadas modelagem caixa branca, modelagem caixa preta e modelagem caixa cinza.

Na modelagem caixa branca é necessário conhecer bem o sistema em estudo, bem como as leis físicas que descrevem o sistema a ser modelado [4]. Assim este tipo de modelagem torna-se nem sempre viável, principalmente quando se trata de um sistema complexo, além disso é necessário obter todos os parâmetros físicos do sistema, como constantes de atritos, dimensões, centros de massa, etc.

Assim é necessário buscar técnicas alternativas para ser obter modelos matemáticos. Na modelagem caixa preta, pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema é necessário[4]. Essa modelagem considera as relações de causa e efeito entre as variáveis de entrada e de saída, assim esse tipo de identificação depende fortemente da qualidade dos dados disponíveis.

Entre esses dois tipos de modelagem, está a modelagem caixa cinza, que é caracterizada por utilizar informação auxiliar. O tipo dessa informação e como ela é usada torna a modelagem mais “clara” ou mais “escura” [4]. É então possível que informação a priori esteja disponível para estruturar o modelo e que os dados dinâmicos sejam utilizados para estimar seus parâmetros.

Para a identificação de sistemas dinâmicos o sinal PRBS é muito utilizado na prática, pois ele se aproxima, em termos espectrais, de um ruído branco. A importância deste tipo de sinal na identificação se dá por motivos

numéricos e dinâmicos. Quanto mais constante for o sinal de entrada do sistema, mais mal condicionada será a matriz a ser invertida pelos estimadores, como o de mínimos quadrados, já que algumas colunas serão praticamente constantes e idênticas. Do ponto de vista dinâmico uma entrada será “branca” se ela contiver suficiente energia na faixa de frequências dominantes do sistema a ser identificado. Assim requerer que a entrada seja branca equivale a requerer que tal entrada excite a dinâmica da planta [4].

Para este projeto será feita tanto a identificação caixa preta quanto à identificação caixa cinza, onde o modelo será estruturado por princípios fundamentais e que seus parâmetros poderão ser estimados e utilizados em um ambiente de simulação virtual. Tal ambiente poderá ser utilizado para se fazer estudos em se obter um controle eficiente, que tenha compromisso com a energia e conforto térmico, é fundamental que se obtenha um modelo matemático satisfatório, que seja coerente e represente bem o sistema real em estudo.

2.4.1. Modelo Estruturado *First-Principles*

Para a realização de uma identificação caixa cinza é necessário ter algum conhecimento sobre o sistema real. Apesar de um ambiente térmico apresentar parâmetro distribuídos, não-linearidades será considerado um modelo de parâmetros concentrados, contínuo, invariante no tempo e linear, que apresente precisão suficiente para descrever o ambiente real. Em [9] é proposto um modelo estruturado por *first-principles*. A idéia básica é fazer a adição dos fluxos de calor sobre o ambiente [9]. Para se considerar os fluxos de calor que tem influência sobre o ambiente de estudo, proveniente da transferência de calor dos ambientes vizinhos, é necessário se investigar a parede. Em [10] são analisados diferentes tipos de modelos para a parede. Para o modelo 2R1C, é considerado uma capacitância térmica interna e duas resistências térmicas de condutividade (Figura 2.3), onde o fluxo de calor entre dois ambientes depende da diferença de temperatura entre T_o e T_{iv} , sendo T_{iv} um ponto fictício no meio da parede. Este trabalho assume que este modelo é suficiente para representar a dinâmica de uma parede.

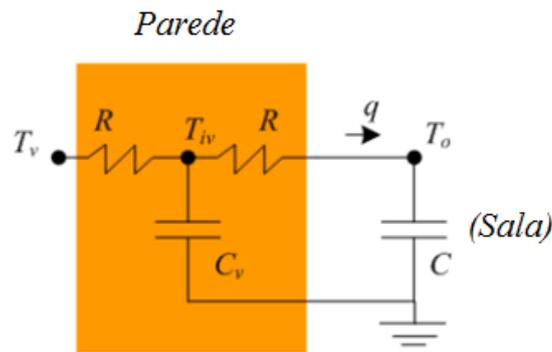


Figura 2.3 Modelo 2R1C análogo a transferência de calor da vizinhança

Assim a transferência de calor entre o ambiente e uma sala vizinha pode ser representada por uma função de transferência de primeira ordem, dada por:

$$\frac{T_o}{T_{iv}} = \frac{1}{sRC_v}$$

Que representa a dinâmica de como ocorre a troca de calor entre dois ambientes, sendo RC_v a constante de tempo. O processo de resfriamento do ar pelo ar condicionado também será modelado como uma função de transferência de primeira ordem, onde a constante de tempo representa o tempo necessário para que haja percepção do efeito de resfriamento. Considerando ainda a influência direta da radiação solar incidente na sala de estudos, ou seja, ela não depende da temperatura da sala, podemos considerar o seguinte modelo para representar a sua dinâmica:

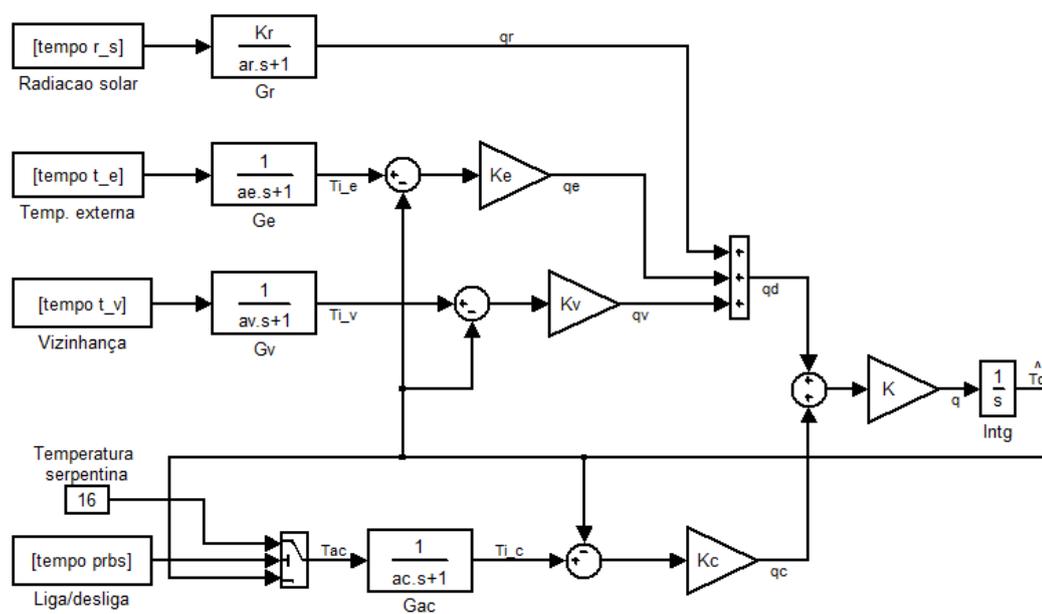


Figura 2.4 Modelo estruturado por *first-principles* para temperatura.

O volume de ar na sala é modelado como uma capacitância térmica concentrada C , onde a temperatura interna predita pelo modelo é T_o [9]. Podemos observar pelo modelo que essa temperatura predita é o resultado da integração da soma de todas as parcelas de fluxo de calor (q_r , q_e , q_v e q_c), assim um fluxo positivo para a sala aumenta sua temperatura, enquanto um fluxo negativo acarreta na diminuição da temperatura.

Como o foco deste projeto é o sistema evaporativo, devemos trabalhar com um modelo estruturado de maneira semelhante que seja capaz de representar a dinâmica da umidade na sala.

Um dos problemas ao se trabalhar com a umidade relativa é que está é uma variável que está acoplada a temperatura. Uma variação na temperatura da sala provoca uma variação na umidade relativa, sem que haja qualquer mudança na quantidade de vapor d'água no ambiente. Para contornar este problema usaremos como variável a umidade absoluta, já que esta é ortogonal a temperatura, e seus valores podem ser obtidos pelos respectivos valores de temperatura e umidade relativa, via carta psicrométrica.

Para entender a dinâmica da umidade absoluta na sala, devemos analisar o funcionamento do sistema híbrido de climatização, como é mostrado na figura 2.5, e considerar o princípio da conservação de massa.

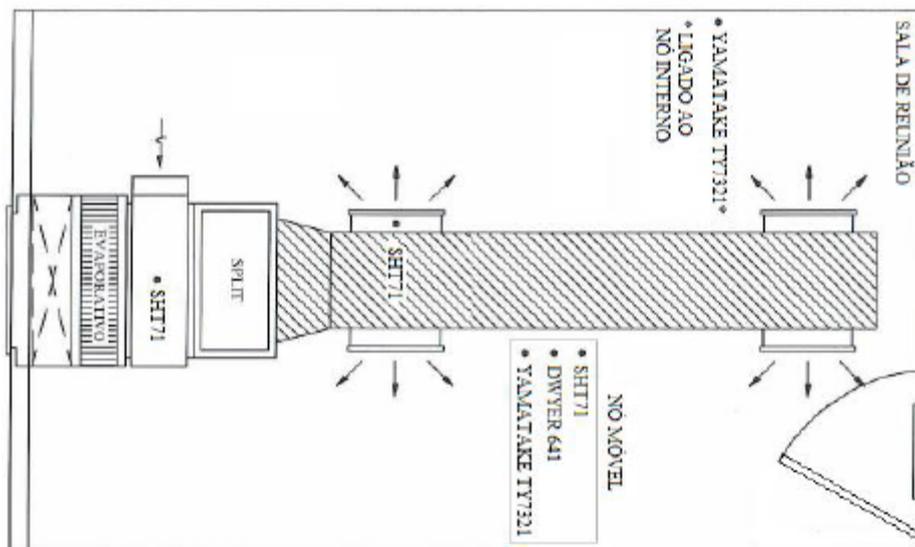


Figura 2.5 Funcionamento do sistema híbrido de climatização.

O sistema opera em dois modos, e para cada um deles a dinâmica da umidade absoluta é diferente. Primeiramente analisaremos o modo evaporativo.

Para qualquer um dos modos o ventilador sempre está ligado a uma velocidade constante, assim sempre haverá uma pressão positiva para que a massa de ar circule entre os ambientes. No modo evaporativo o damper está fechado, assim este fluxo se dá do ambiente externo para o ambiente vizinho. Temos vazão mássica de entrada, que é a massa de ar que entra na sala através do duto conectado ao exterior, sendo a massa de ar do ambiente externo acrescentado de certa quantidade de vapor d'água devido à passagem do ar pela manta de celulose. E temos a vazão mássica de saída, a massa de ar que sai da sala através da grelha da porta e por baixo da mesma para o ambiente vizinho. Como o fluxo de ar seco é constante, a diferença entre a massa de vapor d'água dessas vazões é a quantidade de umidade absoluta na sala. Assim como foi feito para o modelo estruturado para a temperatura, as vazões mássicas são modeladas por funções de transferência de primeira ordem. Na figura 2.6 é apresentado o modelo proposto para o modo evaporativo.

