

CAPA TEMPORÁRIA

A CAPA DO TEMPLATE É FEITA NUM ARQUIVO SEPARADO

DANILO SANTOS CARDOSO

29 de novembro de 2016

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	1
<b>2</b>	<b>Fundamentos Teóricos</b>	<b>3</b>
2.1	Conforto térmico	3
2.2	Psicrometria	5
2.3	Sistemas de climatização	10
<b>3</b>	<b>Planta</b>	<b>16</b>
3.1	Construção do sistema base - 2009	16
3.2	Novo sistema de controle usando openHAB - 1/2016	28
<b>4</b>	<b>Modelo do sistema</b>	<b>41</b>
4.1	Temperatura	42
4.2	Umidade	48
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>51</b>
5.1	Expansões do sistema de controle - 2/2016	51
5.2	Melhorias no funcionamento remoto	55
5.3	Testes preliminares	60
5.4	Controle PID	62
5.5	Controladores Projetados	64
5.6	Resultados	64
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>66</b>

# Lista de Tabelas

2.1	Valores permissíveis para as variáveis físicas para maior conforto térmico no Brasil	5
2.2	Composição do ar seco . . . . .	6
2.3	Vantagens e desvantagens dos sistemas de climatização . . . . .	15
3.1	Modos de funcionamento do sistema de controle da Full-Gauge . . . . .	17
3.2	Resultados 2009 - Parâmetros de controle do modo REF . . . . .	27
3.3	Resultados 2009 - Temperatura (resumido) . . . . .	27
3.4	Resultados 2009 - Umidade (resumido) . . . . .	28
3.5	Resultados 2009 - Consumo Energético (resumido) . . . . .	28
3.6	Características do sensor DHT22 . . . . .	34

# Lista de Figuras

2.1	Relação entre o corpo humano e o ambiente (Silva, 2004) . . . . .	3
2.2	Valores do PPD . . . . .	4
2.3	Relação entre o PMV e PPD . . . . .	5
2.4	Carta Psicrométrica - ASHRAE . . . . .	8
2.5	Carta Psicrométrica simplificada . . . . .	9
2.6	Ciclo do ar-condicionado - Creder 2000 . . . . .	11
2.7	Exemplo de ar-condicionado split com duas unidades . . . . .	12
2.8	Utilização de uma torre de resfriamento para resfriamento de água . . . . .	13
2.9	Sistema de resfriamento evaporativo RED (CAMARGO, 2004, p. 70 ) . . . . .	13
2.10	Sistema de resfriamento evaporativo REI (CAMARGO, 2004, p. 70 ) . . . . .	13
3.1	Diagrama de força do sistema de climatização da sala de reuniões do LARA . . . . .	17
3.2	Planta baixa do sistema de climatização da sala de reuniões do LARA . . . . .	19
3.3	Vista de corte do sistema de climatização da sala de reuniões do LARA . . . . .	20
3.4	Sistema Híbrido montado . . . . .	21
3.5	Posicionamento dos sensores na montagem original do sistema . . . . .	22
3.6	Esquema elétrico do controlador da Full-Gauge . . . . .	23
3.7	Painel de controle da Full-Gauge . . . . .	23
3.8	Sistema supervisorio da Full-Gauge . . . . .	23
3.9	Figura do sistema de ar condicionado instalado, um split da marca Carrier . . . . .	24
3.10	Manta de papel kraft da Munters . . . . .	24
3.11	Montagem do sistema evaporativo . . . . .	25
3.12	Vista interna do setor 3 da planta baixa com o retorno de ar interno aberto. . . . .	25
3.13	Eficácia prometida do sistema de resfriamento evaporativo (Ecobrisa, 2009) . . . . .	26



3.14	Evolução no tempo da temperatura e umidade da sala no modo REF . . . . .	27
3.15	Estrutura do openHAB . . . . .	29
3.16	Exemplo de rede usando o protocolo MQTT . . . . .	31
3.17	Quadro de comando - 2016 . . . . .	32
3.18	Atuador para damper, modelo AM-2001, 24 Vac x 0-10Vcc . . . . .	33
3.19	Sensor DHT-22 . . . . .	34
3.20	Raspberry Pi . . . . .	35
3.21	Arduino Mega 2560 . . . . .	36
3.22	Esquema da rede implementada . . . . .	37
3.23	Esquema de comunicação entre os dispositivos da rede . . . . .	39
3.24	Interface com o usuário . . . . .	40
4.1	Modelo Completo - Pedro Ivo, imagem maior em anexo . . . . .	41
4.2	Malha de temperatura . . . . .	43
4.3	Comparação do modelo com o sistema real - 07-09 de novembro . . . . .	45
4.4	Comparação do modelo com o sistema real - 18 de outubro . . . . .	45
4.5	Comparação do modelo com o sistema real - 10-12 de outubro . . . . .	46
4.6	Malha fechada de temperatura . . . . .	48
4.7	Modelo da umidade . . . . .	48
4.8	Modelo da umidade . . . . .	50
5.1	Implementação física do Arduino . . . . .	52
5.2	Situação em que a atuação não chega no sistema real . . . . .	53
5.3	Utilização local do Raspberry Pi como computador . . . . .	56
5.4	Login via SSH . . . . .	57
5.5	Acesso de pastas via SAMBA . . . . .	57
5.6	Acesso aos dados do sistema via MySQL pela linha de comando . . . . .	58
5.7	Acesso aos dados do sistema via MySQL por um aplicativo do Matlab . . . . .	58
5.8	Acesso remoto ao Raspberry Pi . . . . .	59
5.9	Acesso remoto ao sistema openHAB . . . . .	60
5.10	Resultado da atuação do compressor . . . . .	61
5.11	Resultado da atuação da bomba d'água . . . . .	61

---

5.12 Interface para ajuste do controlador . . . . .	63
5.13 Acompanhamento diário da temperatura . . . . .	64
5.14 Acompanhamento diário da umidade . . . . .	65

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

O controle de sistemas de climatização é uma aplicação de interesse em diversas situações. Desde o conforto térmico em ambientes com pessoas, até situações sem pessoas como salas com computadores, laboratórios, frigoríficos, armazenamento de grãos entre outras situações.

A maior parte das implementações de climatização residencial e predial brasileiras só leva em conta a temperatura, geralmente utilizando um ar-condicionado, ignorando completamente o impacto da umidade e outras variáveis de interesse, mesmo em situações em que elas afetam de forma intensa a produtividade individual. Um exemplo local sendo a baixa umidade presente em Brasília em certos períodos do ano. Este trabalho busca um controle de climatização mais abrangente, que mantenha tanto a temperatura quanto a umidade de uma sala em níveis adequados para o conforto dos usuários.

Uma segunda motivação é a busca por eficiência energética. Já é uma situação conhecida que existe uma demanda crescente por energia elétrica no país e melhorias na eficiência da energia podem amenizar o crescimento dessa demanda, gerando benefício tanto em escala global reduzindo o impacto ambiental além de retorno financeiro na forma de redução de custos para os indivíduos.

### 1.2 Objetivos

O sistema já implementado no Laboratório de Automação e Robótica (LARA) da UnB, inclui um ar-condicionado de grande potência e um sistema evaporativo que usa uma bomba d'água e uma manta porosa para umidificar o ar que vem de fora do ambiente. Ambos os sistemas funcionam com modo liga-desliga. Historicamente, apenas o ar-condicionado tem sido utilizado devido à temperatura ser a variável de maior impacto no bem-estar e ser mais simples de trabalhar que a umidade, além de possuir uma literatura extensa e ter comportamento mais linear do que a

umidade relativa.

Nesse contexto, o objetivo principal do trabalho é exercer um controle eficaz tanto de temperatura e umidade do ambiente de forma a melhorar o conforto de todos os usuários presentes e futuros do LARA.

Objetivos secundários do trabalho incluem:

1. **Busca por eficiência energética.** Projetos anteriores buscaram melhorias no consumo energético do sistema, mas possivelmente o novo controle pode ser ainda mais eficaz, devido ao fato de que o uso próprio do sistema evaporativo deve diminuir a necessidade do acionamento do ar condicionado e isso pode gerar uma economia energética adicional.
2. **Melhoria dos modelos já existentes do sistema.** O modelo de temperatura do sistema tem sido aperfeiçoado com cada trabalho novo feito, mas o modelo de umidade não sofreu os mesmos testes pois os projetos geralmente se limitam ao controle de temperatura e assim, fazer uma validação do sistema de umidade e da interferência de um sistema no outro são informações novas sobre o sistema que futuros trabalhos podem se aproveitar.
3. **Melhorias no sistema de automação implementado do laboratório.** Sugere-se que o sistema de automação tenha interface simples para o usuário comum, que o sistema tenha componentes conectados por rede de internet, um banco de dados com informações históricas sobre as variáveis de interesse e que o próprio sistema permita acesso remoto via internet, dada uma senha de acesso adequada à um usuário comum.

## Capítulo 2

# Fundamentos Teóricos

### 2.1 Conforto térmico

O conforto térmico é definido como “um estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico que envolve uma pessoa (nem quente nem frio)”, segundo a ISO 7730.

Essa definição e todas as definições que seguem por essa vertente indicam que o conforto térmico é algo que varia de pessoa para pessoa, dependendo de fatores objetivos (temperatura do ar, velocidade do vento, umidade do ar, entre outros) que cada indivíduo dá um peso diferente, além de fatores individuais difíceis de medir (metabolismo, hábitos, preferências, atividade em execução, etc).



Figura 2.1: Relação entre o corpo humano e o ambiente (Silva, 2004)

Assim, não existe um conjunto de fatores ótimo que garante o conforto térmico de todos. Baseado nisso foram definidos dois índices PMV (Predicted Mean Vote ou Voto Médio Predito) e PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied ou Percentagem Prevista de Insatisfeitos) pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers), que buscam

o conjunto de valores para as variáveis físicas do ambiente que vão gerar o melhor conforto médio para todos os indivíduos.

As variáveis de interesse para essas métricas são:

1. Umidade relativa do ar
2. Temperatura do ar
3. Temperatura radiante média
4. Velocidade do ar
5. Nível de atividade
6. Índice de vestimenta

A relação entre os dois índices, indicada na imagem 2.3 relaciona os índices de forma que quando o ambiente fica muito quente ou muito frio o percentual de insatisfeitos sobe e existe um ponto de mínimo de insatisfeitos e esse é o ponto ideal para o sistema.

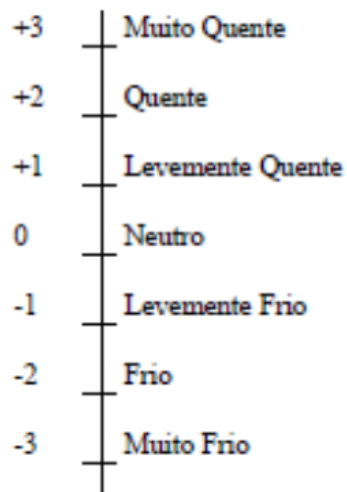


Figura 2.2: Valores do PPD

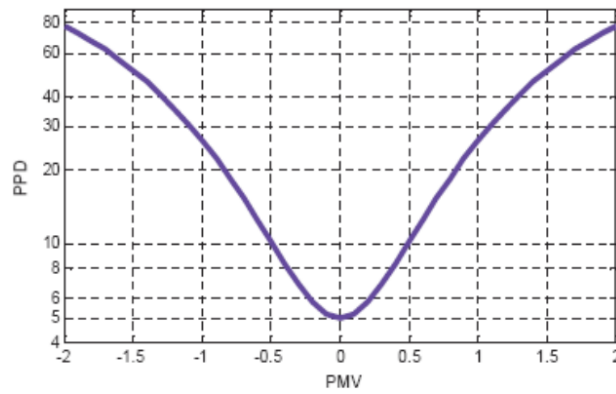


Figura 2.3: Relação entre o PMV e PPD

Seria necessário fazer pesquisas de opinião entre os usuários do laboratório para obter uma faixa de valores de alta aceitação, mas a norma ABNT NBR 16401-2 cita os parâmetros da tabela 2.1 como a região de interesse para garantir um baixo índice de insatisfeitos com o clima e para o escopo deste trabalho, é perfeito pois são exatamente as duas variáveis de interesse e remove a necessidade de pesquisas recorrentes de opinião, especialmente visto que os usuários do laboratório mudam com o tempo.

Estação do ano	Temperatura	Umidade Relativa
Verão	23.5 - 25.5 °C	35-65%
Inverno	21.5 - 23.0 °C	30-60%

Tabela 2.1: Valores permissíveis para as variáveis físicas para maior conforto térmico no Brasil

## 2.2 Psicrometria

A psicrometria é o ramo da ciência dedicado à análise das propriedades físicas e termodinâmicas das misturas entre gases e vapor, sendo assim indispensável para a análise quantitativa dos sistemas de climatização que levem em conta a umidade. Essa ciência não é estudada à fundo durante o curso de engenharia mecatrônica, então ao fazer a revisão teórica o foco principal é servir como introdução para um texto mais complexo e foi feita uma tentativa extensa para ajudar no entendimento do tema e conhecimento de certos jargões para servir como introdução para um texto mais profundo sobre este tema complexo.

### 2.2.1 Ar seco e vapor d'água

O ar atmosférico é uma mistura de gases e vapor de água. O ar seco (ar sem mistura de água) é composto principalmente de nitrogênio e oxigênio mas tem vários outros gases em sua composição. A tabela 2.2 traz mais detalhes sobre a composição do ar seco.

Componente	Fórmula Química	Composição (Volume)
Nitrogênio	$N_2$	78.084%
Oxigênio	$O_2$	20.984%
Argônio	$Ar$	0.934%
Dióxido de Carbono	$CO_2$	0.033%
Outros	-	0.001%

Tabela 2.2: Composição do ar seco

Somado ao ar seco, que é bastante estático em sua composição, entra o vapor d'água. Este varia bastante no tempo e na região do espaço. Normalmente compõe o ar em termos de massa de próximo à 0% até próximo de 5% dependendo de pressão, temperatura além do óbvio fator geográfico.

### 2.2.2 Umidade absoluta e relativa

A **umidade absoluta** no ar é a relação entre a massa de vapor d'água no ar atmosférico para o volume deste ar atmosférico, expresso em kg/L. Em certas situações, dado o volume conhecido, a umidade absoluta é a quantidade de água que pode ser removida do ar. Outra medida similar é a **umidade específica** que é a razão entre a quantidade de massa de água no ar atmosférico para a massa do ar atmosférico e usualmente expressa em kg de água por kg de ar.

A umidade relativa do ar é a quantidade de água presente no ar no momento, sobre a quantidade máxima de água que o ar pode absorver neste mesmo momento. O ar seco à uma certa temperatura e pressão sempre pode ser misturado à uma determinada quantidade de água, sem causar insaturação. Assim, alterações em qualquer uma dessas duas grandezas causam variação na umidade relativa do ar mesmo que a umidade absoluta não mude.

Uma medida às vezes utilizada é a **razão de mistura**  $w$ . Esta é a razão entre o massa de úmido e a massa ar seco (levemente diferente da umidade específica que divide pelo ar atmosférico).

$$U_{abs} = \frac{m_{agua}}{V_{ar}} \quad (2.1)$$

$$U_{esp} = \frac{m_{agua}}{m_{agua} + m_{arseco}} \quad (2.2)$$

$$w = \frac{m_{agua}}{m_{arseco}} \quad (2.3)$$



Usando a lei de Dalton das pressões parciais, é possível separar a pressão parcial do vapor d'água da pressão do ar seco. A pressão máxima do vapor d'água (para uma determinada temperatura) é chamada de  $p_{vs}$  e ela varia com a temperatura do ar. Usando essa grandeza e chamando a pressão parcial da água  $p_v$ , é possível definir a umidade relativa do ar como sendo o percentual da pressão parcial máxima da água atingida no momento.

Essa pressão é relevante para certas aplicações, pois esta pressão é um dos fatores (além de temperatura, velocidade do vento, etc.) ligados à taxa de evaporação da água líquida e portanto é relevante para previsão de chuvas e para o controle de irrigação.

$$UR\% = 100 \frac{p_v}{p_{vs}} \quad (2.4)$$

A água contida no ar pode transicionar para o estado líquido no processo de condensação. A condensação ocorre principalmente quando o ar esfria e assim, a mistura de ar seco e vapor d'água e torna insaturada e isso força que parte do vapor d'água se torne líquido. Exemplos desse fenômeno são o orvalho e a água que escorre do lado de fora de um recipiente gelado.

Uma fórmula empírica para calcular a pressão parcial do vapor d'água e função da temperatura é a equação de Tetens 2.5. Essa equação, calcula a pressão parcial em Pa com a temperatura  $t$  informada em °C.

$$e_s = 610.8 e^{\frac{7.5t}{237.3+t}} [Pa] \quad (2.5)$$

### 2.2.3 Propriedades de temperatura

Existem duas formas de medir temperatura. A usual, usando um termômetro comum, que é chamada de **temperatura de bulbo seco** e uma segunda forma chamada de **temperatura de bulbo úmido**. A temperatura de bulbo úmido, conhecida como TBU é medida com o termômetro envolvido em uma malha porosa e úmida (de forma usual, algodão) de forma a permitir a evaporação do vapor d'água de sua malha e essa evaporação consome calor, resultando em uma temperatura medida menor do que a de bulbo seco.

Em um ambiente com 100% de umidade relativa, não há evaporação, pois o ar já está saturado de vapor d'água, e a TBU é igual à temperatura usual, por outro lado em um ambiente com 0% de umidade relativa a evaporação é máxima e a TBU é significativamente menor que a temperatura de bulbo seco.

Dessa forma, a TBU é um indicador da quantidade de água no ar. Para o sistema de resfriamento evaporativo, a TBU é um valor interessante, pois sua diferença em relação à temperatura de bulbo seco indica o quão eficiente o resfriamento pode ser, visto que caso a diferença seja nula não há

efeito útil em manter o sistema evaporativo ligado e quando a diferença é alta o sistema pode retirar o máximo de calor do ambiente.

Existe um ponto de saturação do vapor d'água no ar à uma certa temperatura e pressão. Isso significa que para uma certa quantidade de água no ar, se a temperatura for reduzida o suficiente, o vapor d'água começa a se condensar. Essa temperatura de chama de ponto de orvalho (dewpoint).

Ao reduzir a temperatura abaixo do ponto de orvalho, parte da água no ar é condensada e dado um sistema de coleta dessa água é possível transformar umidade do ar em água líquida. Esta propriedade é particularmente interessante para projetos de captação de água em regiões sem a infra-estrutura adequada e pode ser útil em sistemas que queiram reduzir a umidade absoluta do ar sem se importar muito com a umidade relativa que transitariamente passa por valores próximos a 100%.