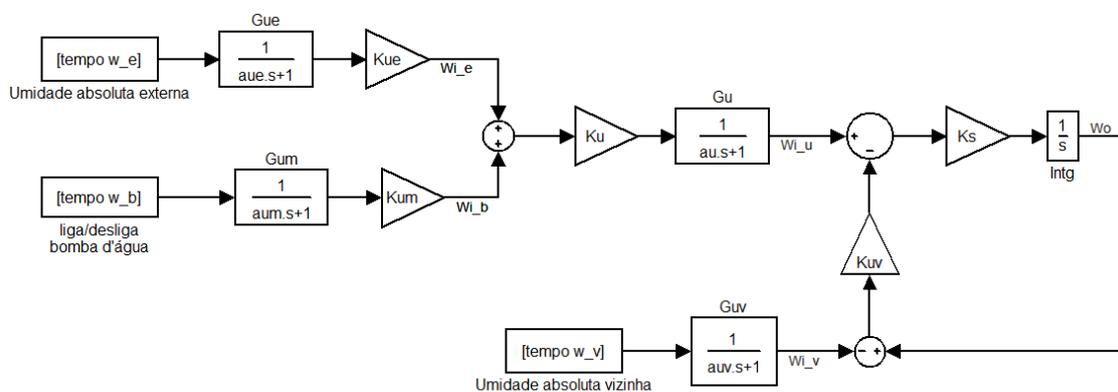


Figura 2.6 Modelo estruturado da umidade absoluta para o modo evaporativo.

A equação de balanço de massa para o modo evaporativo é mostrada abaixo:

$$\frac{1}{K_s} \frac{dW_o}{dt} = (W_{ie} + W_{ib}) \frac{K_u}{a_u s + 1} - (W_o - W_{iv}) K_{uv}$$

Para o modo convencional (split) o damper está aberto, a pressão positiva exercida pelo ventilador faz com que o ar de retorno do split seja o ar da

sala, já que este oferece menor resistência em relação ao ar externo. Assim a vazão mássica de entrada e saída de ar se dá para o ambiente vizinho. A umidade absoluta da sala é igual a diferença da massa de vapor d'água que entra na sala pelo ambiente vizinho e da massa de vapor d'água que sai pelo mesmo. A figura 2.7 apresenta o modelo estruturado para o modo convencional.

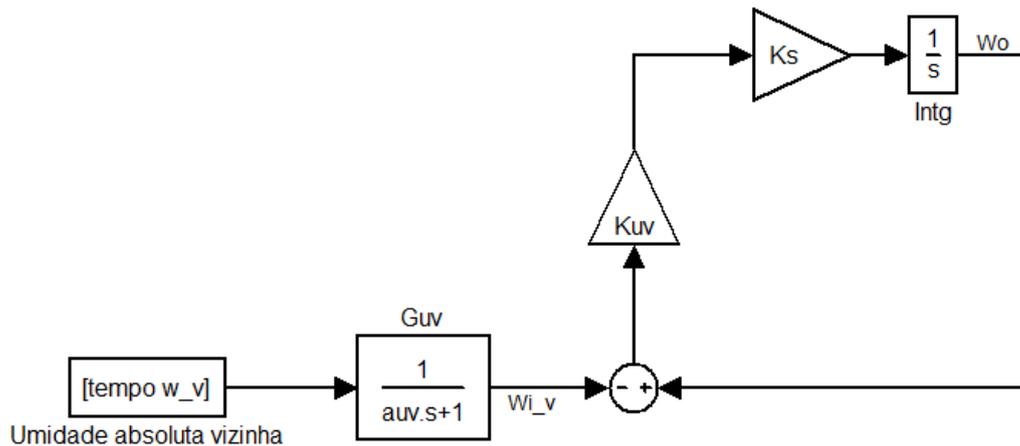


Figura 2.7 Modelo estruturado da umidade absoluta para o modo convencional.

A equação de balanço de massa para o modo convencional é mostrada abaixo:

$$\frac{1}{K_s K_{uv}} \frac{dW_o}{dt} = W_{iv} - W_o$$

Para obter um único modelo que represente os dois modos de funcionamento é utilizado o sinal de acionamento do sistema híbrido. Além disso, o modelo utiliza de umidade absoluta enquanto que a variável que se deseja obter o controle é a umidade relativa da sala. Para fazer a conversão entre estas propriedades são utilizados blocos do tipo “S-Function”, que aplicam as equações propostas em [16]. O modelo completo que representa o comportamento da umidade relativa da sala é mostrado na figura 2.8.

2.3 ZIGBIT

A rede de sensores sem fio utilizada neste projeto é baseada na tecnologia Zigbit, que utiliza o protocolo de comunicação Zigbee. A marca detentora desta tecnologia era a MeshNetics, que foi adquirida pela Atmel, que passou a distribuí-la. Suas propriedades a tornam bastante interessante para as aplicações deste projeto, visto que seu uso tem se difundido bastante em aplicações de automação, como controle de iluminação, refrigeração, aquecimento, irrigação, entre outros, além de sistemas de monitoramento e segurança.

2.3.1 Protocolo ZigBee

O crescimento do mercado e aumento da complexidade da automação industrial e residencial fez surgir uma tecnologia que permitisse a comunicação entre dispositivos de fabricantes diferentes, o Zigbee [5]. Que ao contrário das tecnologias de fio já existentes, como Wifi e Bluetooth, apostou na baixa largura de banda para uma baixa transmissão de dados, confiável com baixo consumo de energia e reduzido custo de implantação.

O protocolo Zigbee é um padrão global baseado no IEEE 802.15.4, que foi desenvolvido pela Zigbee Alliance, um grupo de empresas que trabalham em conjunto para desenvolver um protocolo para o estabelecimento de redes que pudessem ser utilizadas em diversos ambientes. Algumas das características do protocolo Zigbee são:

- Acesso de canal do tipo CSMA-CA;
- Fácil integração de nós na rede;
- Modos de endereçamento 16-bit short e 64-bit IEEE addressing;
- Comunicação pode ocorrer em 3 bandas diferentes: 2,4GHz, 915Mhz e 868Mhz. Com transmissão máxima de 250 kbps com 16 canais disponíveis, 40 kbps com 10 canais de comunicação e 20 kbps com um canal de comunicação, respectivamente.
- Protocolo handshaked para transferência segura de dados;

O protocolo Zigbee foi concebido de maneira que independentemente da localização e disposição dos pontos de envio e recepção dos dados, a rede se formasse automaticamente sem necessitar da intervenção do utilizador na configuração da mesma [5]. Os nós de uma rede Zigbee podem ser de 3 tipos: *coordinator*, *router* e *enddevice*. Estas definições são definidas por software de acordo com a topologia da rede, já que o hardware para todos os tipos são iguais. Já o protocolo IEEE 802.15.4 faz distinção de dispositivos FFD e RFD.

Os FFD (Full Function Device) são os dispositivos mais complexos, tendo hardware mais potente e consumindo assim mais energia. Estes dispositivos tem capacidade para se comunicar com quaisquer outros nós da rede. Numa rede Zigbee estes dispositivos são o *coordinator*, *router* e podendo ser também um *enddevice*. Os RFD (Reduced Function Device) são mais simples, utilizando os mínimos recursos necessários de hardware, consumindo menos energia, porém só podem se comunicar com dispositivos FFD. Na rede Zigbee estes dispositivos só podem ser do tipo *enddevice*.

Assim como outros protocolos, o Zigbee é dividido por camadas, de acordo com a figura 2.3.



Figura 2.3 Arquitetura de camadas do protocolo Zigbee

Na rede Zigbee o *coordinator* é o nó mandatório que coordena até 64.000 dispositivos, sendo responsável por admitir os nós, fazer a atribuição de endereços e iniciar a rede. O *router* também possui capacidade de admitir outros nós na rede, aumenta a área de cobertura e cria rotas alternativas de dados. O *enddevice* é um dispositivo terminal que só pode se comunicar com o *router* ou *coordinator*. Este tipo de topologia é o que será utilizado neste projeto.

2.3.2 Módulo ZigBit

ZigBit é um módulo que contém em seu encapsulamento um microcontrolador ATmega1281V e um transceiver de rádio frequência AT86RF230. Há duas versões diferentes, uma com antena integrada e outra sem a antena, que é mostrada na figura 2.4. A comunicação do módulo com o computador se dá através dos protocolos UART e USART.

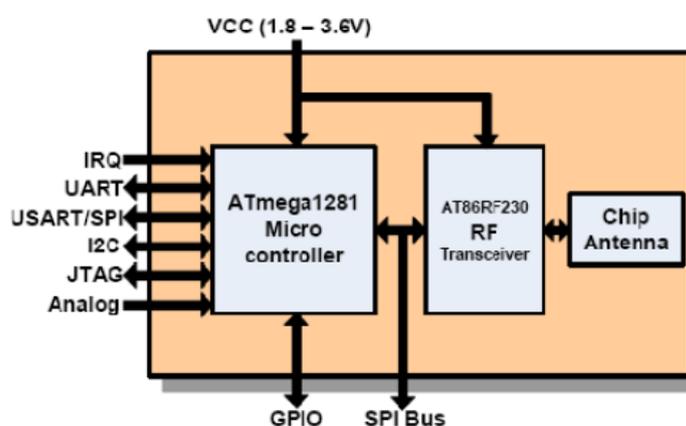


Figura 2.4 Esquemático do módulo ZigBit.

Também será utilizado o kit de desenvolvimento MeshBean, que além do módulo, integra sensores, conectores, DIP switches, LED's, botões, entre outros, que por sua simplicidade tem o objetivo de facilitar a criação e desenvolvimento da rede de sensores sem fio, testando seus recursos e criando soluções customizadas [6].

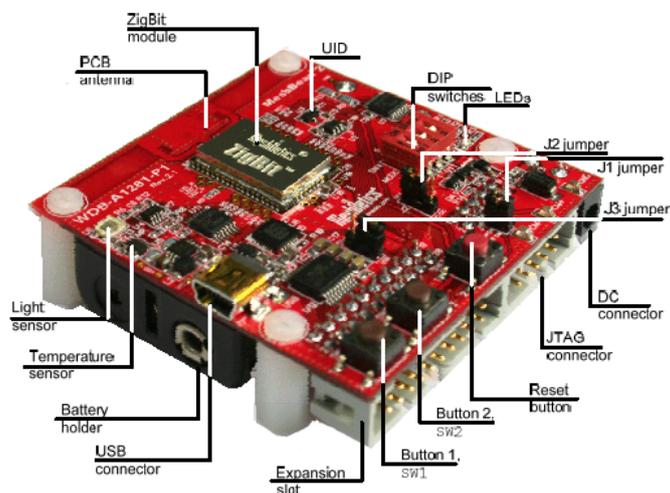


Figura 2.5 Kit de desenvolvimento MeashBean

O módulo ZigBit possui embarcado o ZigBeeNet, agora chamado de BitCloud, que é uma pilha de software que fornece uma plataforma de desenvolvimento completo projetado para uma vasta gama de aplicações, abordando diversas necessidades do desenvolvedor e permitindo a customização do software[6]. Essas características fazem deste módulo uma excelente opção para o desenvolvimento deste projeto.

2.3.4 ZigBeeNet – BitCloud

ZigBeeNet é um sistema de tempo real totalmente compatível com ZigBee PRO e o padrão ZigBee para sensoriamento e controle sem fio [7]. A arquitetura ZigBeeNet segue o padrão IEEE 802.15.4, definindo a separação da pilha de rede em camadas lógicas.

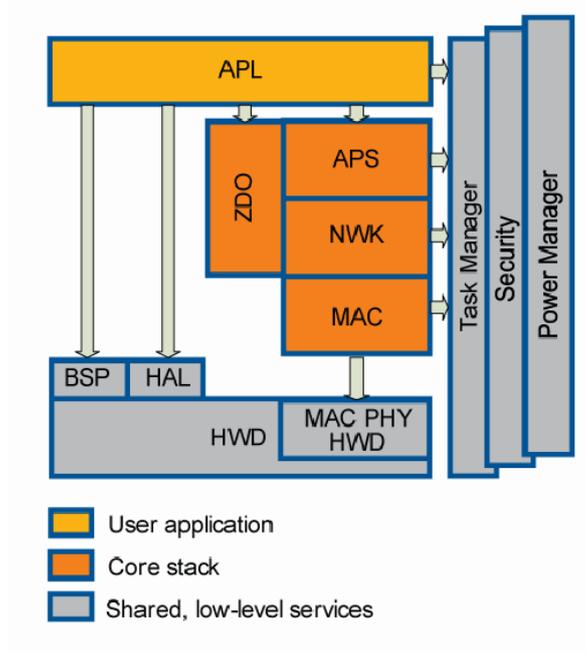


Figura 2.6 Arquitetura da pilha ZigBeeNet

Além da pilha do núcleo contendo implementação do protocolo, o ZigBeeNet contém camadas adicionais de implementação de serviços compartilhados (como gerenciador de tarefas, segurança e gerenciador de

energia) e abstrador de hardware (camada HAL) [7], que ajudam a reduzir a complexidade da aplicação.

O ZigBeeNet torna o hardware mais flexível pois é possível implementar os três tipos de funcionalidades em um único módulo. Por ser um sistema embarcado com restrições de memórias significativas, não podendo haver um sistema operacional completo, este sistema é dirigido por eventos, assim o fluxo do programa é encaminhado de acordo com o acontecimento dos eventos. Na programação, o aplicativo do usuário fornece as camadas inferiores como um ponteiro de função, que as camadas respondem quando o pedido é atendido[7].

Apenas uma aplicação roda no topo da pilha, assim a demanda por recursos acontece entre a aplicação e as camadas da pilha, que executam seu código no mesmo microcontrolador. Assim o programa deve evitar rotinas muito grandes para que ele consiga atender as funcionalidades dos dispositivos da rede.

3. DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do projeto em si. Por enquanto será apresentado o ambiente de estudos. Posteriormente será apresentada toda a instrumentação utilizada na rede de sensores sem fio e o seu funcionamento.

3.1 AMBIENTE DE ESTUDO

O ambiente de estudo ao qual este projeto pretende atender os seus objetivos previamente apresentados é a sala de reuniões do LARA (Laboratório de Automação e Robótica).



Figura 3.1 Sala de reuniões do LARA.

Nesta sala foi instalado um equipamento de climatização híbrido, desenvolvido por Olmos (2009). O equipamento consiste em um sistema evaporativo e um sistema split convencional que visa o uso racional da energia. Seu funcionamento é descrito em [8].

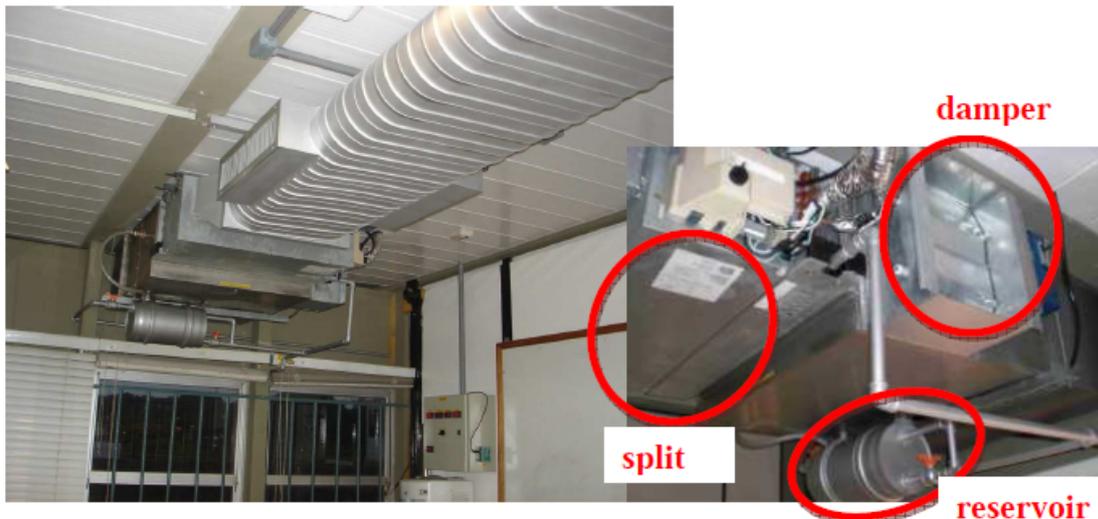


Figura 3.2 Equipamento de climatização híbrido.

O sistema evaporativo, consiste em aumentar a umidade relativa do ambiente, que terá sua temperatura diminuída pelo fato da água retirar o calor do ar para evaporar. A abertura da sala de reuniões com o ambiente vizinho garante que o vapor da água vá para um ambiente exterior. Assim para que se obtenha um menor consumo de energia o sistema evaporativo deverá ter preferência no uso em relação ao sistema de ar condicionado convencional, que consome muito mais energia, porém tendo o compromisso de garantir o conforto térmico aos seus ocupantes.

A proposta original deste projeto era trabalhar com uma rede de sensores e atuadores sem fio utilizando-se de módulos da tecnologia ZigBit, que se comunica com o protocolo ZigBee, conforme os conceitos apresentados no capítulo anterior. Entretanto com problemas que surgiram, de tempo e recursos, não foi possível utilizar a rede. Assim tive que utilizar de outro recurso já disponível no laboratório, que foi o sistema da Full Gauge Controls.

3.4 Sistema de Controle Full Gauge Controls

Entre os diversos componentes utilizados por Olmos (2009) para a construção do equipamento híbrido de climatização, foram utilizados

equipamentos da Full Gauge Controls® para o sistema de medição e controle. Os componentes são listados abaixo:



Figura 3.8 Controlador de Temperatura e Umidade MT-531 Ri Plus



Figura 3.9 Painel elétrico de Controle e Interface de comunicação serial CONV 32.



Figura 3.10 Software de gerenciamento SITRAD.

O sistema possui quatro controladores de temperatura e umidade, e seus sensores são dispostos da seguinte maneira:

- Sala de reuniões;

- Ambiente externo ao LARA;
- Sala vizinha;
- Pós evaporativo.

A comunicação entre os sensores e controladores se dá via RS-485, portanto é necessário a utilização do conversor de interface serial para que se estabeleça a conexão dos instrumentos com o Sitrad. A interligação dos componentes ocorre da seguinte maneira:

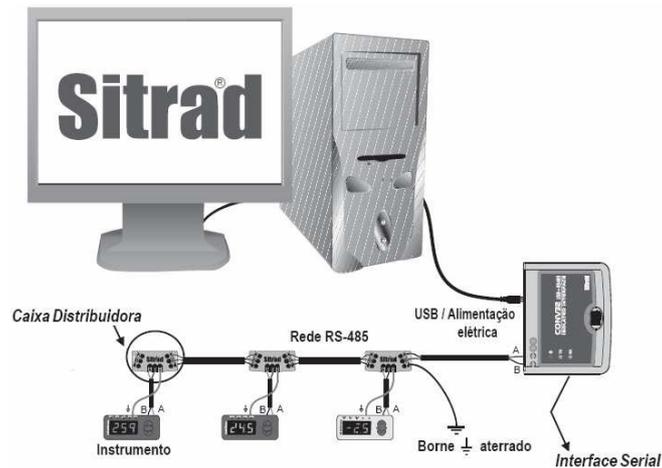


Figura 3.11 Interligação dos Controladores, Interface Serial RS-485 e Computador.

Foi utilizado o software Sitrad versão 4.10, onde é possível exportar os dados referentes às medições feitas, gerar gráficos, relatórios e alterar os parâmetros de controle do sistema. A tela inicial é mostrada na figura 3.12.



Figura 3.12 Software Sitrad.

4. IDENTIFICAÇÃO

O modelamento de um ambiente térmico pode ser considerado muito complexo, visto que ele interage não somente com os ambientes que o circundam, mas também com as pessoas e equipamentos contidos nele. Outro fator determinante é como a dinâmica dos atuadores (refrigerador e umidificador) irão influenciar a dinâmica térmica do ambiente.

Além disso um ambiente térmico tem a propriedade de ser um sistema a parâmetros distribuídos, ou seja, variáveis como temperatura e umidade interagem ao longo de todo o ambiente e possuem valores diferentes aos que são obtidos pelos sensores, que são de parâmetros concentrados.

A identificação proposta neste trabalho visa simplificar este problema propondo um modelo que seja suficientemente satisfatório para que se possa trabalhar de maneira confiável com estratégias de controle do ambiente.

4.1 Captação dos dados

Foi utilizado o sistema de controle da Full Gauge Controls para fazer a captação de dados, via software Sitrad. O ideal seria utilizar um sinal PRBS para fazer o acionamento entre os modos convencional e evaporativo, porém por se tratar de um software comercial seu sistema é fechado e não permite alterar as estratégias de controle. O software permite apenas que o usuário estabeleça os parâmetros de controle do tipo liga/desliga, como está representado na figura 4.1



Figura 4.1 Tela para configuração dos parâmetros no software Sitrad.

Para este experimento foram escolhidos parâmetros de forma aleatória, sem haver qualquer preocupação em direcionar o ambiente a um resultado, apenas para fazer o monitoramento dos acionamentos do compressor e da bomba d'água e as medidas de temperatura e umidade relativa. Os parâmetros são detalhados na tabela a seguir:

Parâmetro	Set-point	Histerese
Temperatura	22 (°C)	1 (°C)
Umidade relativa	55 (%)	5 (%)

Tabela 4.1 Parâmetros de controle do experimento.

Outra condição importante sobre a identificação é a quantidade de dados. Por se tratar de um sistema térmico, onde as constantes de tempos são grandes, é necessário que os dados sejam coletados por um longo período. O experimento se iniciou às 10:33:24 do dia 25/01/2013 e se encerrou às 11:44:30 do dia 30/01/2013, totalizando cinco dias de medições. Os gráficos dos resultados obtidos são mostrados a seguir.

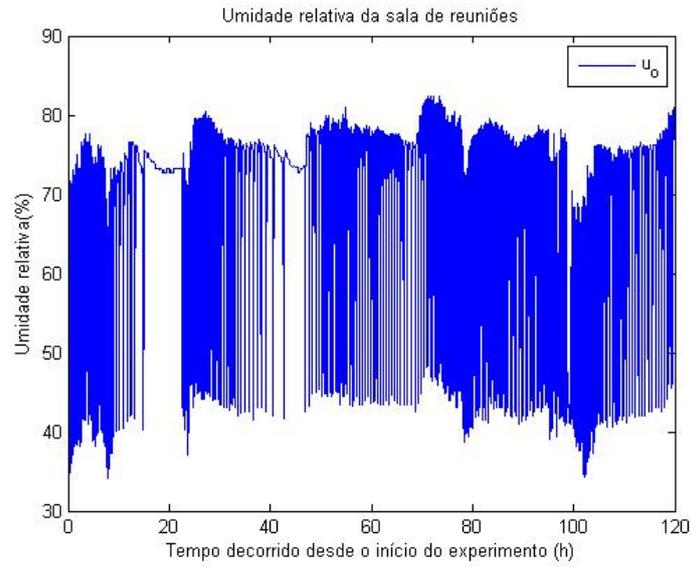


Figura 4.2 Umidade relativa da sala de reuniões.