## 2.2.4 Carta Psicrométrica

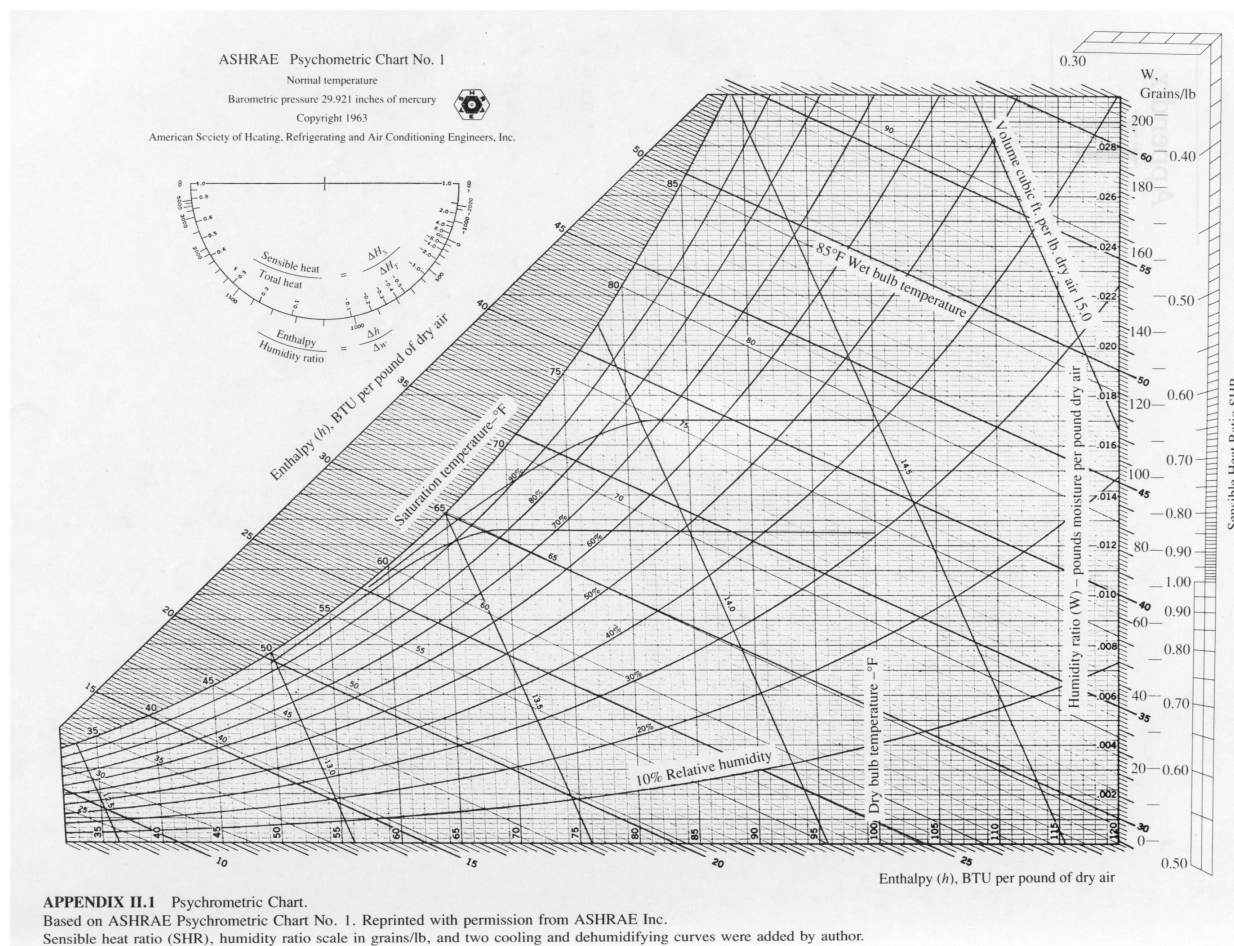


Figura 2.4: Carta Psicrométrica - ASHRAE

A carta psicrométrica ou gráfico psicrométrico ou ainda diagrama psicrométrico é um gráfico que traz muitas informações sobre os processos psicrométricos, traz informações sobre as curvas de umidade relativa, as informações de o quanto que uma redução de temperatura influencia na umidade relativa, o quando que uma adição de água influencia na temperatura e etc.

Apesar da quantidade de informações disponíveis na tabela, as unidades americanas são uma dificuldade adicional para explicar as relações básicas que a tabela traz e fora este fator, existe uma densidade de informações muito grande de dificulta uma explicação mais simples. Assim, a figura 2.5 é um diagrama mais simples para facilitar o entendimento básico das informações contidas na tabela.

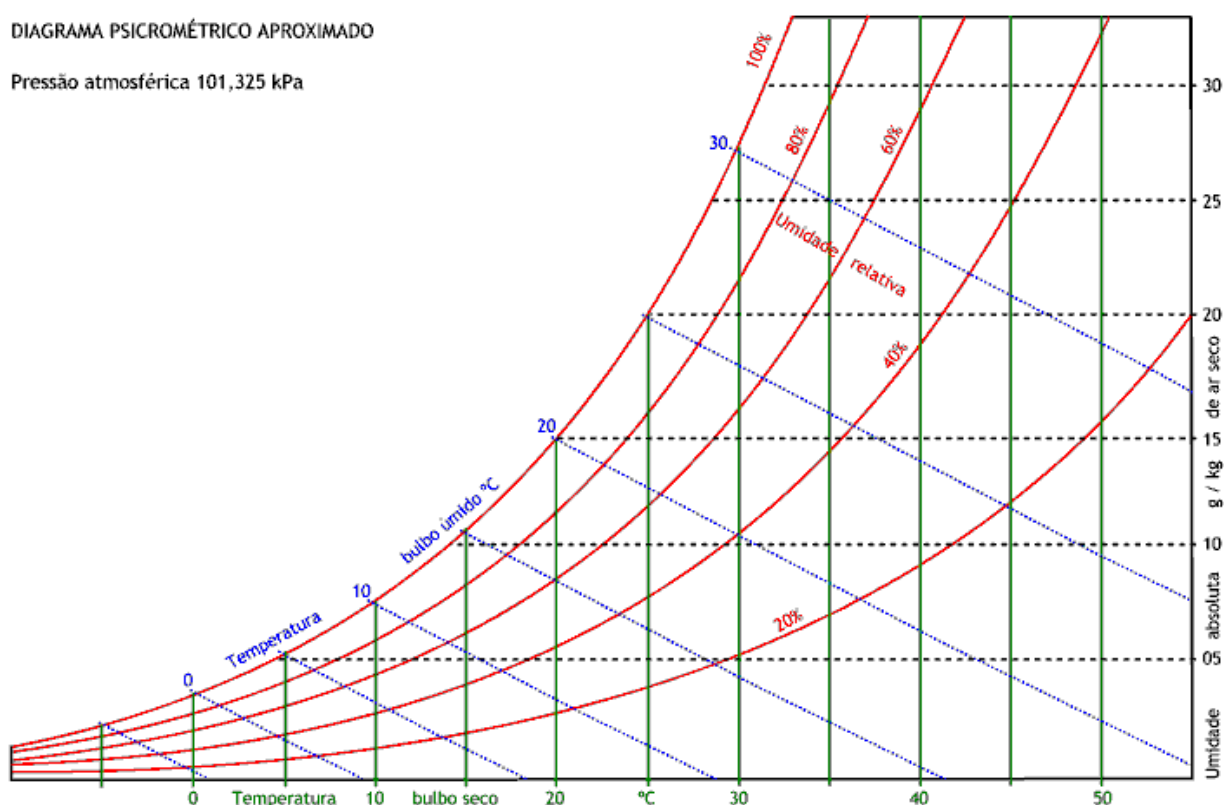


Figura 2.5: Carta Psicrométrica simplificada

No eixo das abcissas temos a temperatura de bulbo seco, a temperatura usual e nas ordenadas a umidade absoluta com várias curvas de umidade relativa.

Essas curvas de umidade relativa mostram que sem adição ou remoção de água no ambiente, mas apenas variando a temperatura (o eixo x) gera-se uma variação quantificada e não-linear na umidade relativa. Ao usar essas informações da tabela é possível relacionar quantidade absoluta de água, umidade relativa e temperatura. Usualmente temperatura e umidade relativa são mais

simples de serem medidas por sensores, mas a quantidade de água absoluta do ambiente é mais difícil devido à necessidade de um modelo mais complexo para o ambiente.

Uma segunda informação contida na tabela são as linhas de TBU. Essas linhas mostram como a TBU é idêntica à temperatura normal quando a umidade relativa é 100%, pois não existe potencial de evaporação do ar e quando a quantidade de água no ar diminui, a diferença entre a temperatura normal e a TBU aumenta de forma linear.

O diagrama psicrométrico é extremamente útil, pois ele quantifica várias das relações já haviam sido discutidas anteriormente em caráter mais qualitativo e permite previsões de impacto de cada variável de interesse no sistema.

## **2.3 Sistemas de climatização**

A climatização de ambientes é o procedimento para alterar o ambiente para tornar o mesmo propício para alguma atividade de interesse. O problema usual brasileiro é a redução da temperatura da temperatura que tem a tendência a ficar alta demais para garantir conforto aos usuários.

A dificuldade de transformar o ambiente inicial no ambiente desejado tem relação com a quantidade de energia que deve ser dispendida para forçar a mudança e manter o estado não-natural. A forma convencional de resolver o problema é a instalação de um sistema de ar-condicionado mas existe uma alternativa viável em determinadas situações na forma do sistema de resfriamento evaporativo.

### **2.3.1 Ar-condicionado**

O sistema de climatização mais comum no Brasil, é o sistema de ar-condicionado. Este sistema utiliza energia elétrica para remover calor do ar interno de um ambiente, esse calor saindo como ar quente para fora do ambiente de interesse. O ar-condicionado padrão tem um ciclo representado pela figura 2.6.

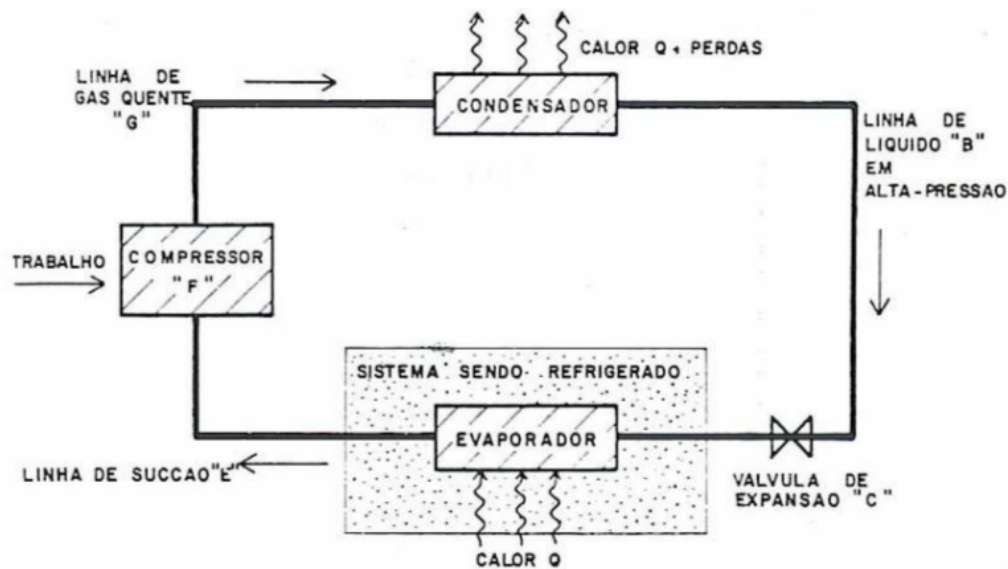


Figura 2.6: Ciclo do ar-condicionado - Creder 2000

O ar-condicionado funciona por uma sequência de processos sobre o fluido de trabalho, também chamado de fluido refrigerante. Este funciona como um máquina térmica que faz a conversão entre trabalho e calor usando um ciclo de compressão e expansão do fluido refrigerante.

Começando a análise do ciclo pelo compressor, este suga o fluido de trabalho e o comprime, aumentando a pressão e temperatura. Este é um processo que utiliza a energia elétrica para exercer trabalho mecânico sobre o fluido e é o principal utilizador da potência elétrica do aparelho de ar-condicionado.

Este gás aquecido troca calor com o ambiente externo, perdendo parte de sua energia para o meio externo. Daí passa pelo condensador, que faz com que ele troque de fase, passando de gasoso para líquido (ainda quente e pressurizado).

Em seguida passa pela válvula de expansão que o transforma em líquido pulverizado à baixa pressão e temperatura. Nesta fase este líquido à baixa temperatura troca calor com o ambiente interno, retirando energia térmica do ambiente interno e se aquecendo um pouco.

Por último, este líquido passa pelo evaporador para passar de novo para a fase gasosa e recomeçar o ciclo sofrendo sucção pelo compressor.

A forma mais comum dos sistemas de ar-condicionado modernos é o chamado ar-condicionado "split". No qual existem duas unidades, uma interna (que retira calor com o ambiente interno) e uma externa (que transfere o calor absorvido do ambiente interno para o externo) ligadas por tubulações para maximizar o isolamento do ambiente interno e do externo.

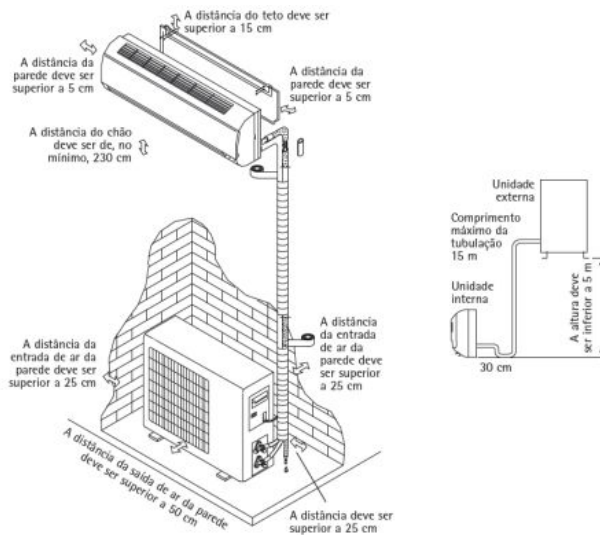


Figura 2.7: Exemplo de ar-condicionado split com duas unidades

Um efeito indesejado do ar-condicionado é a desumidificação do ambiente. A parte do ciclo do ar-condicionado que troca calor com o ambiente interno faz com que o ar interno do ambiente fique em contato com uma tubulação com o líquido refrigerante em forma líquida e baixa temperatura. Quando o ar do ambiente entra em contato com esta tubulação fria, a água tende a se condensar.

Esta água condensada que costuma ficar pingando próximo da unidade externa (forma melhor) ou as vezes da unidade interna (forma pior) é umidade que estava presente no ar interno e que ao mudar de fase deixa de estar presente.

Esta condição do ar-condicionado causa problemas para alguns indivíduos com aparelhos respiratórios mais sensíveis além de mover os parâmetros climáticos do ambiente para a região de conforto determinada pela ABNT.

### 2.3.2 Sistema evaporativo

O resfriamento evaporativo ocorre quando existe um processo que cede calor para que a água líquida contida no ambiente evapore. A evaporação é um processo endotérmico, isto é, demanda calor para se realizar. Esta transferência de calor pode ser forçada (quando fornecemos o calor, tal como o processo de ferver a água) ou induzida (quando criamos condições para que a evaporação ocorra mais facilmente).

Um exemplo clássico de resfriamento evaporativo é a **torre de resfriamento**, pois nela usa-se o processo de evaporação para resfriar um líquido de trabalho (frequentemente água) para algum processo de remoção de calor com aplicação industrial. Uma utilização clássica é o resfriamento de água aquecida por um reator nuclear. Usando torres de dimensionamento apropriado, é possível usá-las para sistemas de ventilação e climatização.

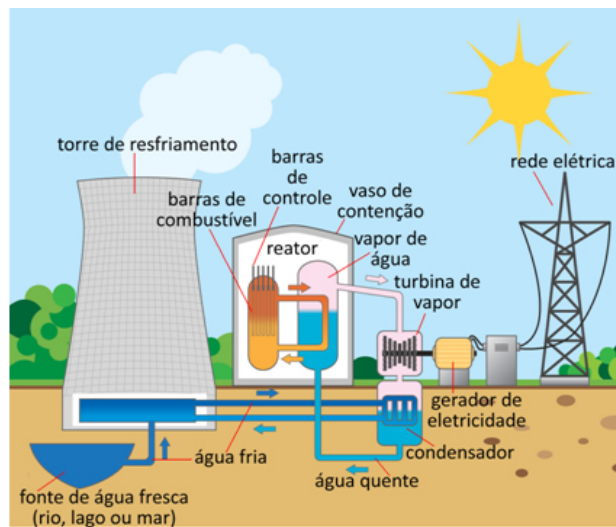


Figura 2.8: Utilização de uma torre de resfriamento para resfriamento de água

Existem dois tipos principais de processos de resfriamento evaporativo para controle climático[5], o RED (Resfriamento Evaporativo Direto) ilustrado na figura 2.9 e o (Resfriamento Evaporativo Indireto) ilustrado na figura 2.10.

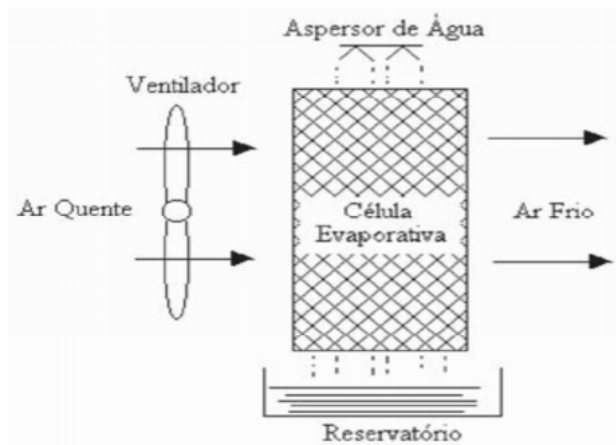


Figura 2.9: Sistema de resfriamento evaporativo RED (CAMARGO, 2004, p. 70 )

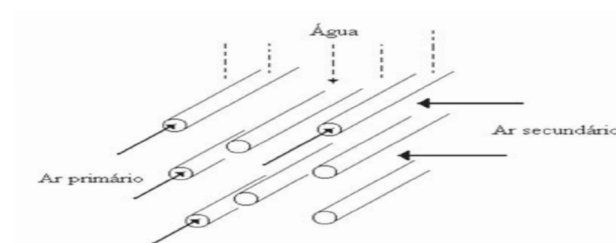


Figura 2.10: Sistema de resfriamento evaporativo REI (CAMARGO, 2004, p. 70 )

No resfriamento direto a água entra em contato com um fluxo de ar diretamente e o calor e massa transferidos entre o ar e a água reduzem a temperatura de bulbo seco do ar e aumentam a sua umidade. Este processo é mais eficaz do ponto de vista de resfriamento se for possível resfriar a água que supre o equipamento (CARDOSO et al, 1999).

Por outro lado, no REI o ar primário, relativamente seco, não entra em contato direto com a água do sistema, ele fica isolado do ar do lado onde ocorre a vaporização da água, neste processo o ar que será utilizado para condicionar o ambiente (ar primário) transfere calor para uma corrente de ar secundário ou para um líquido, que foram resfriados evaporativamente, reduzindo a temperatura sem alterar a umidade do ar da sala. De acordo com Morgado et al. (2011) apesar da viabilidade do processo de resfriamento evaporativo depender diretamente da condição climática, o REI tem maior eficiência em situações aonde o ar não é tão seco.