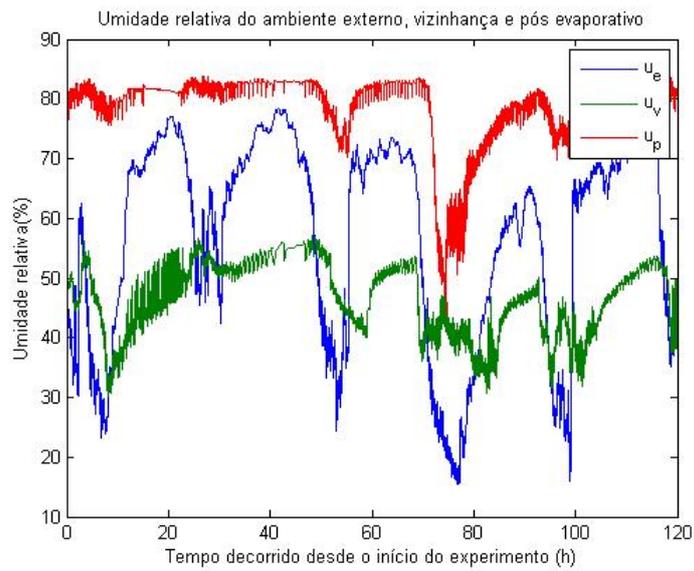


Figura 4.3 Umidade relativa do ambiente externo, sala vizinha e pós-evaporativo.

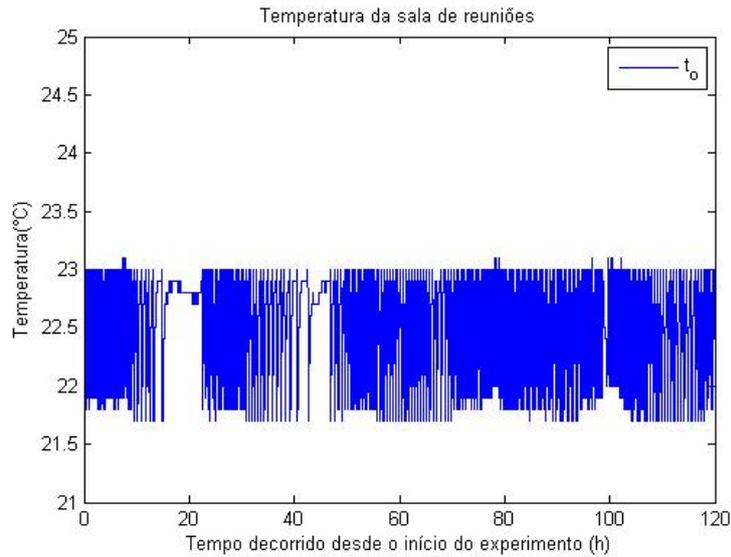


Figura 4.4 Temperatura da sala de reuniões

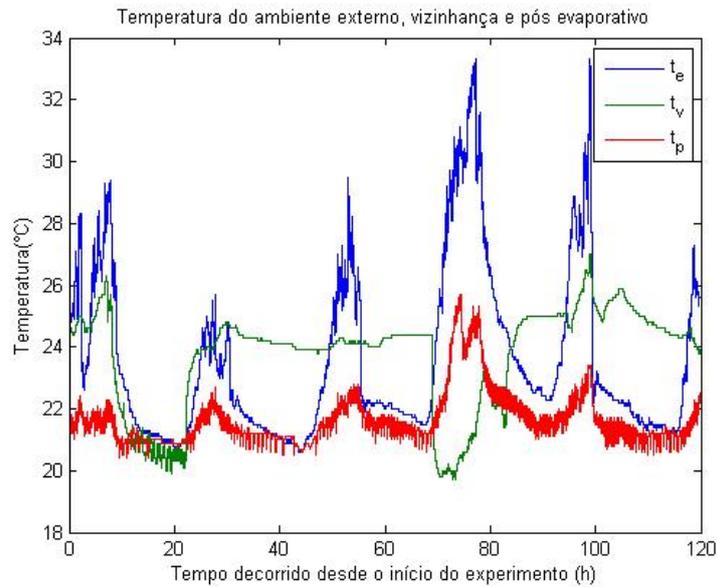


Figura 4.5 Temperatura do ambiente externo, vizinhança e pós-evaporativo.

Ao se analisar os resultados obtidos, é possível observar um comportamento não esperado do ambiente após decorridos 90 horas de experimento, conforme ilustrado na figura 4.6. O sinal Ac se refere ao ciclo de funcionamento no modo convencional.

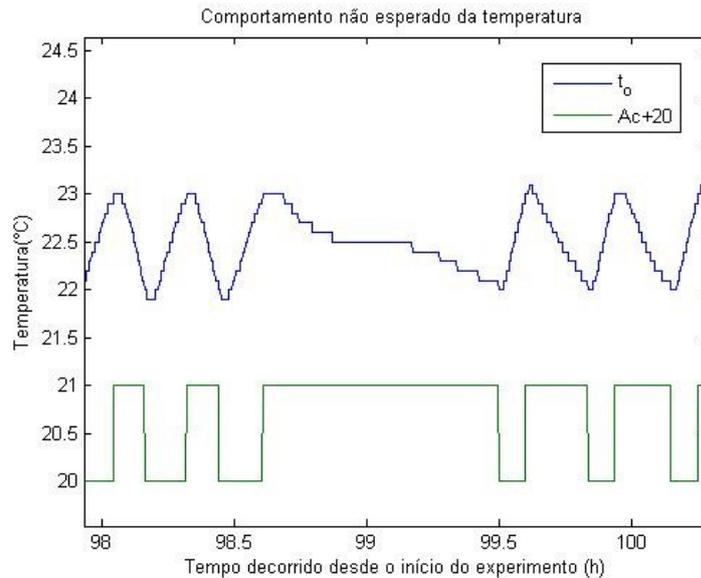


Figura 4.6. Temperatura e acionamento do ar-condicionado.

Mesmo com o ar-condicionado ligado a temperatura na sala demora a abaixar. Isto se deve ao fato de alguém ter entrado na sala de reuniões e ter deixado a porta aberta por algum tempo, gerando uma perturbação no sistema. Esta perturbação deverá causar uma discrepância maior entre temperatura e umidade estimadas e temperatura e umidade medidas, neste instante de tempo.

Em analogia a análise de processos feita via carta psicométrica, é possível traçar um gráfico temperatura versus umidade relativa para observar o comportamento das propriedades termodinâmicas do ambiente de estudo. A figura 4.7 ilustra o comportamento do ambiente do início do experimento até decorridos cerca de 33 minutos.

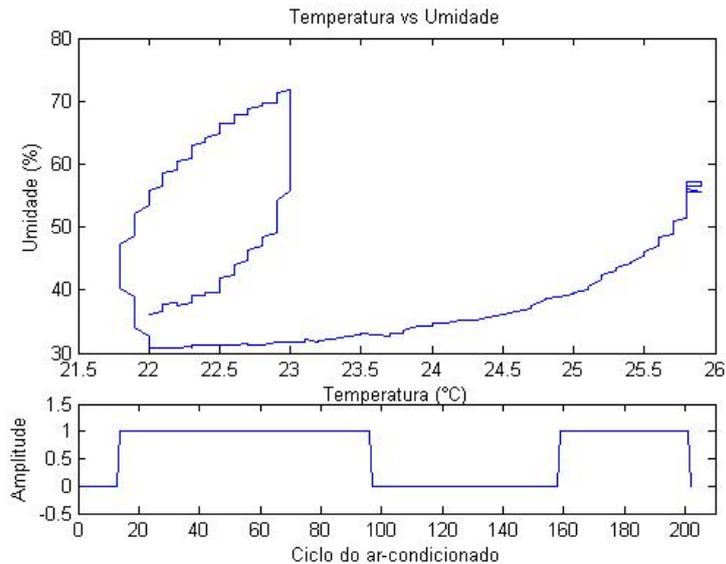


Figura 4.7 Temperatura VS Umidade relativa no início do experimento.

Acompanhando o gráfico do ciclo de funcionamento do ar-condicionado, é possível observar que inicialmente o ambiente se encontrava em uma temperatura muito acima do set-point (cerca de 25,8 °C), e após um breve período de tempo o ar-condicionado é ligado. Após atingir a temperatura de set-point o sistema vai para o modo evaporativo, e volta para o modo convencional quando atinge a temperatura máxima permitida (23 °C). Analisando os dois processos pelo gráfico conclui-se que eles se dividem em dois processos bem distintos:

- Modo convencional: resfriamento e desumidificação;
- Modo evaporativo: aquecimento e umidificação.

Mesmo com o modo evaporativo tendo como característica o aquecimento do ambiente, pode-se tirar proveito dele devido ao fato da evaporação da água retirar calor do ambiente, assim uma alta taxa de umidade relativa pode retardar o instante em que o ambiente chega à temperatura máxima desejável, evitando o uso do ar-condicionado.

Ao final do segundo ciclo de acionamento do ar-condicionado, vemos que a curva termina em um ponto bem próximo no qual ela esteve no ciclo anterior. A partir daí os ciclos entre o modo evaporativo e convencional recomeçam.

O que o algoritmo de controle deseja é que este ciclo se repita enquanto durar o experimento. Porém devido a forte influência dos fatores externos sobre a sala, e a ocorrência de perturbações como a abertura da porta identificada na figura 4.6, este ciclo tende a variar ao longo de todo o experimento. A figura 4.9 mostra estas variações ao longo dos cinco dias de experimento.

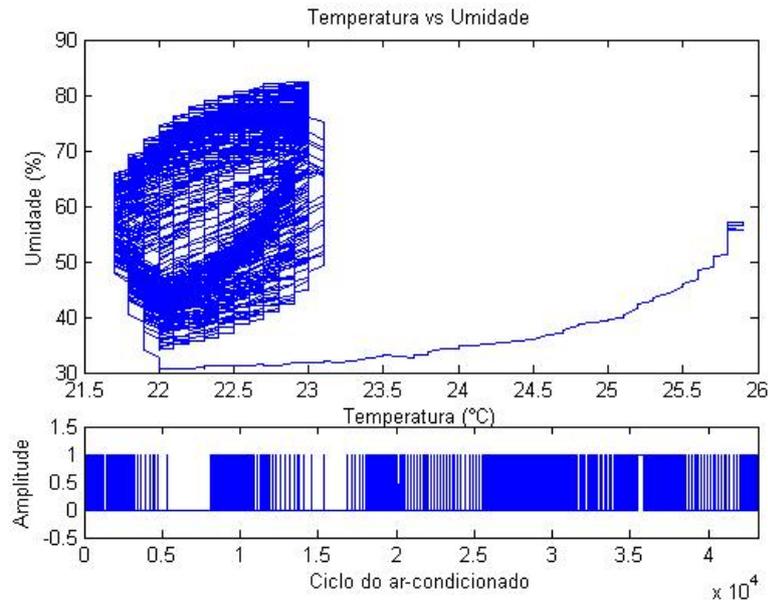


Figura 4.8 Temperatura VS Umidade relativa para todo experimento.

Para se obter um modelo que represente o comportamento deste ambiente, serão utilizadas duas abordagens. Uma identificação caixa-preta, considerando múltiplas entradas e saídas, e outra identificação caixa-cinza, utilizando-se da estruturação do ambiente por princípios fundamentais.

4.2 Identificação caixa-preta

Para esta metodologia de identificação é utilizado o algoritmo n4sid do MATLAB®, que é um estimador de um modelo de espaço de estados que

utiliza do método de subespaços. O modelo no espaço de estados é dado pela equação abaixo:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ke(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + e$$

Onde A, B, C e D são as matrizes de espaço de estados. K é a matriz de perturbação. u(t) é a entrada, y(t) é a saída, x(t) é o vetor de estados e e(t) a perturbação. Todos os elementos das matrizes A, B, C e K são considerados como livre para estimação, e a matriz D é fixada em zero, significando que não há passagem direta das entradas para a saída.

Algoritmos de identificação por subespaços são baseado em conceitos de teoria de sistemas, álgebra linear e estatística [14]. No contexto de identificação de sistemas, o estado do sistema dinâmico é sempre enfatizado. A diferença básica entre o método de subespaço e os métodos clássicos é mostrado na figura 4.10.

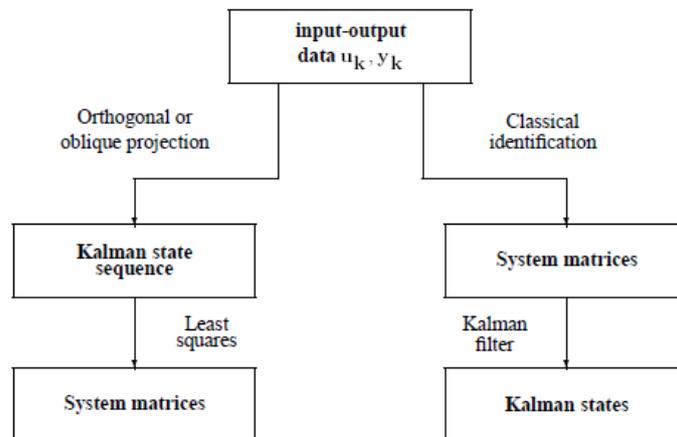


Figura 4.9 Métodos de identificação.

A coluna da esquerda mostra como é feita a identificação por subespaços. Primeiro os estados de Kalman são estimados diretamente dos dados de entrada e saída, utilizando de ferramentas de álgebra linear. Uma vez obtidos esses estados, a identificação se torna um problema de mínimos quadrados linear para as matrizes ainda desconhecidas [14]. Uma possível interpretação da identificação por algoritmo de subespaços é que ele lineariza condicionalmente o problema. Assim este algoritmo não identifica um modelo entrada-saída, e sim um modelo entrada-estado-saída.

4.2.1 Abordagem MISO

Na primeira etapa faremos uma abordagem MISO, que considera múltiplas entradas e uma saída, sendo esta a umidade relativa da sala. Para a função `n4sid` deve ser passado um objeto contendo as variáveis de saída, a variável de entrada e a taxa de amostragem, e a ordem do modelo. São utilizadas seis entradas, $u = [su, u_e, u_v, u_p, t_o, t_p]^t$, sendo `su` o sinal de acionamento do sistema evaporativo. O conjunto de dados é mostrado na figura 4.11. Mesmo a identificação sendo da umidade relativa, sinais de entrada de temperatura apresentaram um bom resultado, devido à influência da temperatura sobre a umidade. Os resultados são mostrados da figura 4.12 à 4.14.

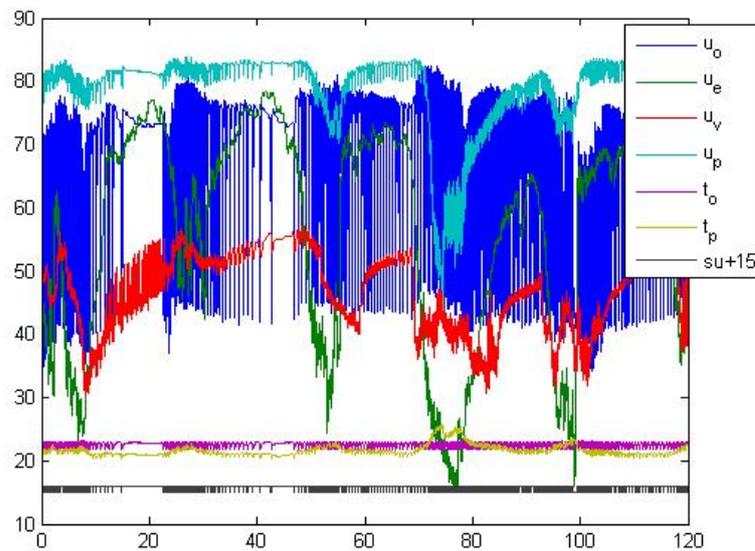
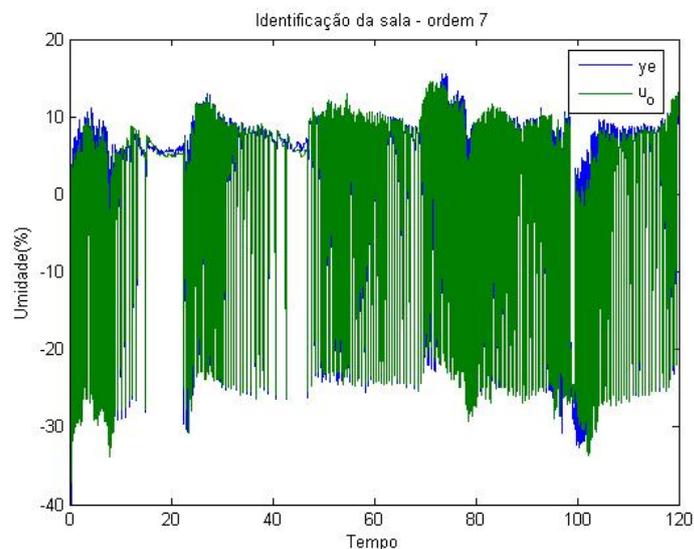


Figura 4.10 Conjunto de dados para identificação MISO.



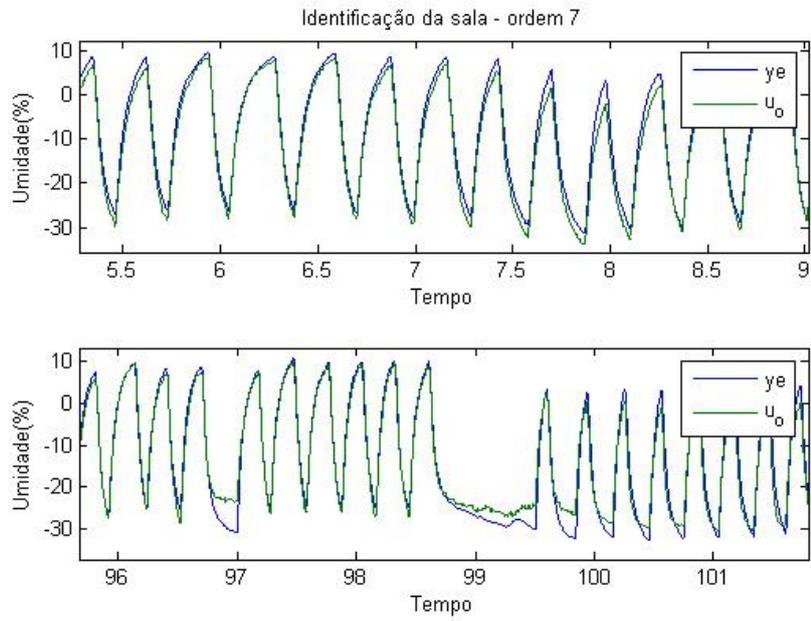


Figura 4.11 Resultados para identificação N4SID MISO.

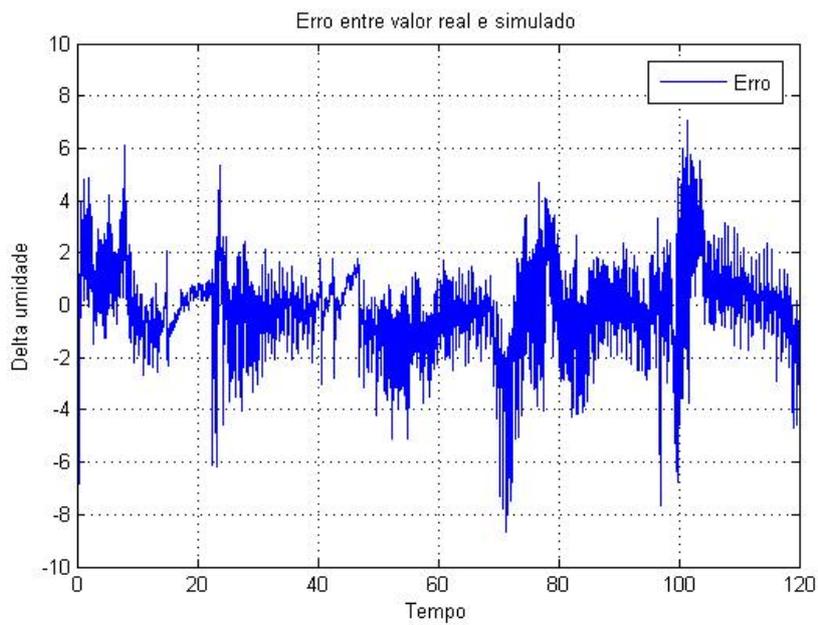


Figura 4.12 Erro entre valor real e simulado para N4SID MISO.

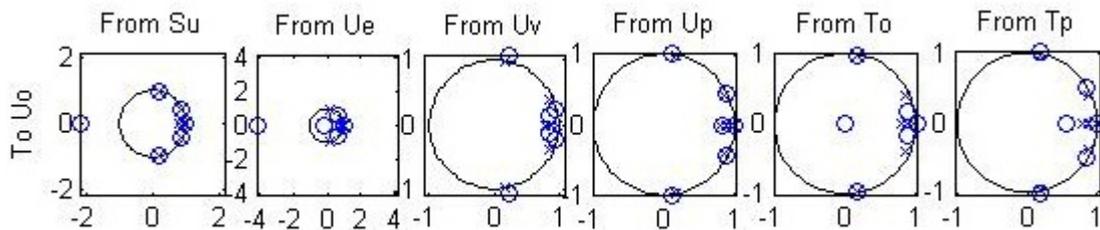


Figura 4.13 Mapa de pólos e zeros das entradas para a saída.

Observa-se pela figura 4.14 que o sistema possui zeros de fase não mínima e pólos complexos, o que não é condizente com o processo real já que a umidade não oscila em malha aberta.

4.2.2 Abordagem MIMO

A função `n4sid` também permite que sejam utilizadas múltiplas saídas. Neste caso $y = [u_o, t_o]^t$. São utilizadas dez entradas, $u = [s_u, u_e, u_v, u_p, sac, t_p, t_e, t_v, t_c, t_{in}]^t$, sendo `sac` o sinal de acionamento do sistema convencional, t_c a temperatura efetiva na entrada do ramo do ar-condicionado e t_{in} a temperatura de inércia (prédio), adotada como a média da temperatura da sala. Os resultados são mostrados da figura 4.15 à 4.17 e na tabela 4.2.