### 2.3.3 Comparação do sistema convencional com o sistema de resfriamento evaporativo

Uma vantagem significativa do sistema de resfriamento evaporativo é o custo. O sistema de uma forma geral é mais barato para uma mesma queda de temperatura e gasta menos energia elétrica do que um sistema tradicional.

Sistemas evaporativos podem apresentar prolemas relacionados à umidade. A umidade pode causar uma proliferação de fungos no ambiente causando alergias e mal-cheiro ou ainda pode gerar desconforto para os usuários se a umidade resultante for alta com temperatura também alta. Essas questões são mais relacionadas com sistemas que usam o ar interno para atuar, sistemas que usam o ar externo promovem circulação de ar e não geram problemas de umidade muito alta.

A adição de água ao ar aumenta a capacidade calorífica do sistema de forma que é necessário mais energia térmica para subir (ou abaixar) a temperatura. Assim, a manutenção de um nível de umidade adequado faz com que o sistema se importe menos com os picos e vales de temperatura e mais com a média tornando o sistema mais previsível.

Uma questão que gera problemas para esse sistema em determinados ambientes é que a sua capacidade de resfriamento é relacionada com a umidade do ambiente. Assim, em Brasília este sistema tem grande capacidade de resfriamento mas não necessariamente esta capacidade se mantém durante o ano todo. O equacionamento desta capacidade é ilustrado na equação 2.6 [8], aonde TBU significa temperatura de búlbo úmido e os subscritos diferenciam se a temperatura é interna ou externa.

$$\epsilon = \frac{T_{int} - T_{ext}}{T_{int} - TBU_{ext}} \quad (2.6)$$



Assim, de forma análoga uma vantagem do sistema tradicional é que o ar-condicionado funciona muito bem em uma variedade grande de situações, já que sua eficácia depende muito mais de sua potência do que do estado atual do sistema enquanto, do ponto de vista da refrigeração, o sistema evaporativo tem sua eficácia dependente da umidade do ambiente estar baixa, o que restringe um pouco a aplicabilidade deste sistema em outras regiões do país e do mundo.

<b>Quesito</b>	<b>Ar-condicionado</b>	<b>Resfriamento evaporativo</b>
Custo	Alto	Baixo
Consumo energético	Alto	Baixo
Redução na Temperatura	Alta	Média-Baixa
Impacto na umidade	Baixo, diminui a umidade	Alto, aumenta a umidade
Efetividade em clima seco	Alta	Média
Efetividade em clima úmido	Alta	Baixa

Tabela 2.3: Vantagens e desvantagens dos sistemas de climatização

# Capítulo 3

## Planta

A construção e implementação do sistema de climatização é discutida por completo no trabalho de José Olmos [1] com várias mudanças no sistema de climatização implementado posteriormente no trabalho de Daniel Bello [2] e expandido neste trabalho com o auxílio do Arthur Macedo. Esta seção deste trabalho tem como objetivo introduzir a planta resultante de maneira resumida e o mais completa possível e explicitando as mudanças feitas em cada etapa.

### 3.1 Construção do sistema base - 2009

No ano de 2009, Olmos [1] projetou um sistema híbrido de climatização para a sala de reunião do LARA (na época LAVSI, antes da fusão dos dois ambientes vizinhos). O projeto foi definido com a ideia de priorizar o sistema de resfriamento evaporativo e usar o ar condicionado padrão como um sistema de apoio. Foram feitos os cálculos da capacidade do sistema baseado nas dimensões da sala para que a mesma pudesse ser devidamente controlada usando os parâmetros da ANBT.

O sistema de climatização tem duas entradas de ar: uma externa sempre aberta com o intuito de resfriar o ar externo e trazê-lo para dentro da sala e uma entrada interna com o objetivo de caso o ar-condicionado esteja ligado o sistema interno pode funcionar como um sistema padrão refrigerando o ar interno. Essa entrada interna é motorizada e pode abrir ou fechar de acordo com a necessidade dos usuários.

Por simplicidade foi decidido que a abertura de ar do damper seria sempre ou totalmente aberto ou totalmente fechado e seu estado é completamente atrelado ao estado do sistema de ar-condicionado tradicional. Ao ligar o sistema de refrigeração convencional o damper abre automaticamente, de forma a inabilitar o estado que o compressor está ligado e o retorno de ar pelo damper está desativado.

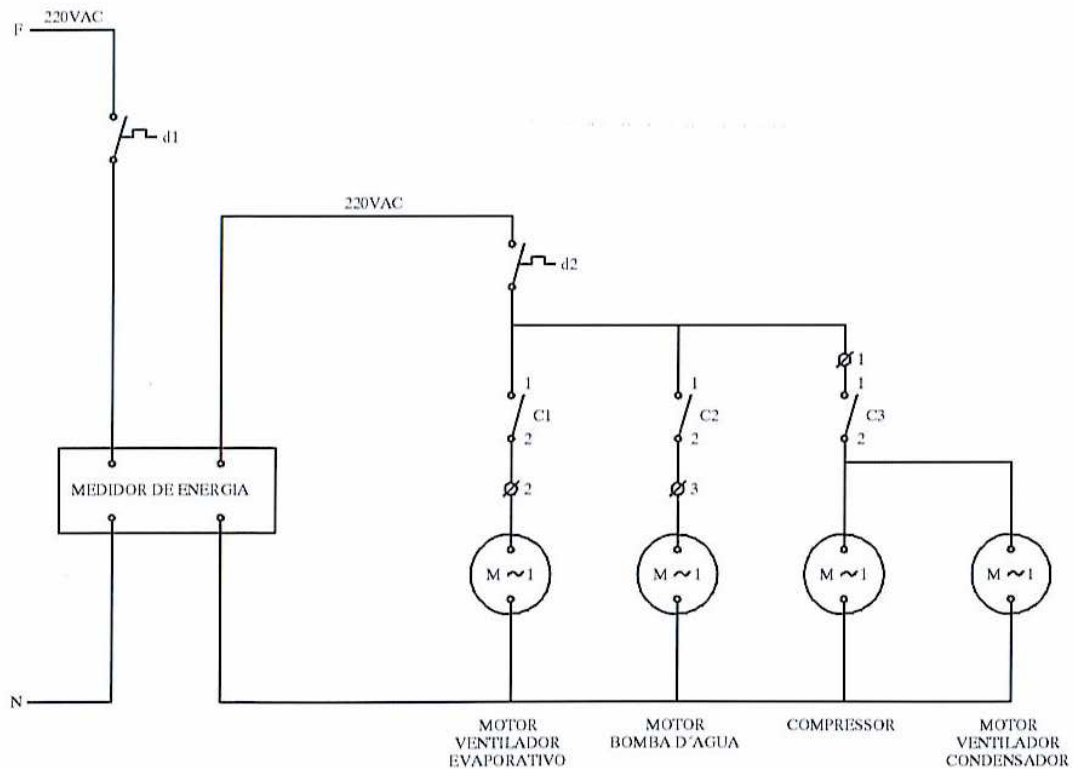


Figura 3.1: Diagrama de força do sistema de climatização da sala de reuniões do LARA

Para o acionamento e controle do sistema foi selecionado um sistema de controle da empresa Full-Gauge para utilizar um controle já pronto, apenas delegando ao usuário a função de escolher as referências (setpoints) de temperatura e umidade e escolher o modo de funcionamento do sistema híbrido entre as seguintes cinco opções:

Modo de operação	Ventilador	Bomba d'água	Compressor	Retorno interno do ar
Desligado	Desligado	Desligado	Desligado	Desligado
Ventilador	Habilitado	Desligado	Desligado	Desligado
Evaporativo	Habilitado	Habilitado	Habilitado	Desligado
Refrigeração	Habilitado	Desligado	Desligado	Habilitado
Híbrido	Habilitado	Habilitado	Habilitado	Habilitado

Tabela 3.1: Modos de funcionamento do sistema de controle da Full-Gauge

Em resumo, o modo desligado não habilita nenhuma das saídas do sistema, o modo ventilador apenas o ventilador (em retrospecto, talvez fosse melhor abrir o retorno de ar interno nesse caso, re-circular o ar interno costuma ser mais produtivo do que apenas trazer ar externo frequentemente

bastante quente), o modo evaporativo habilita que o controlador ligue e desligue a bomba d'água que encharca a manta de celulose, o modo de refrigeração utiliza o ar condicionado e o retorno de ar interno enquanto o sistema híbrido habilita tanto o modo evaporativo quanto o modo do ar-condicionado padrão.

O sistema de controle faz todos os acionamentos, dependendo da habilitação dos atuadores para manter a temperatura e umidade internas o mais próximo possível das referências informadas pelo usuário.

As figuras 3.2 e 3.3 trazem em detalhe as plantas de construção do sistema e permitem a visualização do sistema em detalhe enquanto a figura 3.4 mostra o resultado da montagem do sistema.

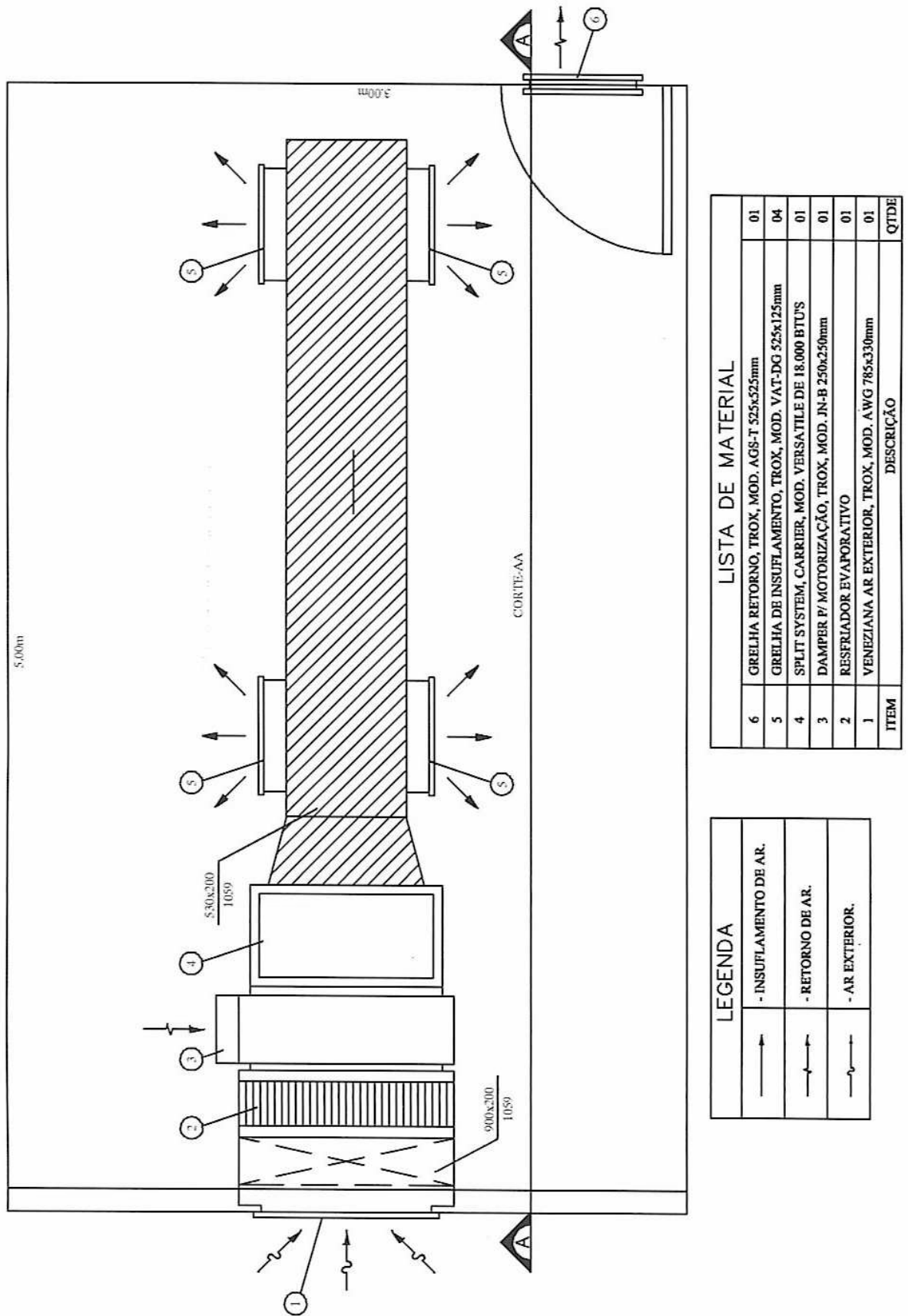
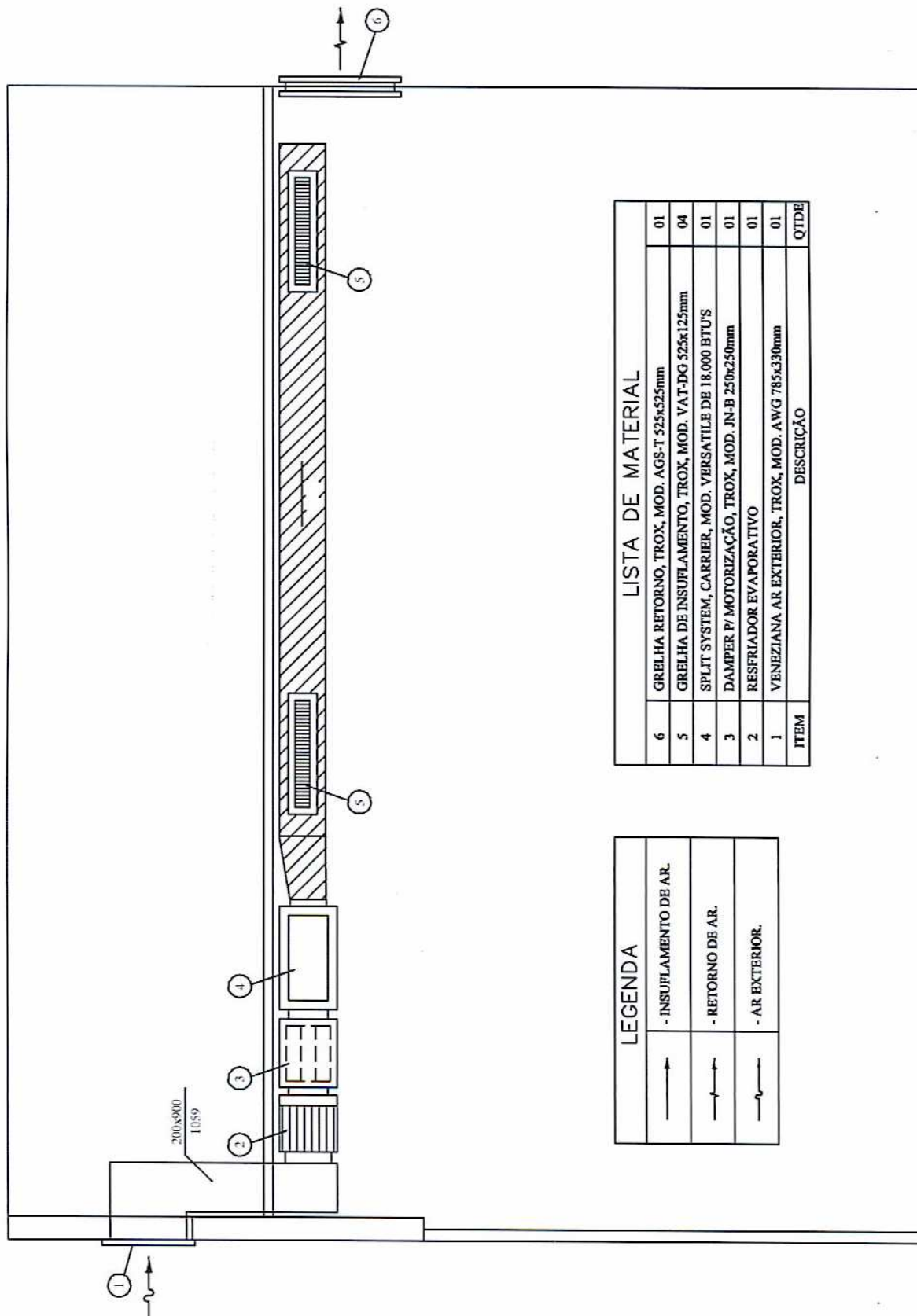


Figura 3.2: Planta baixa do sistema de climatização da sala de reuniões do LARA



**LISTA DE MATERIAL**

ITEM	DESCRIÇÃO	QTDE
6	GRELHA RETORNO, TROX, MOD. AGS-T 525x525mm	01
5	GRELHA DE INSUFLAMENTO, TROX, MOD. VAT-DG 525x125mm	04
4	SPLIT SYSTEM, CARRIER, MOD. VERSATILE DE 18.000 BTU'S	01
3	DAMPER P/ MOTORIZAÇÃO, TROX, MOD. JN-B 250x250mm	01
2	RESFRIADOR EVAPORATIVO	01
1	VENEZIANA AR EXTERIOR, TROX, MOD. A WG 785x330mm	01

**LEGENDA**

↑	- INSUFLAMENTO DE AR.
↕	- RETORNO DE AR.
~	- AR EXTERIOR.

Figura 3.3: Vista de corte do sistema de climatização da sala de reuniões do LARA



Figura 3.4: Sistema Híbrido montado

### 3.1.1 Sensores e sistema de controle

O sistema montado na primeira fase possuía sensores em cinco pontos:

1. Após refrigeração (ar no duto de insuflamento)
2. Após evaporativo (no ponto aonde o ar externo após passar pela manta se junta ao ar interno vindo pelo damper)
3. Posição interna
4. Posição externa
5. Sala vizinha

As posições dos sensores é demonstrada na figura 3.5.