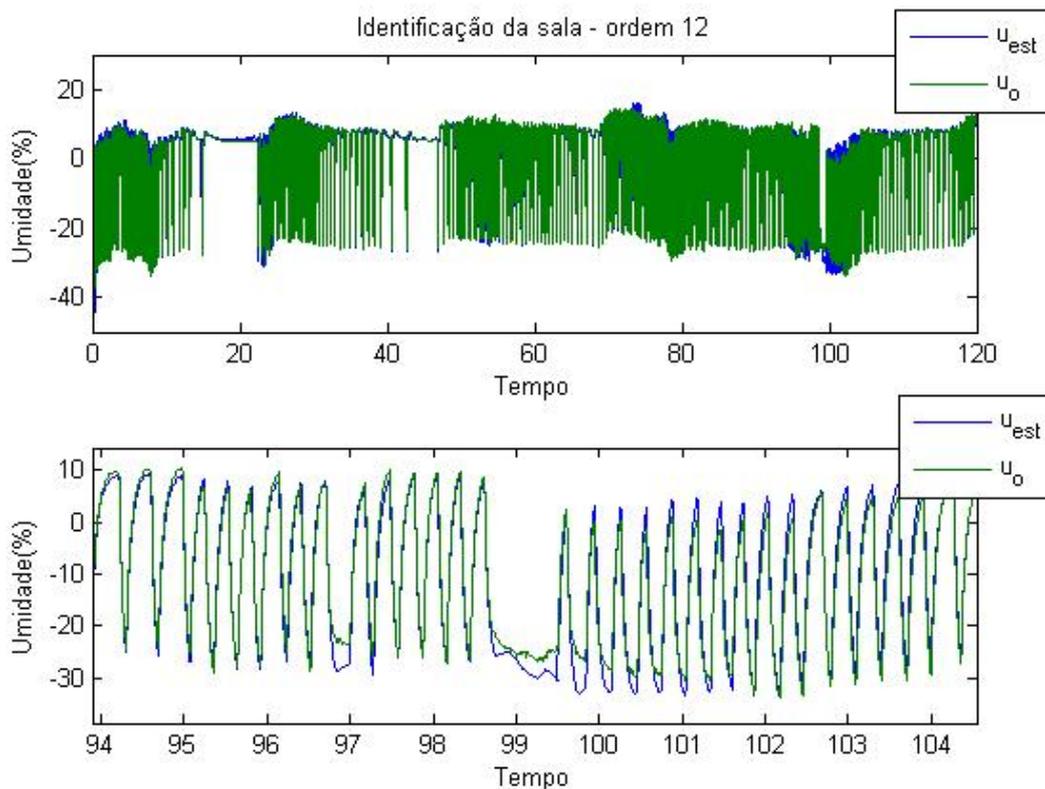


Figura 4.14 Resultado da umidade para N4SID MIMO.

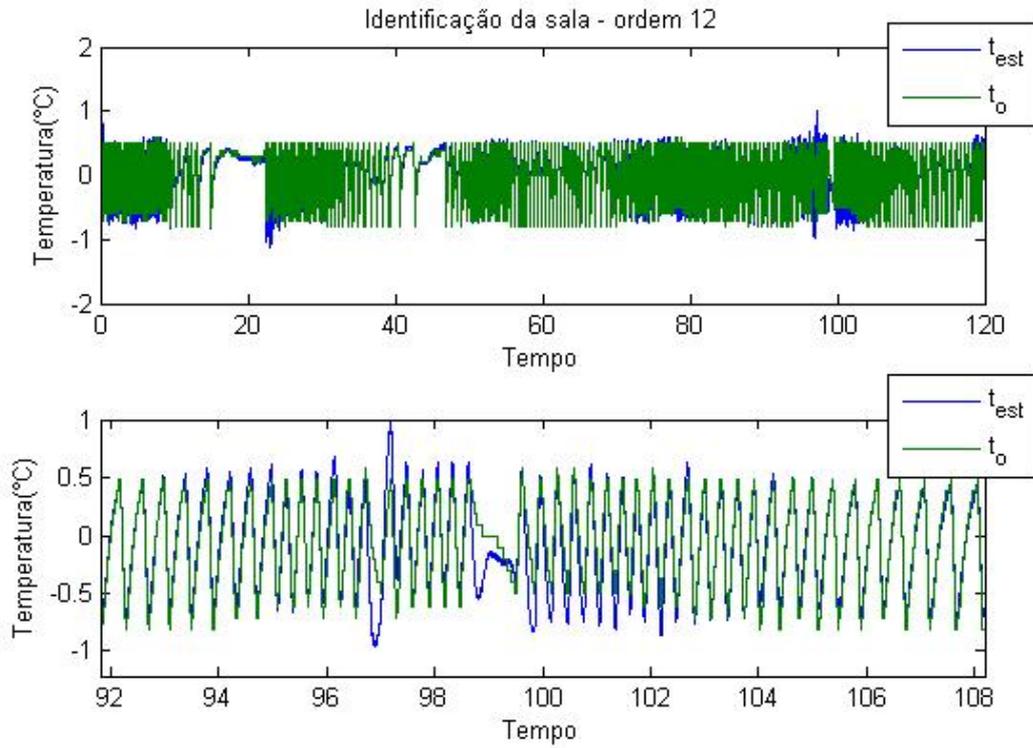


Figura 4.15 Resultado da temperatura para N4SID MIMO.

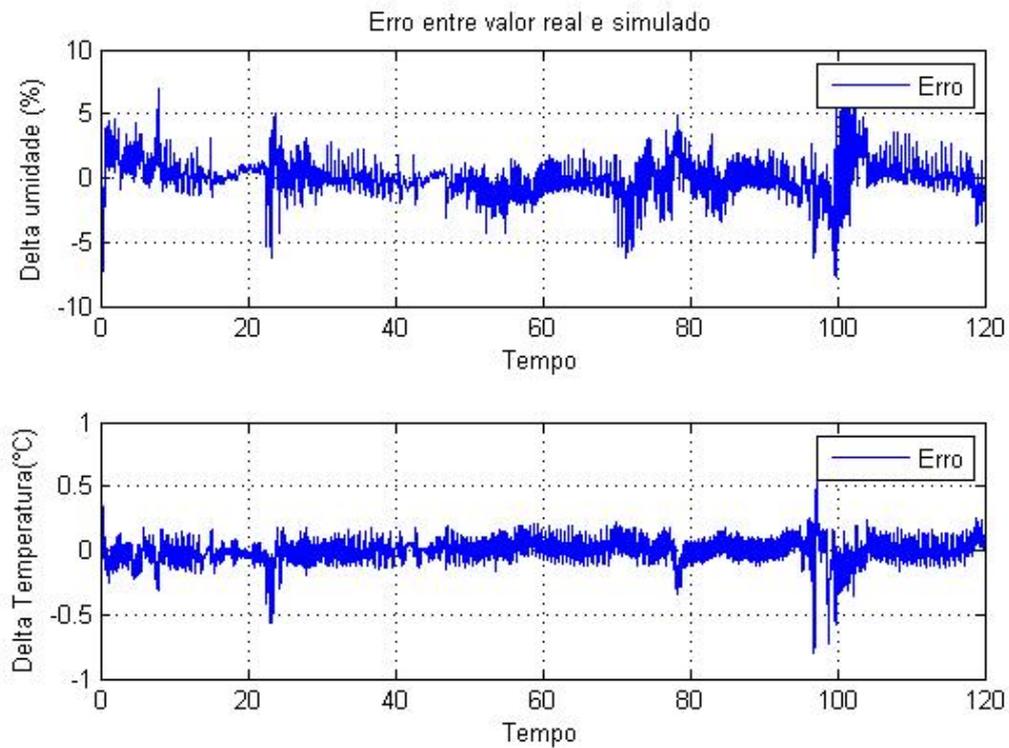


Figura 4.16 Erro entre valor real e medido da umidade e temperatura para N4SID MIMO.

Abordagem	Parâmetro	MQE
MISO	Umidade	1.0052
MIMO	Umidade	0.9050
MIMO	Temperatura	0.0042

Tabela 4.2 Média do quadrado dos erros.

4.3 Identificação caixa-cinza

Na identificação caixa cinza utiliza-se de um conhecimento prévio do sistema. No capítulo 2 deste trabalho foi desenvolvido um modelo estruturado por princípios fundamentais que representa a dinâmica da umidade relativa da sala (figura 2.8).

Para essa identificação foi utilizada a metodologia proposta por Ghiaus em [17]. Para aproveitar do conhecimento do sistema é utilizado o algoritmo idgrey do MATLAB®. Este algoritmo cria um modelo que representa um sistema no espaço de estados, contínuo ou discreto, com parâmetros identificáveis (ou estimáveis) fornecidos previamente. Para a forma discreta o modelo possui a seguinte forma:

$$\begin{aligned}x[k + 1] &= Ax[k] + Bu[k] + Ke[k] \\y[k] &= Cx[k] + Du[k] + e[k]\end{aligned}$$

O ruído $e[k]$ é considerado como desprezível e a matriz K é colocada como nula. O restante das matrizes contém os elementos a serem estimados, podendo alguns deles já serem conhecidos. Nota-se que se o modelo tiver m entradas, p saídas e n estados, um máximo de $(p + m)n$ parâmetros associados a A , B e C podem ser estimados [18].

Os parâmetros desconhecidos (ψ) são estimados pela minimização do erro de predição:

$$V_n(\psi) = \sum_{t=1}^N [y(t) - \hat{y}(t|\psi)]^2$$

O valor mínimo da equação acima, denotado por $\hat{\Psi}_N$, é encontrado de forma iterativa utilizando o método de Gauss-Newton amortecido:

$$\hat{\Psi}_N^{(i+1)} = \hat{\Psi}_N^{(i)} + \mu R_N^{(i)} V_N^T(\hat{\Psi}_N^{(i)})$$

Onde $R_N^{(i)}$ é a matriz de ganho e μ é um fator de ponderação utilizado para normalizar o ganho [19]. Este método requer um valor inicial arbitrário para os parâmetros. Dependendo desse valor as iterações podem não convergir, convergir para um mínimo local ou convergir para o valor

desejado do mínimo global. Assim as estimativas iniciais dos parâmetros devem estar no domínio de atração do mínimo global [18].

A identificação foi dividida em duas etapas. Na primeira procura-se obter o sinal de umidade absoluta após evaporativo (w_p) a partir dos dados da umidade absoluta externa (w_e) e do sinal de acionamento da bomba d'água (w_b).

Na segunda etapa é feita a identificação da umidade absoluta da sala, a partir dos dados de umidade absoluta efetiva do umidificador (w_u) e da umidade absoluta vizinha (w_v). A figura 4.18 mostra o esquema das etapas da identificação, sendo a parte em vermelho para a primeira etapa e a parte em preto para a segunda etapa.

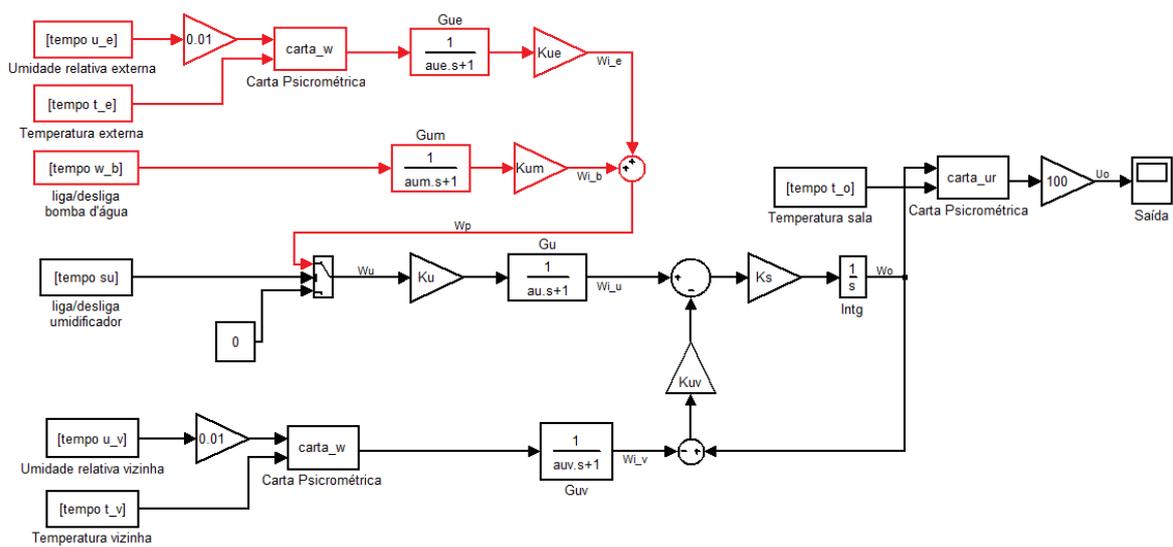


Figura 4.17 Esquema da metodologia de identificação caixa cinza.

A partir do esquema estruturado em vermelho da figura 4.18 é possível obter o modelo de espaço de estados para a primeira etapa. Tomando os estados $x = [w_p \ w_{ie} \ w_{ib}]^t$, em que w_{ie} e w_{ib} representam as umidades absolutas nas saídas das funções de transferência de primeira ordem, temos que:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1/a_{ue} & -1/a_{um} \\ 0 & -1/a_{ue} & 0 \\ 0 & 0 & -1/a_{um} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} K_{ue}/a_{ue} & K_{um}/a_{ub} \\ K_{ue}/a_{ue} & 0 \\ 0 & K_{um}/a_{ub} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

Como o modelo é contínuo, procede-se a discretização. Tomando os termos $-1/a_{ue} = a_1$, $-1/a_{um} = a_2$, $K_{ue}/a_{ue} = b_1$ e $K_{um}/a_{um} = b_2$, tem-se:

$$A_d = e^{AT} = \mathcal{L}^{-1}\{(sI - A)^{-1}\}$$

Onde T é o período de amostragem,

$$A_d = \begin{bmatrix} 1 & e^{a_1 T} - 1 & e^{a_2 T} - 1 \\ 0 & e^{a_1 T} & 0 \\ 0 & 0 & e^{a_2 T} \end{bmatrix}$$

$$B_d = \left(\int_0^T e^{A\tau} d\tau \right) B = \mathcal{L}^{-1} \left\{ (sI - A)^{-1} \frac{1}{s} B \right\}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} \frac{b_1}{a_1} (e^{a_1 T} - 1) & \frac{b_2}{a_2} (e^{a_2 T} - 1) \\ \frac{b_1}{a_1} (e^{a_1 T} - 1) & 0 \\ 0 & \frac{b_2}{a_2} (e^{a_2 T} - 1) \end{bmatrix}$$

$$C_d = C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

O vetor de entradas é dado por $u = [w_e \ w_b]^t$. O conjunto de dados é mostrado na figura 4.19. Aplicando o algoritmo do idgrey obtemos os resultados mostrados nas figuras 4.20 e 4.21.

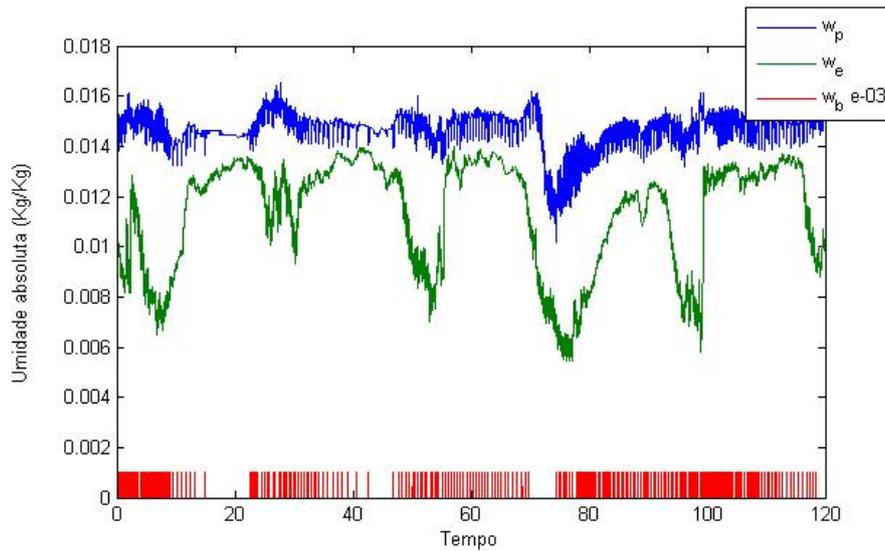


Figura 4.18 Conjunto de dados para identificação caixa cinza para w_p .

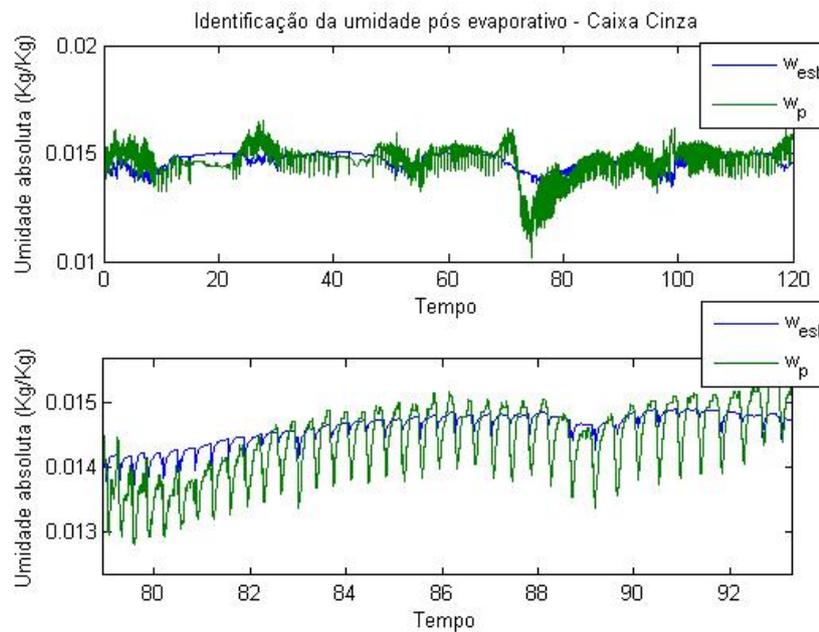


Figura 4.19 Resultado da identificação caixa cinza para w_p .

Obtido o sinal estimado para a umidade absoluta pós evaporativo, este é utilizado para compor o sinal de umidade absoluta efetiva do umidificador (w_u). Este sinal tem valor nulo para quando o sistema está no modo convencional ($su(i) = 0$) e igual a $w_p(i)$ estimado quando o sistema está no modo evaporativo ($su(i) = 1$). O outro sinal necessário para a segunda etapa da identificação é a umidade absoluta da sala vizinha. De acordo com o modelo estruturado da umidade da sala, a umidade vizinha deve possuir valores menores que a umidade da sala, pois a sala perde umidade pelas frestas até que seus valores fiquem próximos, que é quando a sala pára de perder umidade. Porém quando os dados foram colhidos, a janela da sala

vizinha estava aberta, o que possibilitou a troca de fluxo de massa com o ambiente externo, que por se tratar de um período chuvoso fez aumentar e muito a umidade da sala vizinha, que se pode notar pela figura 4.22. Devido a esse fato a umidade absoluta da sala foi adotada como um valor fixo de 0.00789Kg/Kg.

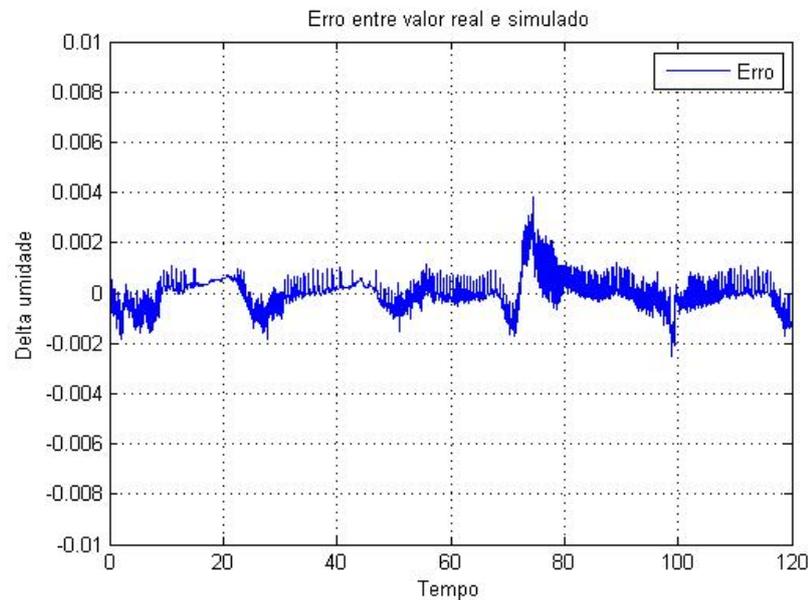


Figura 4.20 Erro entre valor real e simulado da identificação caixa cinza para w_p .

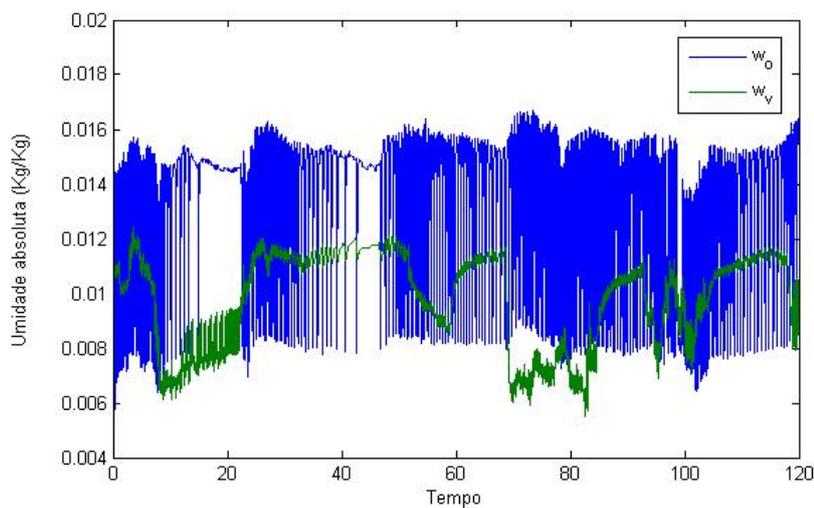


Figura 4.21 Valores de umidade absoluta da sala de reuniões e sala vizinha.