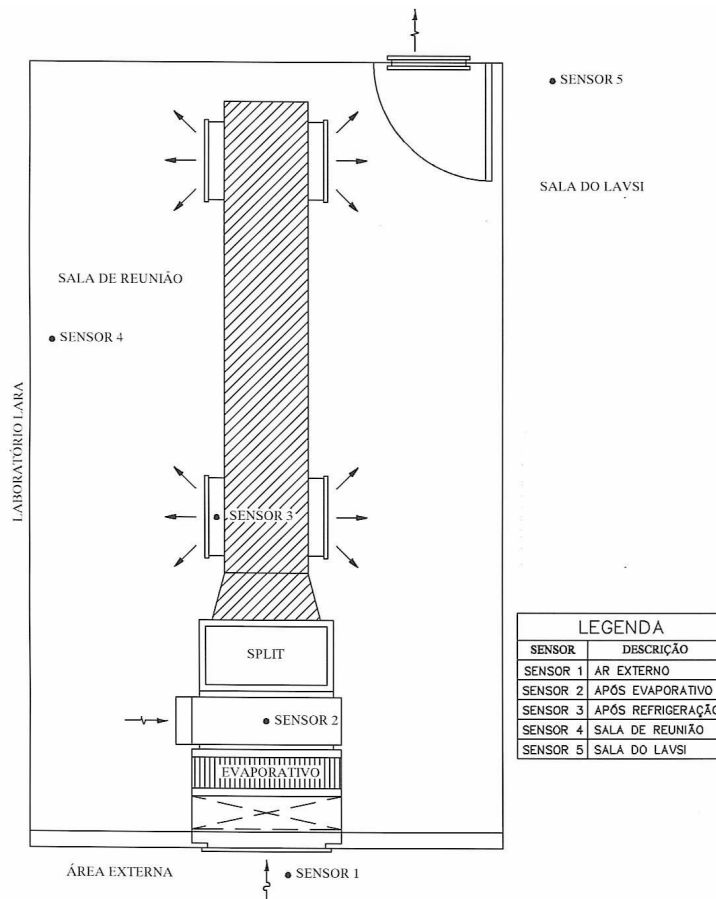


Figura 3.5: Posicionamento dos sensores na montagem original do sistema

Com os sensores devidamente posicionados, é possível capturar informações de vários pontos do sistema mesmo que o controle seja bem simples e só leve em conta a temperatura e umidade da sala interna é possível capturar dados para uma análise posterior da influência das perturbações (sensor externo e na sala vizinha) no sistema e o quanto que a atuação é eficaz ("após evaporativo" e "após refrigeração").

O sistema de controle da Full-Gauge foi todo instalado em um painel fechado que permite a visualização dos dados dos sensores, ligar e desligar o sistema e alterar as referências de forma rápida e prática.



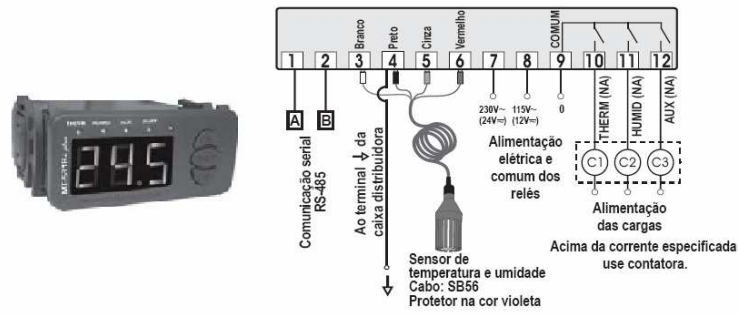


Figura 3.6: Esquema elétrico do controlador da Full-Gauge



Figura 3.7: Painel de controle da Full-Gauge

Para a análise dos dados e visualização dos gráficos, é fornecido um software próprio da empresa para exercer o papel de sistema supervisor.

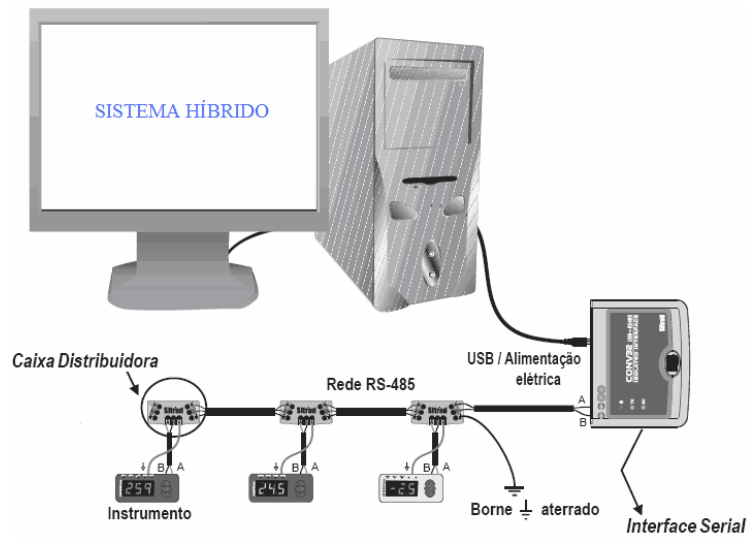


Figura 3.8: Sistema supervisor da Full-Gauge

### 3.1.2 Ar-condicionado

O sistema de ar-condicionado selecionado foi um sistema com capacidade nominal de 18000 BTUs, pouco abaixo da capacidade nominal da sala calculada em 24000 BTUs. Assim, o sistema

de ar-condicionado por si só é quase capaz de suprir as necessidades da sala. Em termos práticos, o sistema de ar condicionado é capaz de manter a sala próximo de um nível de referência sem auxílio do sistema evaporativo em grande parte dos cenários possíveis, fora em situações de calor intenso ou uma multidão dentro da sala.

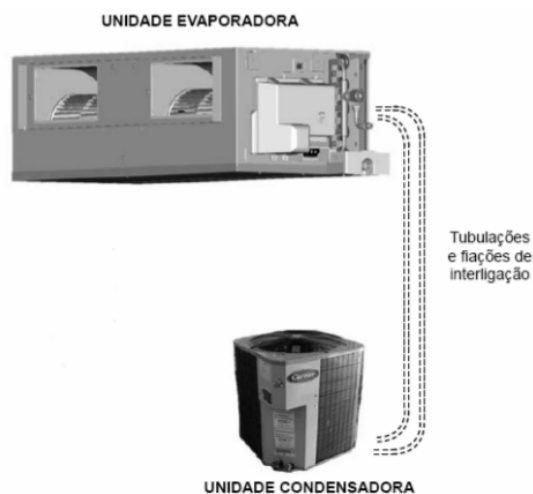


Figura 3.9: Figura do sistema de ar condicionado instalado, um split da marca Carrier

### 3.1.3 Resfriamento evaporativo

O sistema evaporativo selecionado foi construído no formato RED (resfriamento evaporativo direto) com uma manta de celulose, uma bomba d'água que despeja água no topo da manta e um reservatório que contém a água do sistema.

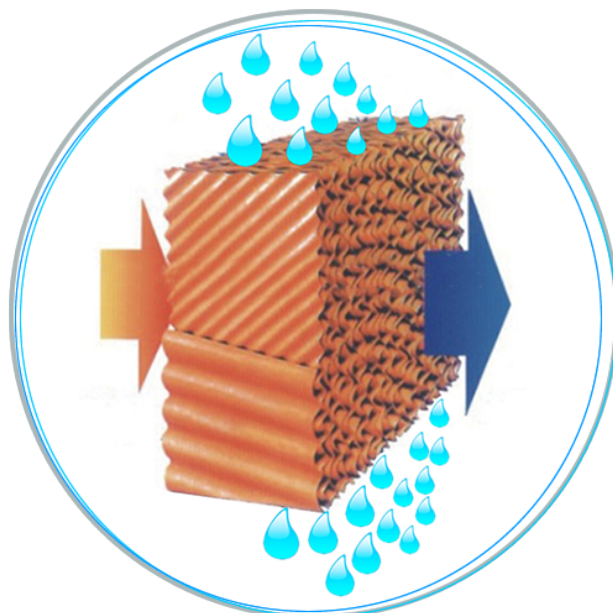


Figura 3.10: Manta de papel kraft da Munters

Detalhes da montagem do sistema são ilustrados pelas figuras 3.12 e 3.11.

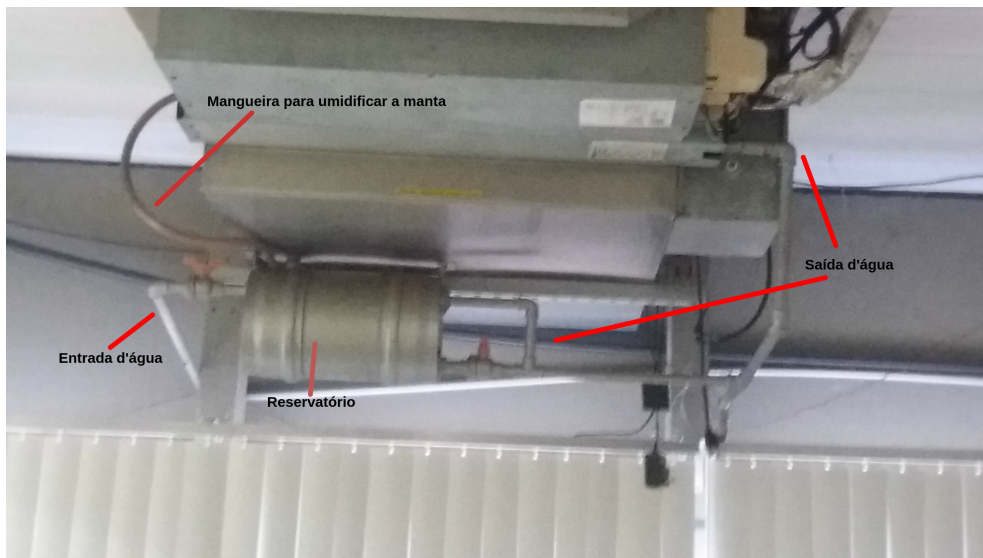


Figura 3.11: Montagem do sistema evaporativo

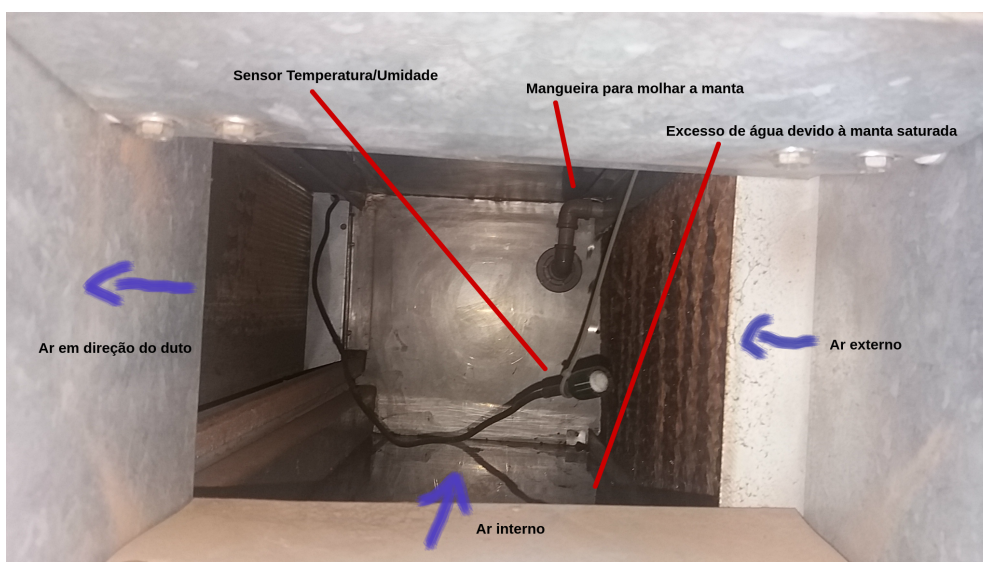


Figura 3.12: Vista interna do setor 3 da planta baixa com o retorno de ar interno aberto.

Para molhar a manta, existe uma tubulação de água que alimenta um pequeno reservatório que enche até sua boia interna interromper o fluxo de água e uma segunda bomba, essa sim controlada pelo sistema de climatização, que bombeia água desse reservatório para a manta. Existe uma tubulação de saída que remove o excesso de água no reservatório caso o mesmo transborde e essa tubulação se junta com a tubulação de água saindo do ar-condicionado padrão para despejar água em excesso para fora da sala.

Análise posterior do sistema mostra que a bomba d'água fornece muito mais água para o sistema do que o mesmo é capaz de evaporar. Assim, manter a bomba d'água ligada por longos períodos de tempo gera um desperdício de água pois a mesma acaba escorrendo de uma manta já encharcada mas não foi verificado transbordamento de água saindo do sistema. Em testes práticos, cinco minutos com a bomba ligada são suficientes para saturar a manta de celulose e após 20 minutos um poça d'água significativa é formada.

Este sistema implementado diz ser capaz de reduzir bastante a temperatura do ar dependendo obviamente da umidade do mesmo. A figura 3.13 ilustra a capacidade nominal do sistema que em condições de baixa umidade, tal como é comum em Brasília, supostamente pode reduzir a temperatura do ar em até 10°C quando a umidade relativa do ar está muito baixa (<40%).

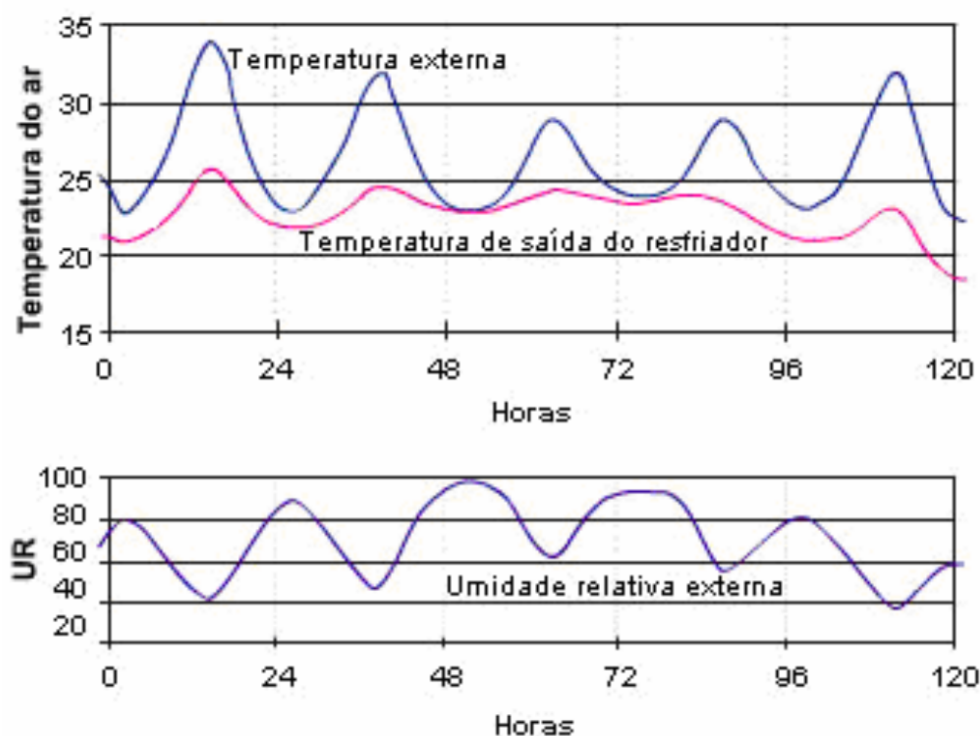


Figura 3.13: Eficácia prometida do sistema de resfriamento evaporativo (Ecobrisa, 2009)

### 3.1.4 Resultados

Para uma análise completa dos resultados é necessário referir à [1]. O sistema de controle implementado funciona com controle liga desliga baseado em uma referência para ligar a atuação e uma para desligar a atuação. Assim, para verificar o funcionamento do sistema para um determinado modo de funcionamento basta definir os limites tolerados da temperatura e umidade interna e ativar a atuação quando as variáveis de interesse saírem da faixa de interesse.

Um exemplo dos parâmetros de controle é a tabela 3.2 que contem os parâmetros relevantes selecionados para que o controlador atue buscando manter a sala em um clima agradável e a

imagem 3.14 que ilustra o resultado de tal controle.

Ação	Compressor	Bomba d'água	Ventilador
Ligado	23.5 °C	15 %	21.5 °C
Desliga	22.5 °C	20 %	21.0 °C

Tabela 3.2: Resultados 2009 - Parâmetros de controle do modo REF

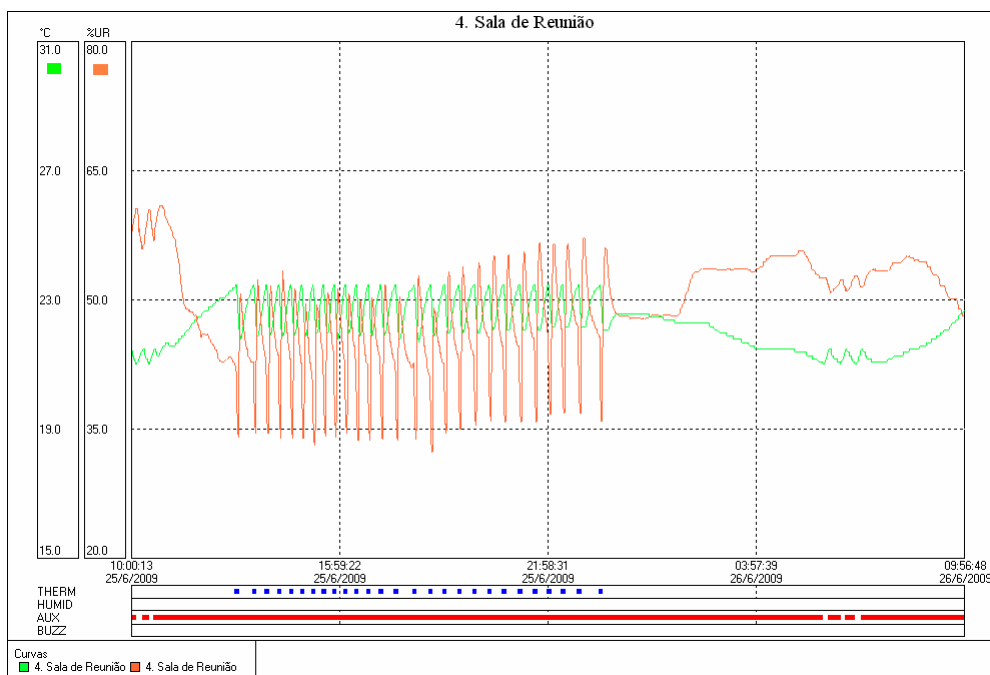


Figura 3.14: Evolução no tempo da temperatura e umidade da sala no modo REF

Foram feitos diversos testes para cada modo de funcionamento e os resultados podem ser resumidos nas tabelas 3.3, 3.4 e 3.5.

Modo de operação	T mínima	T máxima	T media	Observações
Desligado	22.5 °C	25.9 °C	24.5 °C	Alta
Ventilador	21.0 °C	26.1 °C	23.3 °C	Alta
Evaporativo	20.9 °C	22.4 °C	21.3 °C	Normal
Convencional	21.0 °C	23.5 °C	22.5 °C	Normal
Hibrido	20.8 °C	23.5 °C	21.6 °C	Normal

Tabela 3.3: Resultados 2009 - Temperatura (resumido)

Modo de operação	UR mínima	UR máxima	UR média	Observações
Desligado	27.6 %	46.5 %	38.0 %	Baixa
Ventilador	29.8 %	51.0 %	41.8 %	Baixa
Evaporativo	45.7 %	63.3 %	53.6 %	Normal
Convencional	32.2 %	61.1 %	46.3 %	Normal
Hibrido	37.8 %	60.7 %	53.4 %	Normal

Tabela 3.4: Resultados 2009 - Umidade (resumido)

Modo de operação	Tempo de operação Ventilador	Tempo de operação Bomba	Tempo de operação Compressor	Consumo	Observações
Desligado	00h00m00s	00h00m00s	00h00m00s	0.17 KWh	Muito Baixo
Ventilador	22h15m15s	00h00m00s	00h00m00s	2.23 KWh	Normal
Evaporativo	13h52m54s	00h29m42s	00h00m00s	1.36 KWh	Normal
Convencional	22h58m08s	00h00m00s	01h49m57s	5.92 KWh	Alto
Hibrido	14h56m31s	00h28m40s	00h09m02s	1.95 KWh	Normal

Tabela 3.5: Resultados 2009 - Consumo Energético (resumido)

### 3.2 Novo sistema de controle usando openHAB - 1/2016

O openHAB é um software para integração de diferentes sistemas de automação residencial em uma só plataforma que fornece interfaces claras para os usuários e implementação de regras de automação de forma simples.

Em sua página da internet o openHAB diz ser:

- Desenvolvido para ser independente de fabricantes, hardware ou protocolos.
- Capaz de funcionar em qualquer dispositivo capaz de rodar uma JVM (Java Virtual Machine), um software com suporte em diversas plataformas que permite ao usuário focar o software ignorando o hardware.
- Capaz de integração de diversas tecnologias de automação residencial em um servidor.
- Fácil de adicionar sensores e sistemas à rede.
- Capaz de implementar regras para automação usando uma linguagem própria.
- Simples para criar uma tela de sistema supervisorio para diversos sistemas de saída.

O openHAB foi criado principalmente para integração de diversas aplicações da **Internet das Coisas**, um tópico relacionado à uma tendência futura de interconectividade entre aparelhos possibilitando compartilhamento de informações relevantes e atuação remota. Aplicações residenciais comuns são controle de luzes e tomadas via internet, emissão de mensagens em caso de alarme de uma situação indesejada (intrusão, incêndio) e acionamento agendado de dispositivos.

Um problema de sistemas inteligentes é que cada fabricante faz o seu sistema e muitas vezes é bastante difícil integrar sistemas de fabricantes diferentes. Nesse contexto, o openHAB buscou uma estrutura simples, código aberto e criar uma comunidade extensa de usuários para que a comunidade crie formas de integrar os novos dispositivos fabricados ao sistema openHAB dividindo o trabalho.

O openHAB é um sistema extremamente modularizado. Dependendo do serviço que o usuário queira instalar, é necessário adicionar uma ligação "**binding**" do openHAB para o serviço requisitado. Exemplos são bancos de dados (MySQL, RRD4J, Sen.se, etc) e protocolos de rede (http, mqtt, ModBus, Z-Wave, serial, etc).

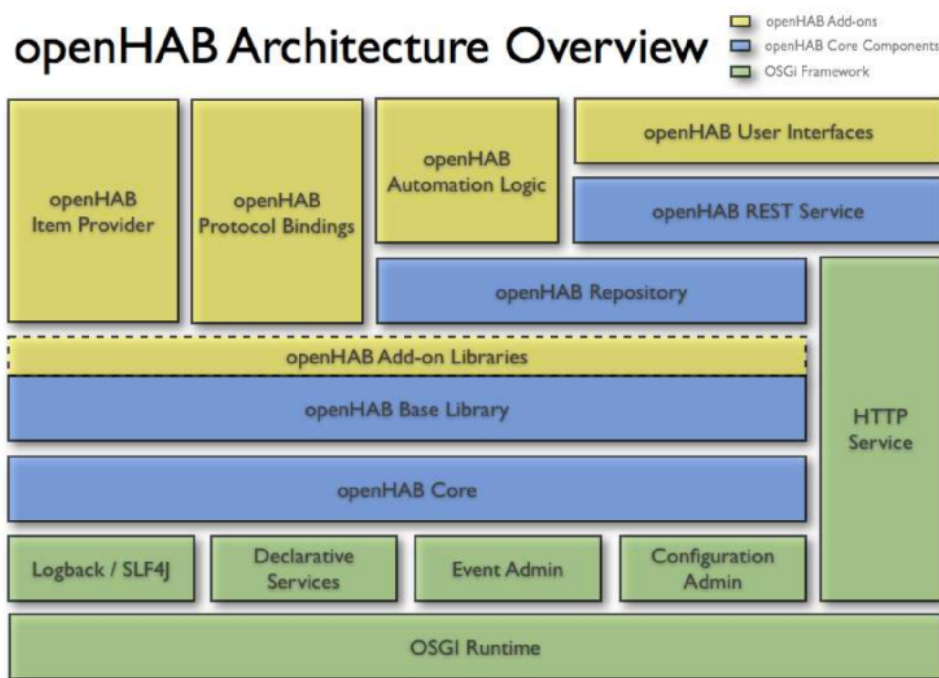


Figura 3.15: Estrutura do openHAB

A figura 3.15 ilustra a estruturação do aplicativo openHAB e mostra como o mesmo é modularizado. Essa modularização permite a adição e remoção de componentes com o sistema em funcionamento. É fácil e direto com o sistema em funcionamento alterar as comunicações e as regras de automação sem ser necessário uma reinicialização do sistema.

Uma situação que implica em problemas porém, é a alteração de variáveis. Em um arquivo relevante ("javaone.items") o usuário define as variáveis do sistema de controle. A alteração do tipo dessas variáveis, ou a adição e remoção dessas variáveis podem causar problemas no sistema que são resolvidos com uma reinicialização.

É importante notas que o openHAB inclui as variáveis, as regras de comando, as interfaces gráficas e a configuração das comunicações. O usuário tende a se focar no servidor openHAB mas este é apenas uma das partes relevantes.

### 3.2.1 MQTT

O protocolo de comunicação selecionado é o MQTT (Message Queue Telemetry Transport). Este protocolo é bastante simples, com cabeçalho minúsculo facilitando que sistemas mais simples possam se comunicar com a rede e certificado pela ISO (ISO/IEC PRF 20922) para redes TCP/IP não confiáveis e com baixa taxa de dados.

Dispositivos na rede se comunicam com um procedimento de **Publicador-Subscritor**, ou seja, cada dispositivo recebe mensagens sobre um certo conjunto de tópicos (lado subscritor) e manda mensagens em um segundo conjunto de tópicos (lado publicador). Assim, quando há uma informação nova na rede todos os sistemas que consideram essa informação relevante são notificados, pois estão subscritos nesse tópico.

O protocolo MQTT explicita cinco funções básicas para serem implementadas e com elas é possível realizar todas as comunicações previstas na documentação do protocolo.

- Connect( IP\_Broker)
- Disconnect()
- Subscribe ( Topic )
- Unsubscribe ( Topic )
- Publish (Data, Topic)

A estrutura da rede é com um nó central, o **broker** que recebe as mensagens e as retransmite. Na estrutura da rede não é possível dois dispositivos normais se comunicarem diretamente, apenas via o broker. Para adicionar novos membros na rede basta que estes novos membros saibam quem é o broker e o broker manda a mensagem em **broadcast** (similar à radiodifusão, transmitindo a mensagem para todos os dispositivos que estiverem na rede).



Assim, os dispositivos na rede são independentes uns dos outros e essa política facilita a expansão da rede pois para cada novo dispositivo em uma rede com  $n$  dispositivos é necessário uma conexão (do novo dispositivo para o broker) enquanto uma rede não centralizada teria que adicionar todas as configurações relevantes (até  $n$ ). A contrapartida é o ponto central de falha, se o broker falhar nada se comunica enquanto em uma rede descentralizada a falha em um dispositivo não necessariamente compromete a rede inteira.

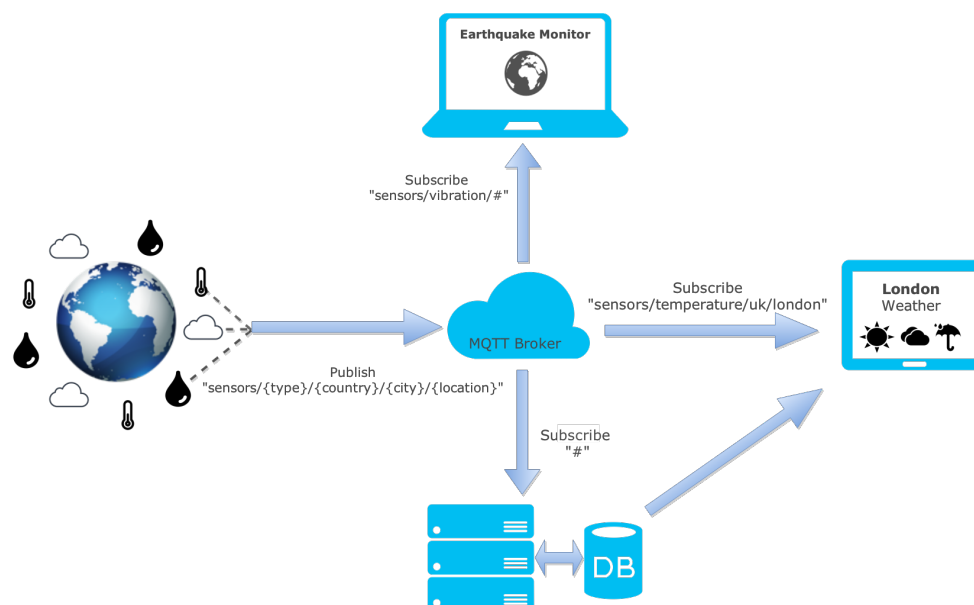


Figura 3.16: Exemplo de rede usando o protocolo MQTT

Na imagem 3.16 é possível ver uma rede em que sensores publicam mensagens em um tópico estruturado. Daí, o computador está inscrito em todos os tópicos que começam com "sensors/vibration", o banco de dados em todos os tópicos e o aplicativo apenas na temperatura em Londres. Essa estrutura dos tópicos permite facilitar a expansão posterior do sistema precisando de menos configurações.

Como discutido anteriormente, o protocolo MQTT necessita de um servidor para fazer o papel do broker. Para tal função foi selecionado o programa **mosquitto**, para rodar no Raspberry Pi na porta 1883 (padrão). Ao fixar o IP do RPi então temos o servidor que garante que a rede toda funcionará.

### 3.2.2 Alterações físicas

#### Acionamento elétrico

Foram feitas diversas alterações físicas no sistema. O sistema construído em 2009 não dava margem para atuação pelos usuários, necessitando de uma construção nova de sistemas de chaveamento. O painel de controle final construído por BELLO [2] é ilustrado na figura 3.22.

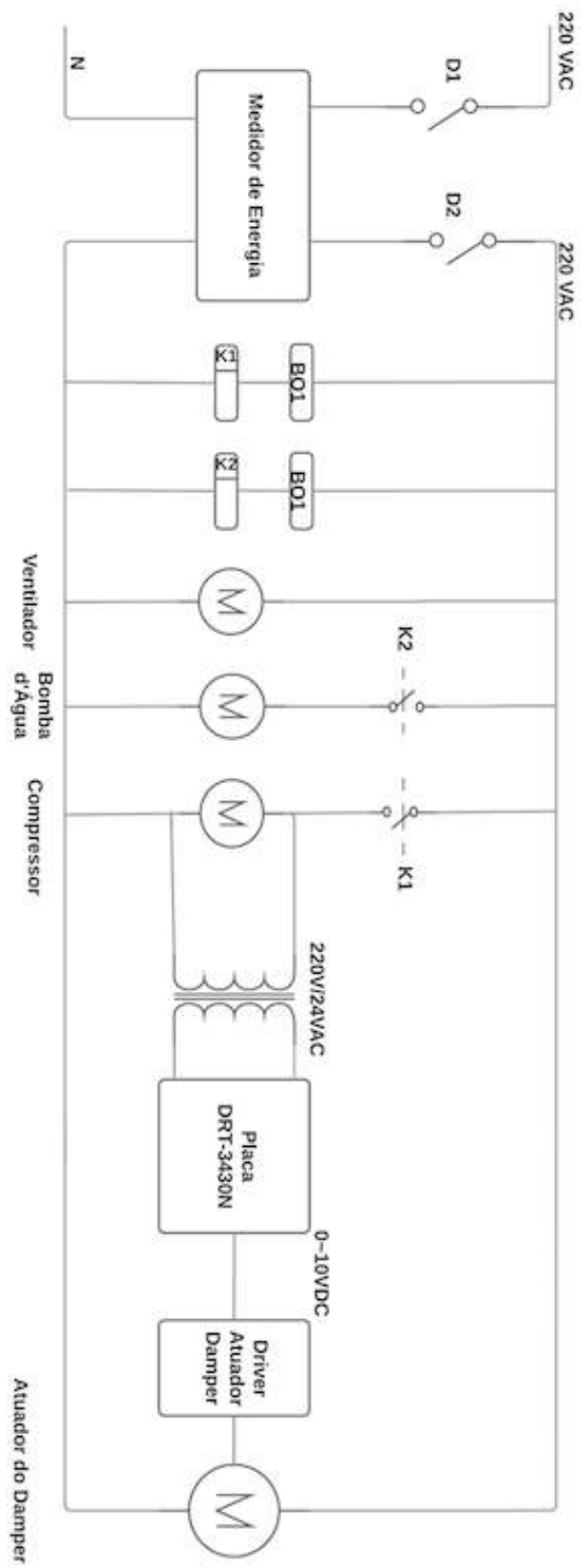


Figura 3.17: Quadro de comando - 2016

Para a atuação no damper, foi selecionado um dispositivo que varia a abertura da porta baseado na sua tensão de entrada. O sistema utiliza uma referência de 0-10 VDC e a abertura do damper é dado pela fórmula 3.1.

$$Abertura = 10 * V_{in}\% \quad (3.1)$$



Figura 3.18: Atuador para damper, modelo AM-2001, 24 Vac x 0-10Vcc

Durante a montagem do sistema, foi ajustado para que a entrada do atuador seja 10V. Assim, ao ligar a placa o  $V_{cc}$  do dispositivo é 10V (100% de abertura) e ao chavear o sistema para cortar a tensão, o  $V_{cc}$  é 0V (0% de abertura).

Outra alteração de destaque é o fato de o ventilador estar sempre ligado. Diferentemente da montagem anterior, nesse sistema não há o estado DESL, a única forma de simular este estado é cortando a energia do sistema pelo disjuntor elétrico.

Para o chaveamento do ar-condicionado e da comba d'água foram utilizadas chaves contadoras com o acionamento baseado em uma placa de relés.

## Sensores

Foram encontradas dificuldades em reaproveitar os sensores e por isso foi decidido utilizar novos sensores. Os sensores selecionados são DHT-22, um sensor de temperatura e umidade digital comum disponível em lojas de componentes eletrônicos para Arduino e com suporte de bibliotecas para facilitar a programação.



Figura 3.19: Sensor DHT-22

Modelo	DHT22	
Sinal de saída	3.3 - 6Vcc	
Elemento sensor	Capacitor de polímero	
Acurácia	Umidade: $\pm 2\%$	Temperatura: $\pm 5^{\circ}C$
Resolução	Umidade: 0.1%	Temperatura: $0.1^{\circ}C$
Repetitibilidade	Umidade: $\pm 0.1\%$	Temperatura: $\pm 0.2^{\circ}C$
Histerese de umidade	$\pm 0.3\%$	
Estabilidade a longo prazo	$\pm 0.5\%$ ao ano	
Período de sensoriamento	Em média 2s	
Permutabilidade	Totalmente permutável	
Dimensões	Vista lateral: 14 x 18 x 5.5 mm; Vista Frontal: 22x28x5mm	

Tabela 3.6: Características do sensor DHT22

Características interessantes do DHT22 é que ele não é um sensor comum que mede uma variável e retorna o valor como tensão. Ele tem dois sensores internos, um para a temperatura e outro para a umidade e com uma sequência de dados ele se comunica com a placa conectada em seus terminais e dependendo do pedido ele retorna um valor ou outro. Isso gera o tempo alto de sensoriamento.

Foram utilizados dois sensores, um para a sala interna e um sensor para o ambiente externo ao LARA.

### Sistema de automação

O Raspberry Pi, é um computador de baixo custo e tamanho reduzido. O modelo escolhido para esse projeto foi o Raspberry Pi 2 Model B. Este computador tem como funções principais hospedar o broker do MQTT para a comunicação dos dispositivos e rodar o openHAB. Uma breve lista de algumas dos programas instalados no Raspberry:

- **Máquina virtual Java:** pre-requisito para o funcionamento do openHAB.



Figura 3.20: Raspberry Pi

- **Servidor de arquivos SAMBA:** facilitador de alteração das configurações do openHAB em rede, em um computador próprio ao invés de acoplar um monitor, mouse e teclado no RPi.
- **openHAB runtime:** sistema de controle.
- **Database MySQL:** banco de dados para salvar as informações captadas pelos sensores para análise offline em programas diversos.
- **Database RRD4J:** banco de dados para salvar as informações captadas pelos sensores para análise no programa HABMIN, um pacote extra instalado no openHAB que melhora as ferramentas de monitoração dos dados.
- **Mosquitto Broker:** servidor do MQTT para que as comunicações entre os dispositivos da rede seja possível.

Para tal, foi configurado no roteador da rede local um IP fixo para o RPi (192.168.1.4) de forma que na configuração de qualquer dispositivo na rede, seja fácil encontrar os servidores de interesse. O RPi está conectado a um roteador local via um cabo de rede, pois o modelo 2 não tem placa de internet wireless (este feature passou a integrar o RPi a partir do modelo 3).

Ligado à rede, encontra-se um Arduino modelo Mega 2560 que serve como placa de aquisição de dados e placa de atuação, utilizando seus pinos de saída para ativar uma placa de relés que ativam uma chave contatora que finalmente faz os contatos elétricos finais para a ativação das saídas.

A razão do acréscimo de contadoras ao sistema é devido à alta potência do sistema de ar-condicionado. A placa de relés diz suportar 10A à uma tensão de 220 VAC e isso causaria problemas com a placa em caso de acionamento direto da carga final.

Este Arduino está ligado a um modulo de internet (ENC 28J60) que permite que o mesmo se comunique via rede. Assim, foi definido o IP do Arduino (192.168.1.101) em software e com auxílio de bibliotecas o Arduino faz sua comunicação (tanto envio de dados dos sensores quanto

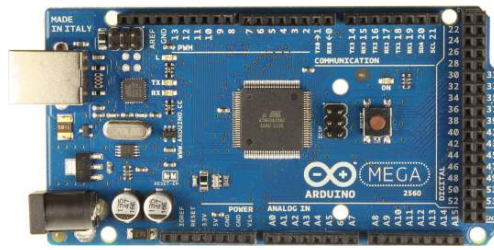


Figura 3.21: Arduino Mega 2560

recebimento de ordens de atuação) via um cabo de rede ligado à um roteador que gera a rede local do sistema.

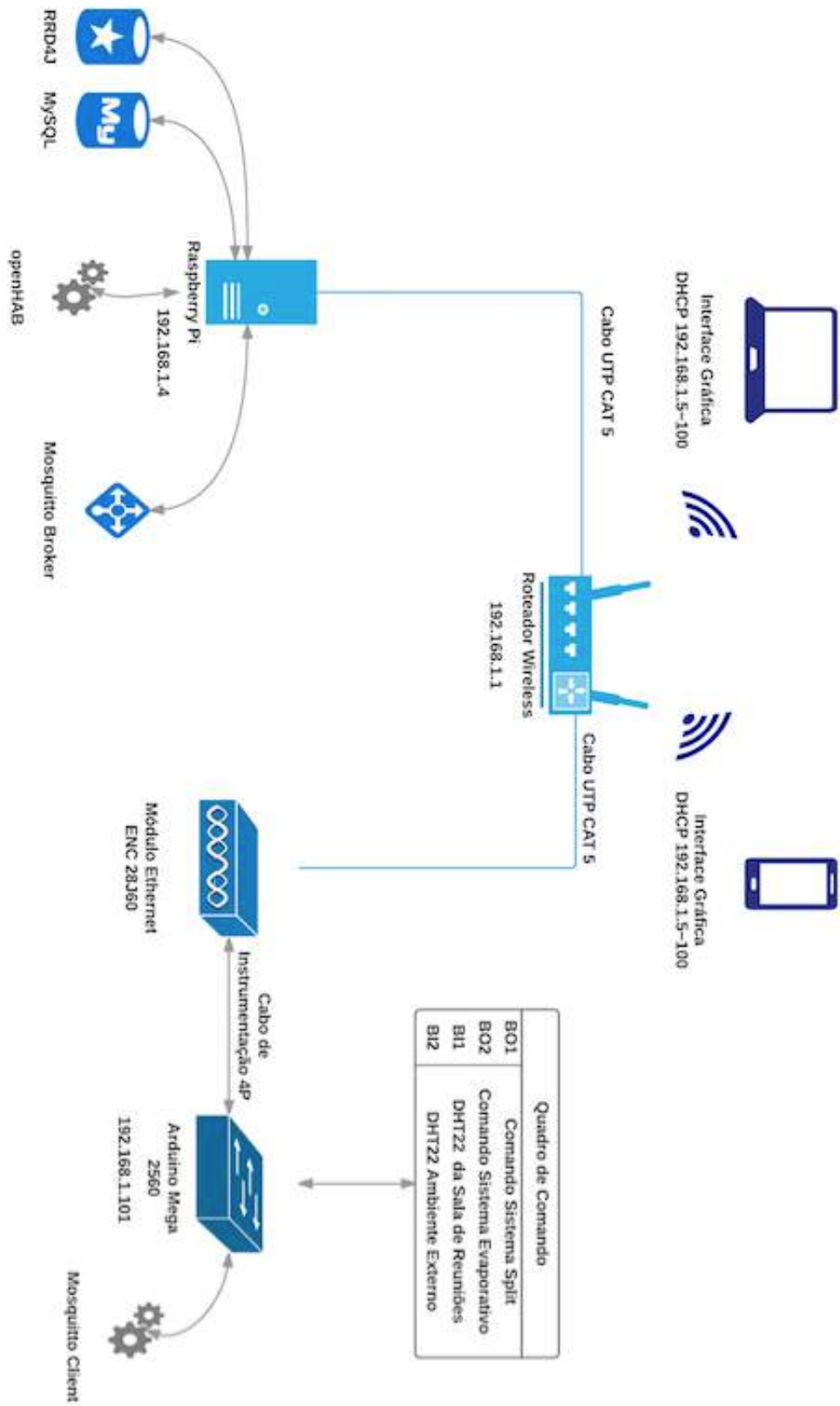


Figura 3.22: Esquema da rede implementada

## Estruturação da comunicação

O Arduino funciona como sensor e foi definido em software que sua captura de dado seria a cada 5s (na prática, se aproxima de 6s devido à comunicação lenta). Depois de ler os dados, o Arduino publica seus valores em 7 tópicos diferentes:

- "reuniao/temperatura- TBS da sala de reuniões
- "reuniao/umidade- umidade relativa da sala de reuniões
- "reuniao/TBU- temperatura de bulbo úmido sala de reuniões
- "reuniao/tempdew- temperatura de ponto de orvalho da sala de reuniões
- "externa/temperatura- TBS do ar externo
- "externa/umidade"- umidade relativa do ar externo
- "externa/TBU- temperatura de bulbo úmido do ar externo

A parte de atuação do Arduino se subscreve em três tópicos:

- "condensador- ligar ou desligar o compressor
- "bomba- acionar ou desativar e bomba d'água
- "damper- abrir ou fechar o retorno de ar interno

O openHAB se subscreve nos tópicos publicados pelo Arduino. Uma vez que o openHAB recebe as mensagens, elas são tratadas por conversão de tipos (typecasting) e guardadas em seus itens para serem armazenadas no banco de dados e utilizadas pelas suas regras.

A conversão de tipos é necessária uma vez que as mensagens em MQTT são transmitidas em ASCII. Dessa forma, o Arduino recebe a leitura dos sensores em ponto flutuante (float), converte-os para ASCII (vetor de char) e então publica cada valor em um tópico. Quando o openHAB recebe esses dados, eles são novamente convertidos de ASCII para ponto flutuante.



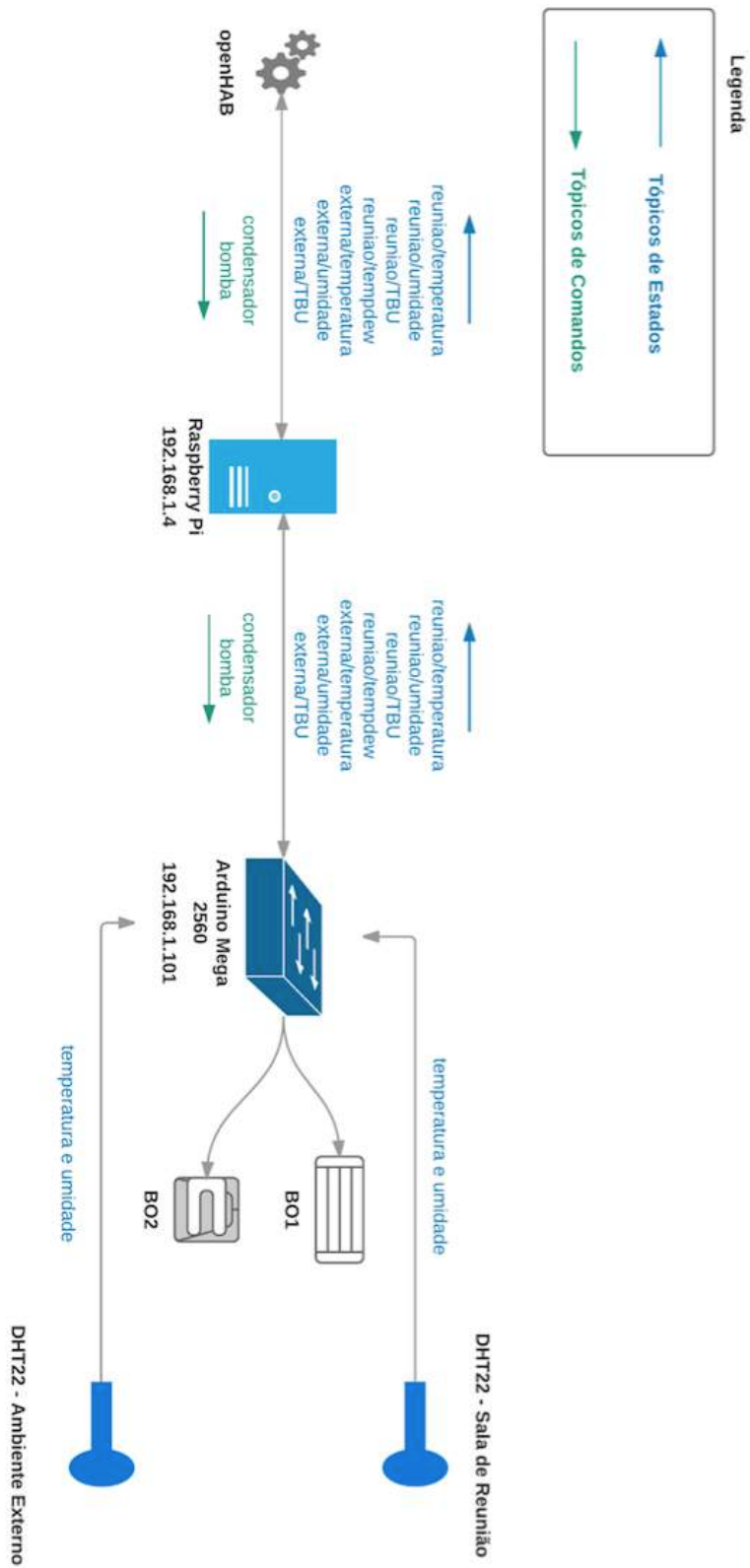


Figura 3.23: Esquema de comunicação entre os dispositivos da rede

## Interface

Para a interface com o usuário para o mesmo poder observar o funcionamento do sistema, é necessário visualizar as páginas do sistema. O openHAB tem dentro de suas funções a capacidade de gerar páginas de internet e hospedá-las em um servidor local. Assim, ao se conectar na mesma rede do RPi e tentar acessar o site com o IP do raspberry e a porta 8080 chega-se na página inicial do servidor. Para clarificar, estando na rede do RPi, basta informar 192.168.1.4:8080 para visualizar a imagem 3.24.



The image shows a web interface titled "TG Daniel Bello". It is divided into two main sections: "Status" and "Sensores".

**Status**

<b>Arduino</b>	online
<b>Condensador</b>	Desligado
<b>Bomba</b>	Ligado

**Sensores**

 <b>Temperatura Sala</b>	23.4 °C
 <b>Umidade Sala</b>	64.0 %
<b>Temp. Orvalho</b>	16.2 °C
 <b>Temperatura Externa</b>	29.3 °C
 <b>Umidade Externa</b>	37.5 %
<b>TBU Externa</b>	19.4 °C

©2010-2015 openHAB.org

Figura 3.24: Interface com o usuário

# Capítulo 4

## Modelo do sistema

O modelo do sistema é baseado em trabalhos anteriores, em particular o trabalho do Pedro Ivo.

O modelo escolhido para o ambiente é um modelo de princípios fundamentais, representando da melhor forma possível os fenômenos físicos ao invés de usar variáveis de estado que não sejam facilmente convertidas para grandezas físicas.

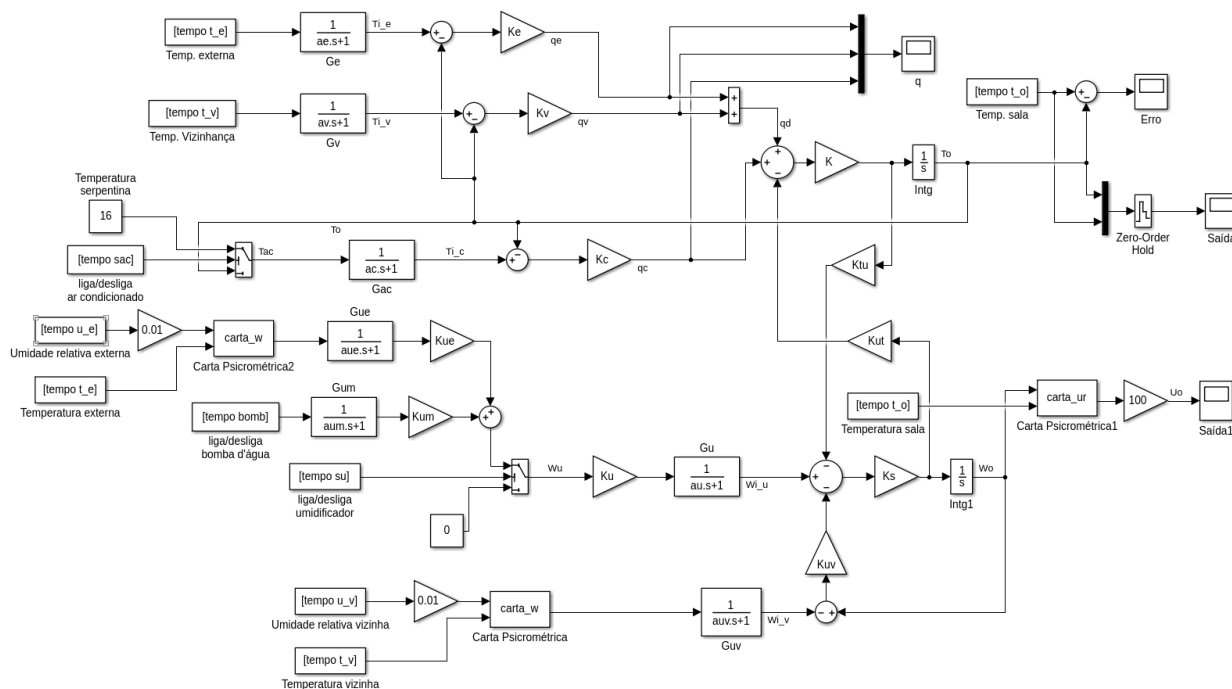


Figura 4.1: Modelo Completo - Pedro Ivo, imagem maior em anexo

O modelo previsto tem certos problemas de legibilidade, assim foram feitos vários ajustes para melhorar a questão de legibilidade do modelo, afinal de contas o objetivo do modelo era justamente ser possível de um ser humano entender o modelo sem usar uma caixa preta. Para isso, o sistema foi organizado em duas malhas: temperatura e umidade.

## 4.1 Temperatura

### 4.1.1 Modelo base

A temperatura do sistema só se altera com a adição ou remoção de energia térmica. Dessa forma o modelo básico para a temperatura funciona com um equilíbrio de energia, aonde tenta-se estimar os fluxos de calor baseado em dados de sensores e depois verificar o impacto do fluxo de calor na sala. O fluxo de calor é dado pela equação 4.1 de forma geral, e no caso específico de fluxo por uma parede sólida é possível calcular o fluxo total, chegando na equação 4.2.

$$\dot{Q} = -k\nabla T \quad (4.1)$$

$$Q = \frac{-kA(T_a - T_b)}{d} \quad (4.2)$$

Assim, é possível modelar a transferência de calor através de paredes de forma bastante satisfatória como apenas dependente da diferença de temperatura, visto que os outros parâmetros se mantem constantes. Este fluxo possui dinâmica de primeira ordem, sendo modelado por uma função de transferência de primeira ordem.

Entretanto, o sistema não responde de forma imediata à mudanças de temperatura externas. Existe um atraso perceptível entre a mudança de temperatura no ambiente externo e esse efeito chegar nos sensores em ambientes internos. Dessa forma, é adicionado um atraso para representar este fenômeno físico observado. Dessa forma, sempre que há uma diferença de temperatura entre dois ambientes separados por paredes, o fluxo de calor é dado por 4.3 e a energia térmica por 4.4, já passando para o domínio de Laplace.

$$Q(s) = K \frac{T_{ext}}{\tau s + 1} - T_{int} \quad (4.3)$$

$$Q(s) = K \frac{\frac{T_{ext}}{\tau s + 1} - T_{int}}{s} \quad (4.4)$$

Uma segunda forma de adição de calor para o sistema é a irradiação solar incidente sobre o ambiente em estudo. Essa irradiação é medida diretamente em  $W/m^2$  e independe da temperatura afetando o sistema de forma direta.

O ar-condicionado usa um processo diferente. Usando energia elétrica ele resfria o ar do ambiente, de forma a reduzir a temperatura de uma certa massa de ar. Assim, a energia retirada do ambiente é dada por 4.5, também no domínio de Laplace.

$$Q(s) = K \frac{T_{in} - T_{out}}{s(\tau s + 1)} \quad (4.5)$$

O sistema em questão tem um ar-condicionado que é acionado em liga-desliga. Não é possível alterar a temperatura da serpentina, de tal forma que o ar que sai do sistema ou tem a temperatura do ambiente (caso o sistema esteja desligado) ou tem a temperatura fixa da serpentina. Assim, o fluxo de calor do ar condicionado tem dois estados possíveis.

$$Q(s) = \begin{cases} 0, & \text{se sistema desligado} \\ K \frac{T_{sala} - T_{serpentina}}{s(\tau s + 1)}, & \text{se ligado} \end{cases} \quad (4.6)$$

Por último, é importante relatar que o trabalho base adicionou no modelo dois fatores:  $K_{ut}$  e  $K_{tu}$  que representam a influência da temperatura na umidade e vice-versa. Pelo que foi apurado, não foi possível obter com confiança esses valores para ter uma boa ideia de o quanto a umidade afeta a temperatura e vice-versa.

#### 4.1.2 Modelo de trabalho

Para o trabalho o modelo foi reorganizado de forma a facilitar a visualização, tentando manter ao máximo a similaridade do modelo. Assim, foi obtido um modelo bastante parecido, mas buscando a manutenção de padrões visuais para facilitar a extrapolação de entendimento de uma parte para diversas outras.

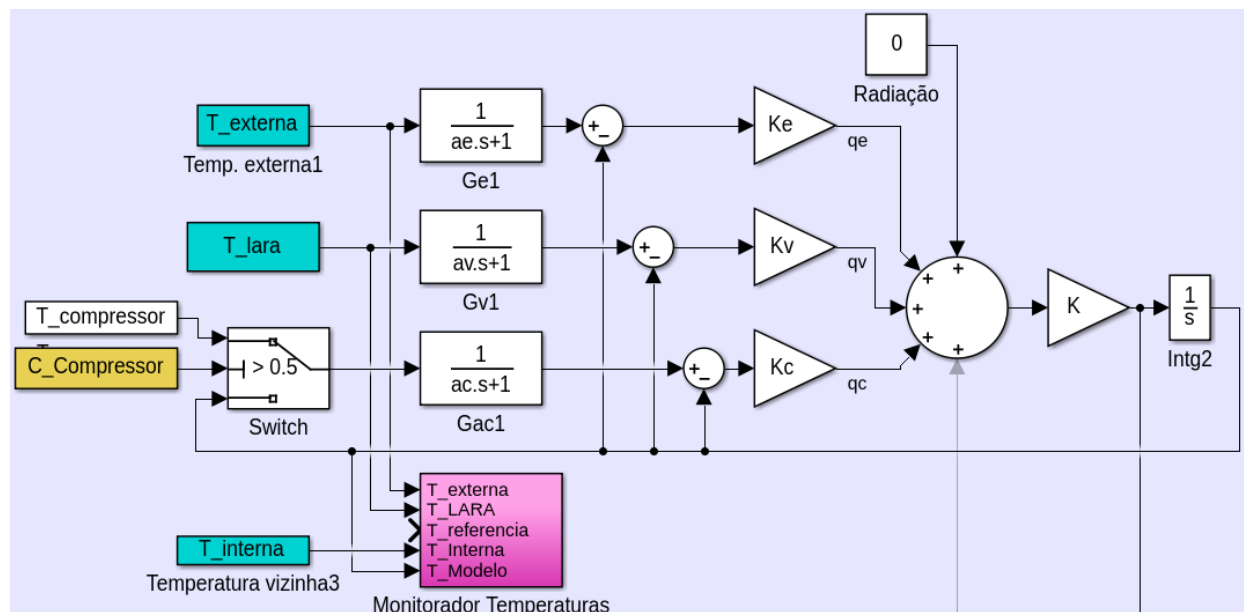


Figura 4.2: Malha de temperatura

Neste modelo, a caixa amarela é uma atuação do sistema (o liga-desliga do ar condicionado), as caixas azuis-claras ou cians são dados via sensores. Existem três temperaturas de interesse: a da sala em questão ( $T_{interna}$ ), a do ambiente vizinho ( $T_{lara}$ ) e a temperatura externa ( $T_{externa}$ ).

A caixa rosa é apenas um agregador de variáveis para simplificar o passo posterior às simulações da construção dos gráficos de interesse. Nesses dados de interesse é incluída a variável  $T_{interna}$  que é a temperatura da sala tal como medida no sensor. Assim, é possível comparar o modelo com o sistema físico e avaliar a capacidade do modelo de representar o mundo real.

O trabalho base não leva em conta a radiação solar, embora alguns trabalhos pesquisados levam em conta. Assim, idealmente o modelo em trabalhos futuros levará em conta a radiação solar para se aproximar ainda mais da realidade. No trabalho atual, a falta do sensor impossibilita a adição desta perturbação no modelo, mas torna o modelo mais próximo do modelo base.

Este modelo ignora a influência da malha de temperatura na malha de umidade. No modelo a malha de temperatura é posicionada no topo da influência da umidade na temperatura é a entrada no somador de fluxos de calor que não está cinza, ou seja, ignorada pelo programa. E a influência da temperatura na umidade é a saída antes do integrador que desce para afetar a malha de umidade. Esta linha também fica cinza chegando na parte inferior da malha.

### 4.1.3 Validação do Modelo

Para validar o modelo, usando o banco de dados do sistema implementado salvando os valores de todas as variáveis de interesse em um banco de dados MySQL com um período de 1 min entre os tempos de armazenamento é possível simular com precisão razoável o sistema. O sistema é lento o bastante para que com 1 minuto a cada amostra o valor lido pelo sensor é alterado por um valor na faixa de 0 - 0.5 °C, com a maioria absoluta dos casos a diferença sendo na faixa de 0 - 0.1 °C.

Na realidade o sistema funciona com amostras a cada 5-6 segundos, mas para o banco de dados não há necessidade de um excesso de pontos para a simulação posterior. Com dados capturados a cada minuto é possível reconstruir com bastante detalhe os dados reais.

A seguir exemplos de simulação para a validação do modelo usando dados reais.

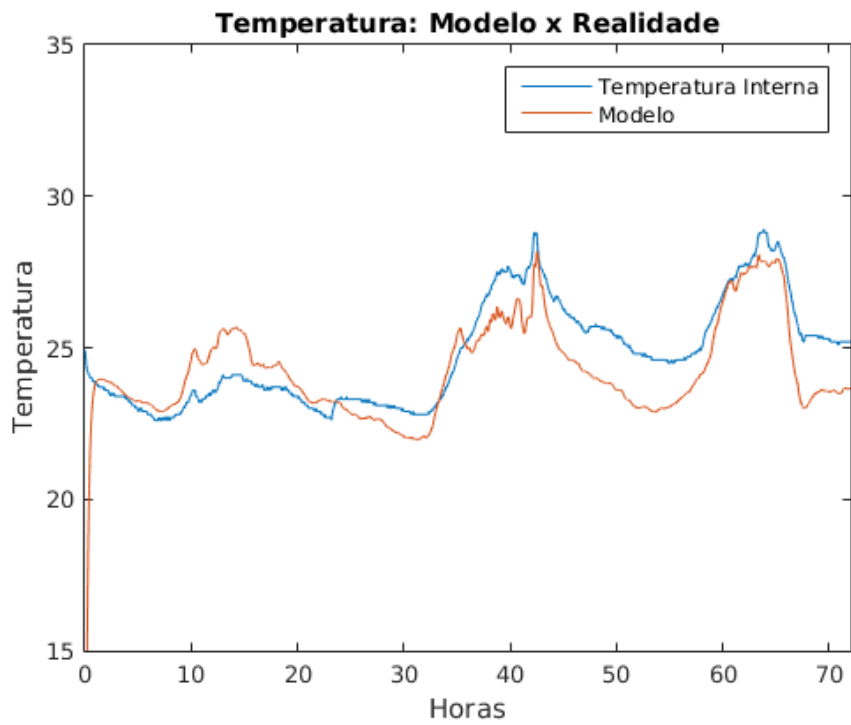


Figura 4.3: Comparação do modelo com o sistema real - 07-09 de novembro

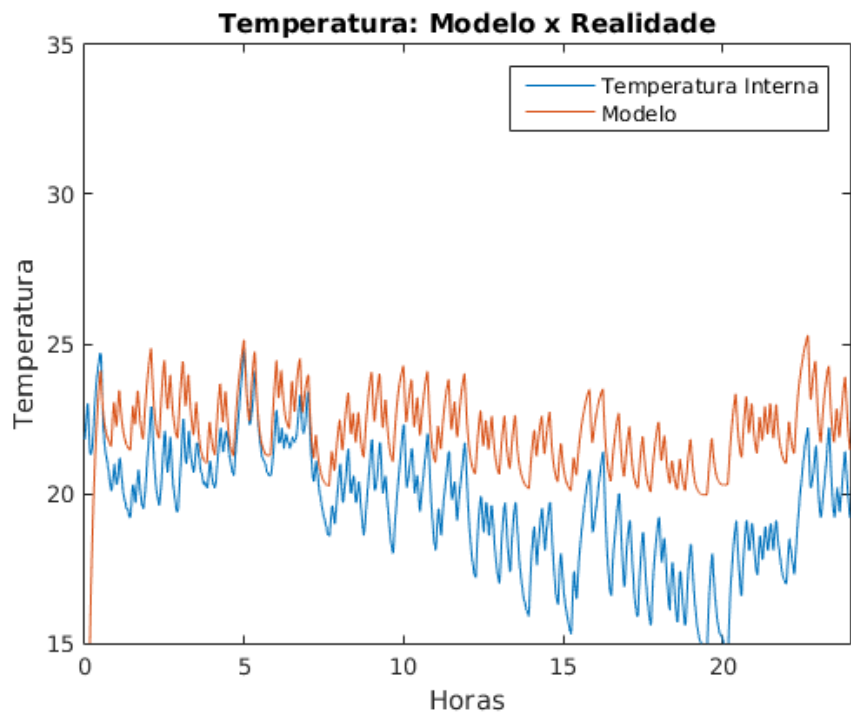


Figura 4.4: Comparação do modelo com o sistema real - 18 de outubro

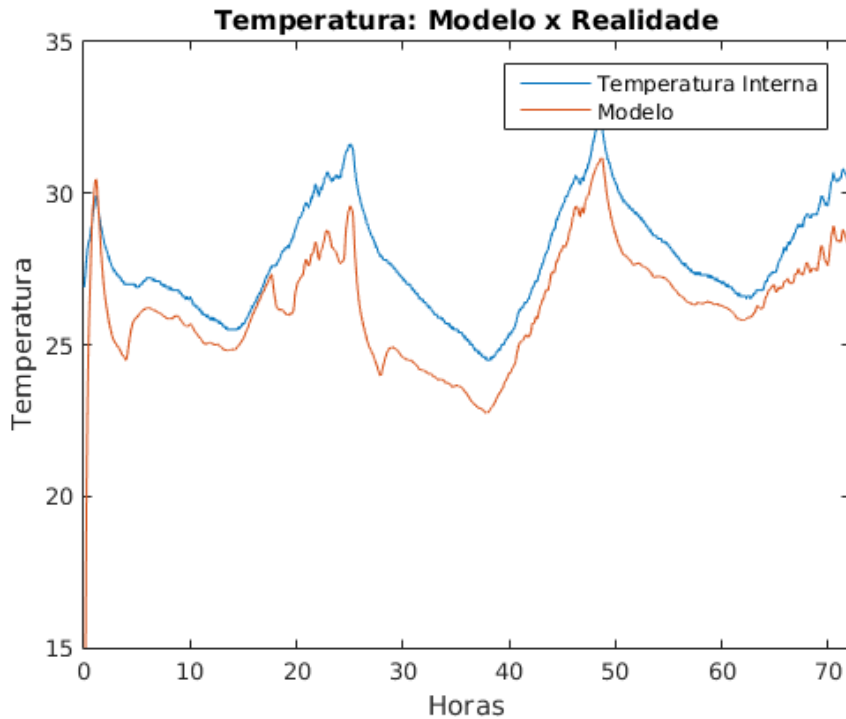


Figura 4.5: Comparação do modelo com o sistema real - 10-12 de outubro

Primeiramente, o modelo não começa do ponto correto. Isso é devido ao estado inicial do sistema que interpreta a temperatura da sala como 0 °C. Ajustar a condição inicial não ajuda muito, pois o atraso do sistema faz com que exista um período em que os dados dos sensores sejam 0 e isso faz com que o modelo interprete a sala vizinha e o ambiente externo a 0 °C, gerando uma tendência a zero da temperatura interna até os dados dos sensores se normalizarem. Foi decidido que é menos confuso um modelo que começa do zero do que um modelo com uma queda inicial difícil de explicar à priori.

Ademais, é possível ver que o modelo não é idêntico ao sistema real, existe uma possibilidade real de diferenças de valores estimados para os reais. Apesar da margem de melhora existente, o modelo segue bem as tendências do sistema mesmo nos três gráficos mostrados que são alguns dos piores casos.

Expandindo na razão de esses serem alguns dos piores casos, a figura 4.3 foi construída com dados capturados com a umidade da sala bastante elevada, o que move o sistema da situação padrão de uso e identificado, a figura 4.4 exhibe uma atuação intensa no condensador de forma aleatória o que é diferente da situação de uso corrente que é previsível com um controle liga-desliga e a figura 4.5 é próxima da situação padrão, mas mostra como o sistema não diferencia dias de mormaço e dias ensolarados.



Assim, é possível validar o modelo como um simulador razoável, embora possa ganhar qualidade ainda. Considerando que a quantidade de pessoas na sala não é previsível, a decisão de manter a porta aberta ou fechada e abrir ou fechar as persianas são difíceis de modelar, o modelo invariavelmente não será perfeito mas um modelo perfeito não é necessário na maioria das aplicações, basta um modelo aproximado o suficiente para a aplicação.

Sugestões de melhorias para o modelo são:

1. **Melhorias na relação da umidade para a temperatura.** Comparando a figura 4.3 com as outras é possível ver que quando o sistema tem umidade alta os saltos de temperatura reais são atenuados enquanto os do modelo não. Assim, o modelo tende a exagerar em subidas e descidas. Possivelmente um termo multiplicativo relacionado com a umidade pode melhorar o sistema nessa situação.
2. Adição da contribuição da radiação solar. A adição da radiação solar, apesar de ser uma contribuição positiva por metade do dia, não vai tornar o sistema instável. Apenas elevará o ponto de equilíbrio pois em um primeiro momento ela eleva a quantidade de energia somada ao sistema, mas quando a temperatura do modelo sobe a contribuição (geralmente positiva) do ambiente externo diminui e a contribuição do ar-condicionado.
3. **Nova identificação dos parâmetros.** A identificação dos parâmetros foi feita a 4 anos atrás. Possivelmente uma nova identificação pode alterar os valores dos parâmetros o suficiente para melhorar o sistema.

Acredito que o comportamento na pode ser melhorado com uma relação explícita da umidade para a temperatura

#### 4.1.4 Adição do controlador

A única parte que falta para o exercício do controle do sistema é gerar o sinal  $C\_compressor$ , o sinal de atuação. Para tal é adicionada uma referência, o cálculo do erro, um parâmetro opcional na saturação (evitar que o sistema tente esquentar a sala, visto que no Brasil isso é desperdício de energia) e por fim o controlador e o PWM. Se o sistema possuísse um inversor de frequência, o PWM seria desnecessário e o controlador o último termo.

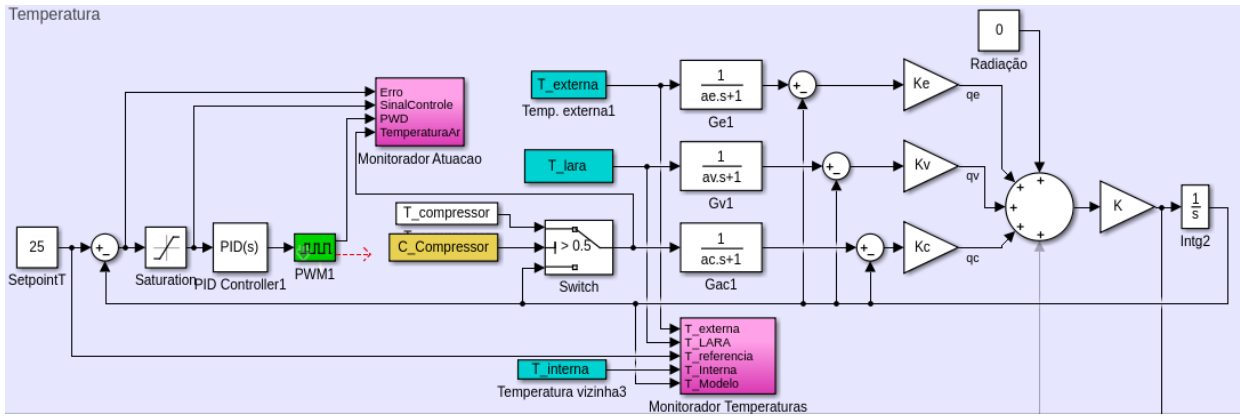


Figura 4.6: Malha fechada de temperatura

## 4.2 Umidade

A umidade do sistema é uma grandeza que não pode ser trabalhada de forma tão simples assim. Da mesma forma que na temperatura o sistema é baseado em um equilíbrio de energia, no caso da umidade o equilíbrio é de massa.

O princípio fundamental do modelo é transformar a umidade relativa capturada pelos sensores em água e trabalhar sempre somando ou subtraindo essas quantidades de água.

O modelo base para a umidade é ilustrado pela figura 4.8.

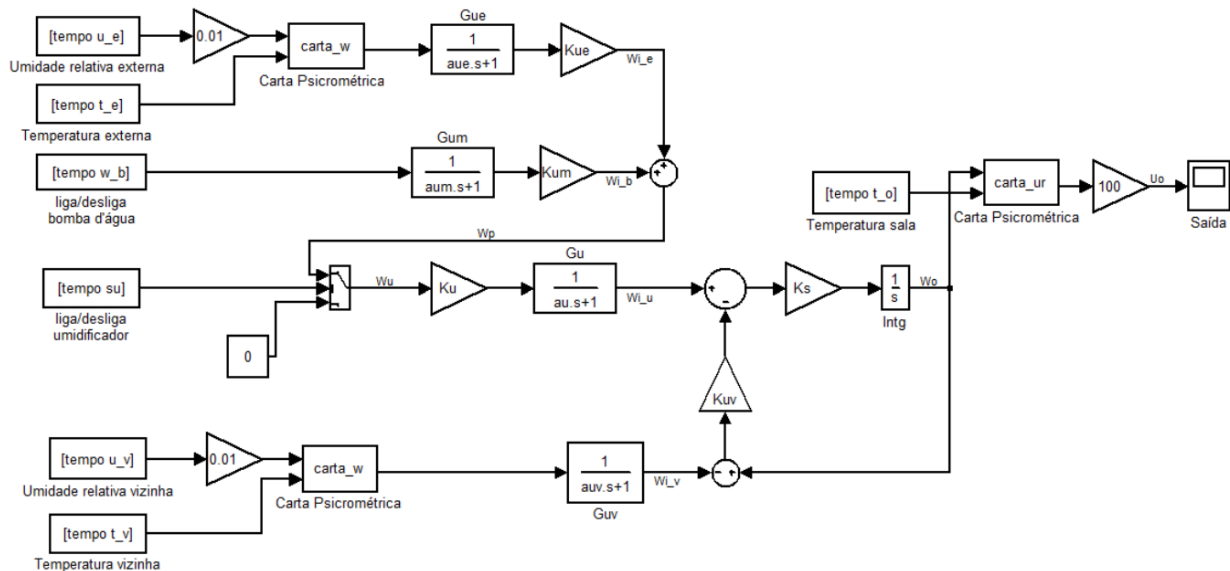


Figura 4.7: Modelo da umidade

Esse modelo alcançado no trabalho de [3], tem seus méritos e suas falhas. Este modelo trabalha com diversas hipóteses para simplificação do processo real:

1. Quando o umidificador está ligado, o sistema recebe uma adição de água baseada no ar externo e mais uma possível parcela dependendo se a bomba d'água está ou não ligada.
2. Quando o sistema de resfriamento umidificado está desligado o mundo externo é completamente irrelevante.
3. Sem influência da atuação o sistema tende à equilíbrio com a sala vizinha.

Todas as hipóteses são limitadas de uma maneira ou de outra.

A hipótese 1 tem como principal problema a questão de a componente externa ser sempre positiva. Espera-se que caso o ar esteja bem seco e a bomba d'água não esteja ligada que a adição de ar seco diminua a umidade do mesmo. Existe uma pressão positiva que faz com que exista um fluxo de ar de fora da sala para dentro da mesma e depois da sala para o LARA. Assim, o ar entrando é o externo (nesse caso, bastante seco) e o ar saindo é o da sala (no caso uma umidade média).

A segunda hipótese é um exagero pois ela considera que com o damper (retorno de ar interno) aberto, nenhum ar externo é adicionado ao ambiente apesar de a abertura externa não ser motorizada e ficar aberta o tempo todo. Existe uma necessidade desde a construção do sistema de verificar o quanto que o damper altera a composição do ar que passa pelo sistema pois o mesmo é parte ar interno e parte externo.

A última hipótese é bastante razoável na teoria enquanto na prática não é fácil de se observar. A sala é isolada bem o suficiente para que uma diferença de umidade grande se mantenha por longos períodos de tempo.

Da mesma forma que como na temperatura, para a umidade é necessário adicionar um controlador com um PWM na saída. O modelo construído para os testes porém foi adaptado devido à necessidade da criação da função que transforma umidade relativa em água no ar que não foi possível de portabilizar. Para transformar de volta para umidade relativa basta dividir a umidade atual pela umidade máxima que o ar é capaz de conter.

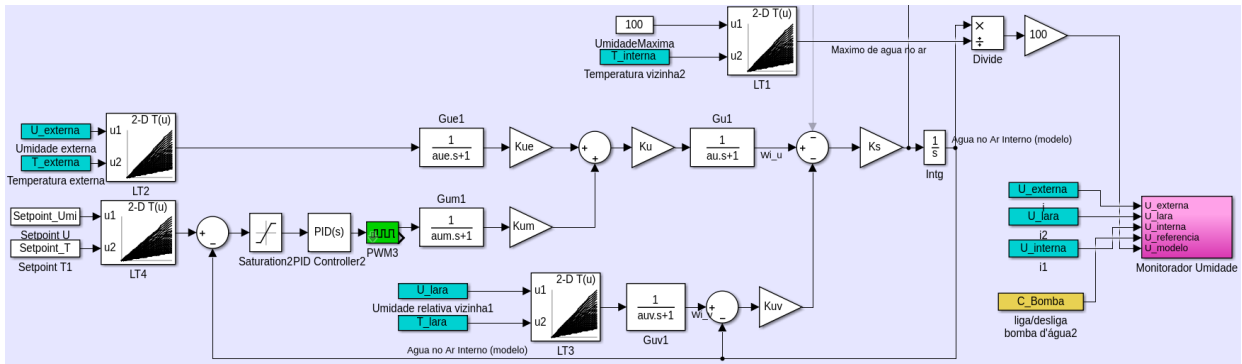


Figura 4.8: Modelo da umidade

## Capítulo 5

# Resultados

### 5.1 Expansões do sistema de controle - 2/2016

Ao assumir o controle da planta, devido à problemas de memória no Raspberry Pi que serviu como base para o sistema, foi necessário reimplementar toda a parte de software do sistema de controle proposto por BELLO [2]. Devido à fácil disponibilidade devido ao fato de os softwares serem abertos foi possível re-estabelecer a maioria das aplicações já existentes.

A única aplicação no conhecimento do autor que não foi reimplementada é um sistema chamado **Habmin** que permite visualização dos dados em um navegador de internet. O monitoramento dos dados é feito via os gráficos mais simples já embutidos no próprio openHAB e quando necessário fazer gráficos mais complexos a política decidida foi usar o MATLAB.

Partes do sistema físico foram trocadas por questões de organização e possíveis problemas de mal contato. Entre os sistemas trocados incluem-se fios, uma mini-protoboard por uma protoboard de tamanho padrão com mais contatos, a placa de relés e um sensor defeituoso.

Para isso, remove-se a capa de ambos os lados e se conecta fios de mesma cor nos elementos que se deseja conectar. Esses cabos foram usados por que estavam disponíveis como sobra de projetos anteriores e são cabos longos e resistentes aumentando as distâncias possíveis para a conexão dos dispositivos.

Não foram realizadas mudanças nas três variáveis controladas:

- Liga/Desliga do condensador da unidade split
- Liga/Desliga da bomba d'água para umidificar a manta.
- Abre/Fecha do motor do damper.

Para melhor adequação aos modelos de trabalhos anteriores e completude do modelo da planta foi decidido pela adição de mais um sensor DHT-22 (sensor de umidade e temperatura) além da troca de um sensor defeituoso. Assim, o sistema tal como implementado para este trabalho possui três sensores DHT-22:

- 1 interno à sala posicionado em cima da caixa de controle
- 1 externo à sala, posicionado na janela em contato com ambiente externo
- 1 externo à sala, posicionado na parede da sala, em contato com o LARA

A posição do Arduino em cima da caixa de controle da Full-Gauge é devido à necessidade de proximidade do mesmo com os contatos dentro da caixa. Na figura 5.1 é possível observar três cabos de rede. Um cabo de rede é para a conexão do Arduino à rede do sistema e dois são utilizados para fazer a conexão física de sensores DHT-22 distantes do Arduino.

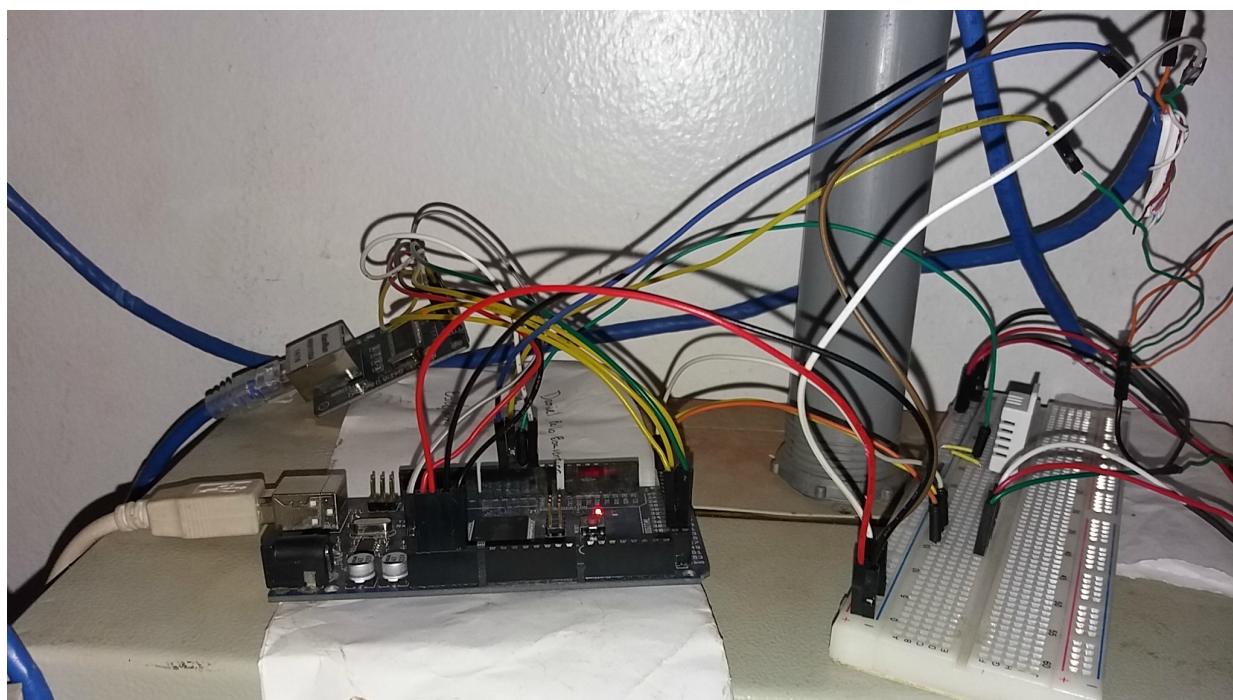


Figura 5.1: Implementação física do Arduino

Na figura é possível distinguir o sensor DHT-22 branco colocado na protoboard, este sensor serve como o sensor interno da sala e foi trocado em relação ao usado no projeto anterior pois o sensor anterior apresentou um defeito de comunicação após longos períodos de tempo. O sensor está guardado e funciona bem, mas após um período longo de tempo (e imprevisível, esse defeito foi apresentado desde após algumas horas até desde após alguns dias de funcionamento ininterrupto) o sensor não consegue enviar os dados corretamente e o resultado lido é 'NaN', um número inválido.

O Arduino tinha problemas de conexão ocasionais, com a mesma sendo perdida de tempos em tempos e isso causando um sério problema de impossibilidade de saber se o comando mandado via software alcançou o sistema real ou não. Esse problema foi contornado com funções para reiniciar o Arduino em caso de perda de conexão e um reinício diário para evitar que o registrador de tempo do Arduino alcance valores muito altos que causem problemas (teoricamente, overflow deve ocorrer a cada  $2^{32}$  ms ou próximo de 49 dias).

Um problema ignorado na construção original do sistema é o retorno se a atuação de fato ocorre. Da forma proposta por BELLO [2], o servidor openHAB recebe comandos diretos do usuário ou segue um conjunto de regras implementadas no arquivo javaone.rules em uma linguagem similar à java para efetuar a atuação do sistema sem retorno do Arduino para confirmação se a atuação de fato ocorreu.

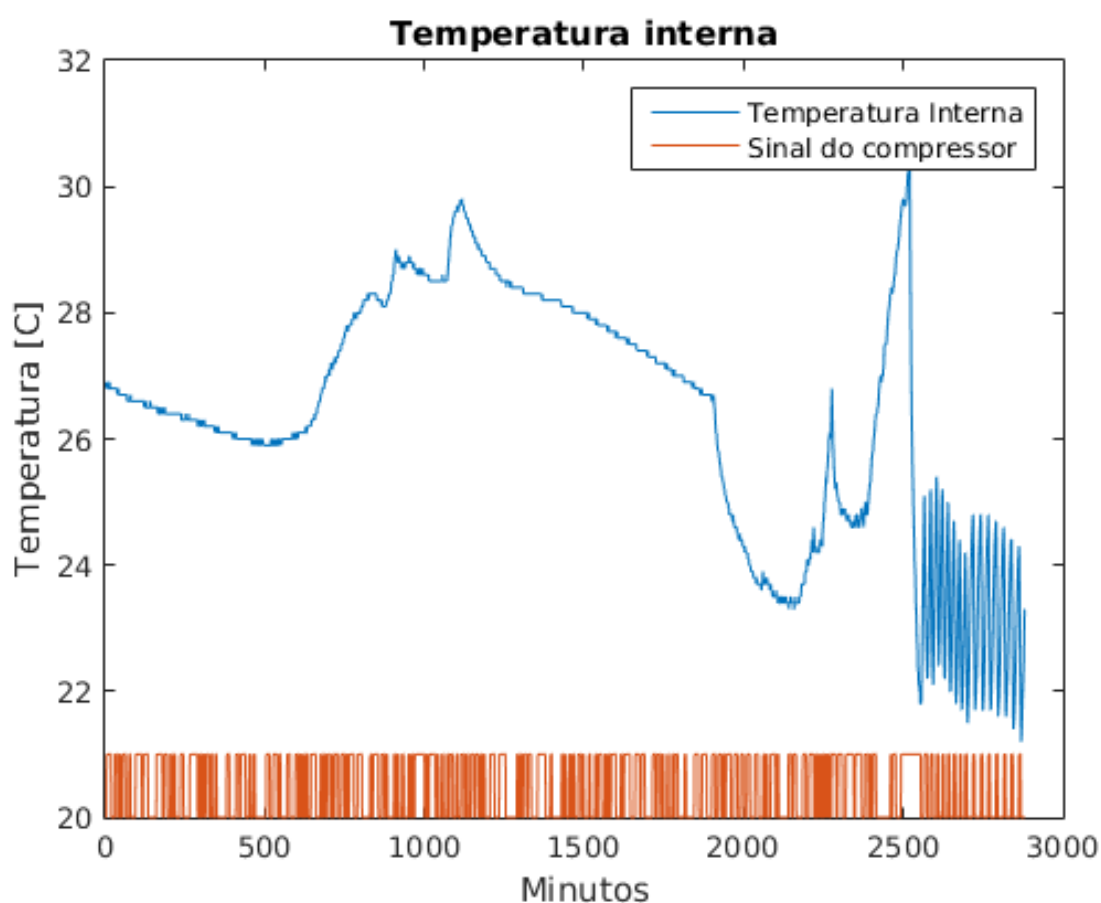


Figura 5.2: Situação em que a atuação não chega no sistema real

A forma ideal seria um retorno vindo dos sistemas finais (compressor, bomba d'água e damper), mas devido à dificuldades físicas foi decidido não utilizar um retorno dos elementos atuadores mas sim do Arduino. O resultado é que o Arduino, depois de receber o comando e decifrar o que fazer ele atua na chave relevante e manda uma mensagem de volta para o servidor.

A política implementada para retorno da informação do sistema não é perfeito. Por exemplo: caso algum dos elementos atuadores queime, o Arduino ainda atua na chave e ainda retorna uma mensagem que o sistema está em um estado baseado na chave quando na verdade ele está desligado. Existem diversos problemas de mensagens que não refletem a realidade, os mais comuns sendo tratados pelo retorno do Arduino e apenas alguns problemas comuns não são devidamente tratados. Uma breve lista de itens que podem dar problemas para que o estado em software não represente o estado no mundo real.

- **Rede:** perda de conexão, perda de pacotes (mensagens) ou problemas gerais no roteador.
- **Arduino:** defeitos gerais, corrupção de memória, reinicialização do sistema fazendo o estado real voltar para o inicial
- **Placa de relés:** corrente insuficiente para chaveamento, placa queimando, mal-contato.
- **Atuadores:** defeitos gerais, disjuntor de energia desligado.

Dos problemas listados, o único empiricamente detectado e não tratado pela mensagem de confirmação é o desligamento do sistema via disjuntor uma vez que que o Raspberry Pi, o Arduino e o roteador são ligados em uma tomada comum ligada à um disjuntor diferente do disjuntor do ar-condicionado e já houve um caso em que o ar-condicionado foi desligado por algum usuário via disjuntor. A maioria dos problemas restantes que resultariam em um estado virtual diferente do real são relacionados à defeitos graves dos dispositivos físicos.

Para executar tais procedimentos, foram adicionados três tópicos nos quais o Arduino é o publicador e o openHAB o subscrito.

1. **damperR**
2. **bombaR**
3. **condensadorR**

Os nomes foram escolhidos para serem idênticos aos tópicos nos quais o Arduino é o subscrito e o openHAB o publicador no formato em que o openHAB calcula a atuação, a menos do sufixo "R" para indicar retorno.

A questão da mensagem de confirmação faz com que caso exista um problema de comunicação e a mensagem para trocar o estado de alguma chave não alcance o Arduino, diferentemente da política anterior do sistema, o mesmo não altera o estado virtual das chaves até receber a mensagem de confirmação. Nesse caso, uma perda de mensagem faz com que o estado virtual do sistema seja diferente do estado virtual das chaves e este é idêntico ao estado real das chaves.



A política para resolver a diferença entre o estado virtual do sistema e o estado virtual das chaves é repetir os comandos à cada período  $T$  até que o Arduino retorne uma mensagem de confirmação que de fato o chaveamento foi alterado.

Quando o Arduino é ligado, foram adicionadas mensagens para o mesmo mandar o seu estado atual (no caso o inicial) para o servidor para que o mesmo altere o estado virtual das chaves. Anteriormente, após uma reinicialização do Arduino o sistema não perceberia nada de diferente e continuaria com o estado virtual das chaves antigo. Assim, se o sistema anterior ligar o compressor e houver uma reinicialização do Arduino, o mesmo reinicializa com o compressor desligado e o sistema não percebe diferença.

## **5.2 Melhorias no funcionamento remoto**

### **5.2.1 Acesso local**

Na corrupção da memória do RPi no começo do semestre, logo antes da tomada da posse do sistema todos os métodos de acesso remoto foram perdidos. Assim, primeiramente foi necessário utilizar o RPi como um computador, conectando um monitor, mouse e teclado.

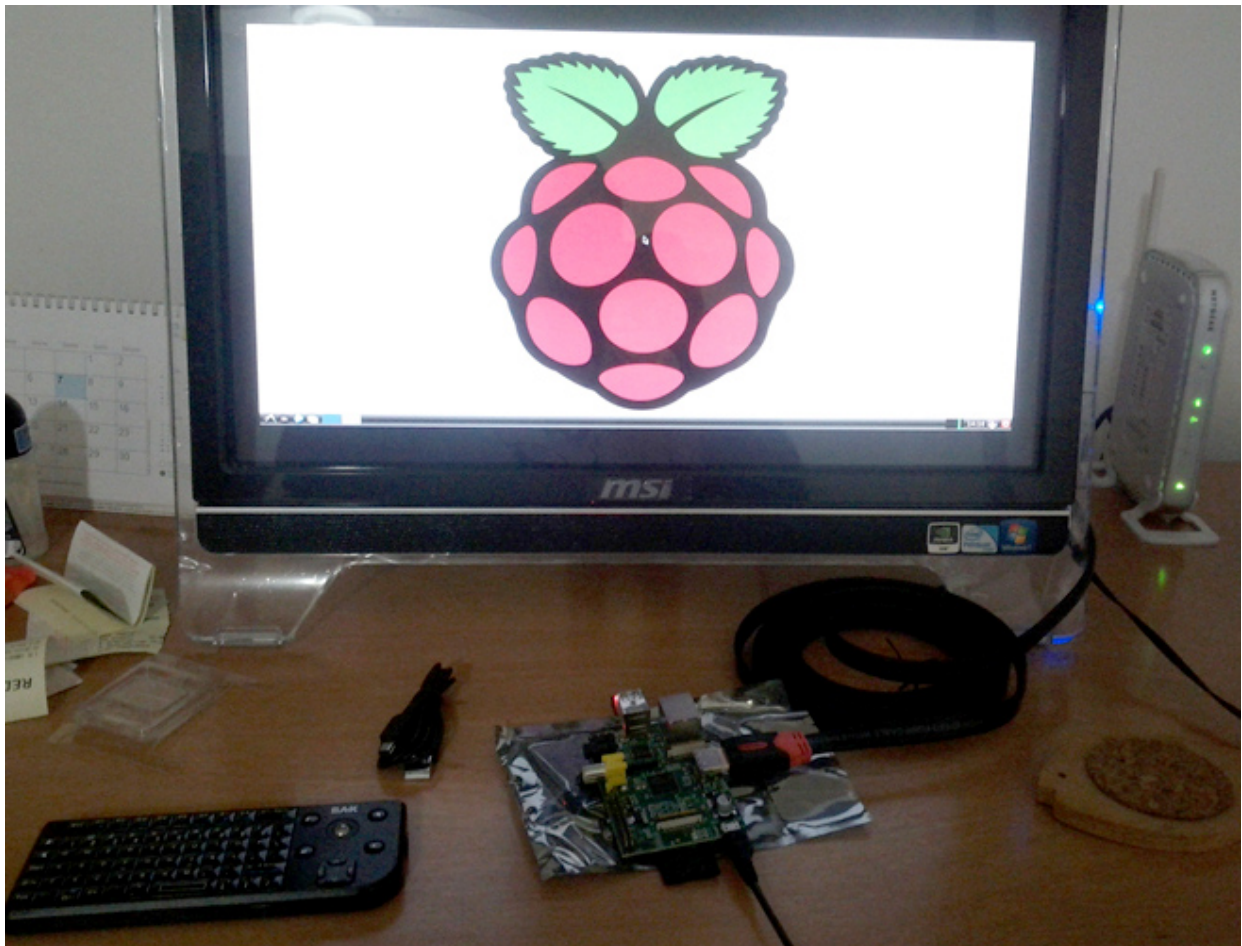


Figura 5.3: Utilização local do Raspberry Pi como computador

### 5.2.2 Acesso na rede local

Daí, foram adicionados o método de login via **SSH**, a criação de servidores SAMBA de arquivos e adicionado usuários remotos no MySQL. O login via SSH permite que um usuário de um outro dispositivo acesse a linha de comando do RPi via internet bastando para isso informar o usuário, IP e senha de interesse enquanto o SAMBA permite o acesso de pastas via rede visto um cadastro prévio e o MySQL permite o acesso ao banco de dados do sistema em um computador remoto.

```
>ssh pi@192.168.1.4
pi@192.168.1.4's password:

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Mon Nov 28 19:52:59 2016 from 192.168.1.5
pi@raspberrypi:~$ service mosquitto status
● mosquitto.service - LSB: mosquitto MQTT v3.1 message broker
   Loaded: loaded (/etc/init.d/mosquitto)
   Active: active (running) since Fri 2016-11-18 13:17:04 BRST; 1 weeks 3 days ago
     Process: 388 ExecStart=/etc/init.d/mosquitto start (code=exited, status=0/SUCCESS)
    CGroup: /system.slice/mosquitto.service
           └─401 /usr/sbin/mosquitto -c /etc/mosquitto/mosquitto.conf
pi@raspberrypi:~$ service openhab status
● openhab.service - Starts and stops the openHAB Home Automation Bus
   Loaded: loaded (/usr/lib/systemd/system/openhab.service; disabled)
   Active: active (running) since Mon 2016-11-28 19:19:31 BRST; 34min ago
     Docs: http://www.openhab.org
     Process: 10927 ExecStartPre=/usr/share/openhab/bin/setpermissions.sh (code=exited, status=0/SUCCESS)
    Main PID: 11106 (openhab.sh)
    CGroup: /system.slice/openhab.service