A partir da parte preta da figura 4.18 extrai-se as matrizes de espaço de estado da segunda etapa da identificação. Os estados são $x = [w_o \ w_{iu} \ w_{iv}]^t$, sendo w_{iu} e w_{iv} as umidades absolutas das saídas das funções de transferência de primeira ordem. As matrizes contínuas obtidas são:

$$A = \begin{bmatrix} -K_s K_{uv} & K_s & K_s K_{uv} \\ 0 & -1/a_u & 0 \\ 0 & 0 & -1/a_{uv} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K_u/a_u & 0 \\ 0 & 1/a_{uv} \end{bmatrix}$$

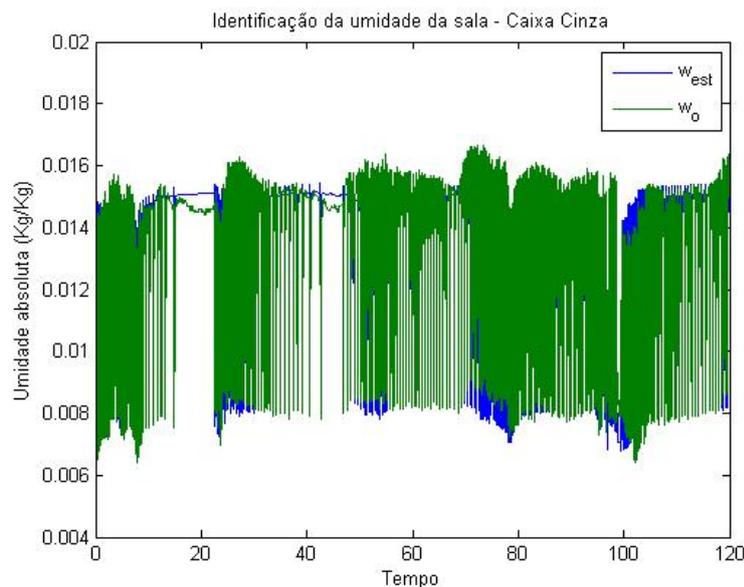
$$C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

Tomando os termos $-1/a_u = a_1$, $-1/a_{uv} = a_2$, $-K_s K_{uv} = b_1$, $K_s = b_2$ e $K_u/a_u = b_3$, e fazendo a discretização temos:

$$A_d = \begin{bmatrix} e^{b_1 T} & \frac{b_2(e^{a_1 T} - e^{b_1 T})}{a_1 - b_1} & \frac{-b_1(e^{a_2 T} - e^{b_1 T})}{a_2 - b_1} \\ 0 & e^{a_1 T} & 0 \\ 0 & 0 & e^{a_2 T} \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} b_2 b_3 \left[\frac{1}{a_1 b_1} + \frac{e^{a_1 T}}{a_1^2 - a_1 b_1} - \frac{e^{b_1 T}}{b_1 a_1 - b_1^2} \right] & 1 + \frac{1}{b_1 - a_2} (a_2 e^{b_1 T} - b_1 e^{a_2 T}) \\ \frac{b_3}{a_1} (e^{a_1 T} - 1) & 0 \\ 0 & 1 - e^{a_2 T} \end{bmatrix}$$

Os resultados da identificação são mostrados nas figuras 4.23 e 4.24.



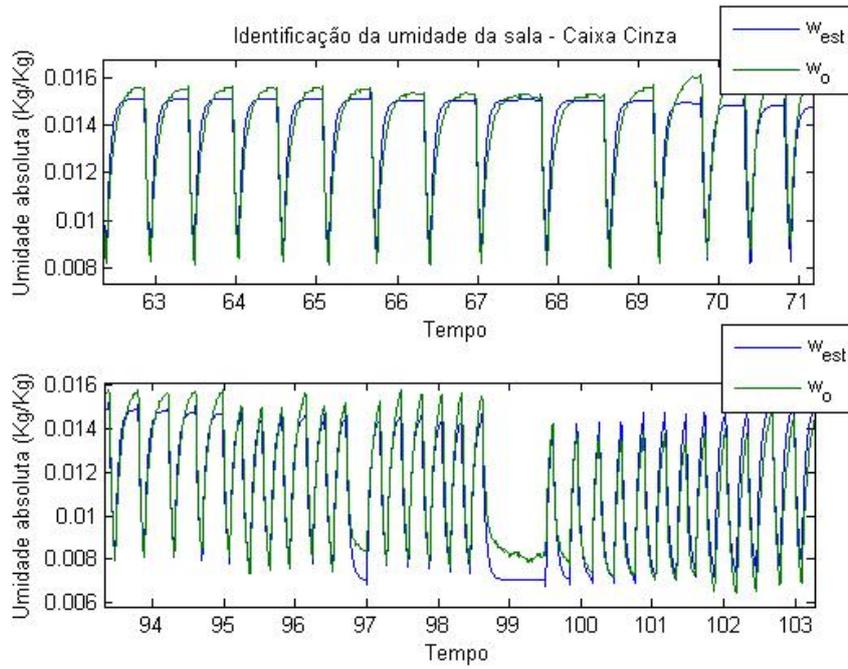


Figura 4.22 Resultado da identificação caixa cinza para w_o .

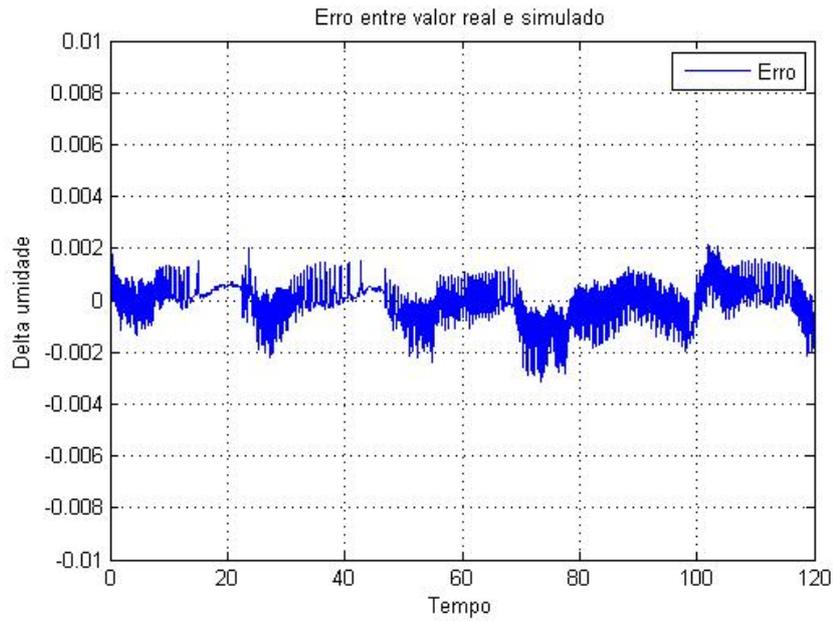


Figura 4.23 Erro entre valor real e simulado da identificação caixa cinza para w_o .

Com as matrizes obtidas pelo algoritmo foram encontrados os seguintes parâmetros:

i	u	uv	ue	um	s
a_i	168,501	164,959	80,8223	171,692	-
K_i	2,1905	3,7757	0,1513	-0,003	0,0292

Tabela 4.3 Parâmetros obtidos pelo idgrey.

As constantes de tempo são da ordem de minutos, o que a princípio é plausível com um sistema térmico.

Ao se realizar o processo de identificação com o algoritmo idgrey aconteceram os três possíveis resultados da iteração do método de Gauss-Newton amortecido. Com os valores iniciais escolhidos de forma arbitrária, obteve-se um modelo instável (não convergiu), outro com valores muito distantes dos dados reais (convergiu para um valor mínimo local) e após o ajuste dos valores iniciais se obteve um modelo com os valores desejados, ou seja, que convergiram para o mínimo local.

Observando o resultado para a primeira etapa da identificação, o sinal estimado para a umidade absoluta pós evaporativo ficou um pouco distante do sinal real medido. Fazendo uma comparação entre os dois sinais, ambos obtiveram praticamente o mesmo resultado quando aplicados como entrada para a segunda etapa da identificação. De fato, como se pode analisar nos gráficos, as grandes oscilações que ocorrem com o sinal medido w_p não acontecem com a umidade absoluta da sala (w_o).

Com a segunda etapa da identificação mostra-se que é possível obter um modelo que tenha um significado físico e que apresente bons resultados, podendo ser aproveitado para outros conjuntos de dados, já que os parâmetros obtidos refletem os parâmetros físicos do ambiente em estudo. Isso já não acontece com a identificação caixa preta, que, como foi visto pelo mapa de pólos e zeros, o modelo não é condizente com um processo real, e a identificação dos parâmetros varia a cada novo conjunto de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.master.iag.usp.br/conforto/oqueeh.php>
- [2] Lamberts, R.; Xavier, A. A. de P. Conforto térmico e stress térmico. 111 p. Florianópolis, 2002.
- [3][14] INDRIA, Y. Design of an individual mobile measurement of thermal comfort. 2006. 51 p. Tese de mestrado. Universidade de Kaiserslautern, Alemanha.
- [4] Aguirre, L. A. (2007). Introdução à Identificação de Sistemas - técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais, 3a ed. Editora UFMG, Belo Horizonte.
- [5] Saleiro, M.; Ey E. ZigBee - Uma abordagem prática. Universidade de Algarve
- [6] MESHNETICS (2008). “ZigBit™ Development Kit 2.0 User’s Guide”.
- [7] MESHNETICS (2008). "ZigBeeNet Developer's Guide”.
- [8] Olmos, C. C. (2009). *Sistema híbrido de climatização visando conforto térmico e eficiência energética*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 81p.
- [9] Bauchspiess, A., Ishihara, J. Y., Felgner F. e Litz L. (2006). “First-Principles Structured Identification for Predictive HVAC Control”, CLCA2006, Salvador, 6pp.
- [10] Fraisse, G., Viardot, C., Lafabrie, O., Archand, G. (2002). Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy, *Energy and Buildings* 34(2002) 1017-1031.
- [11] Bourhan Tashtoush, M. Molhim, M. Al-Rousan (2004). Dynamic model of an HVAC system for control analysis, Elsevier (2005).
- [12] Fanger, P. O. (1970). “Thermal Comfort”, McGraw-Hill Inc., New York, USA.
- [13] Jones, W. P. (1983) Engenharia de Ar Condicionado – Rio de Janeiro : Campus.

- [14] van Overschee, P., and B. De Moor, *Subspace Identification of Linear Systems: Theory, Implementation, Applications*, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [15] Dossat, Roy J. (1980) *Princípios de Refrigeração*. Hemus, São Paulo.
- [16] A.K. Singh, H. Singh, S.P Singh, R.L. Sawhney (2002) Numerical calculation of psychrometric properties on a calculator. *Building and Environment*.
- [17] C. Ghiaus, A. Chicinas, C. Inard (2005) Grey-box identification of air-handling unit elements. *Control Engineering Practice* 15(2007) 421-433.
- [18] Parrilo, P., & Ljung, L. (2003). Initialization of physical parameter estimates. Linköping, Sweden: Linköping Universitet p. 9.
- [19] Ljung, L. (1999). *System identification—Theory for the user*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR.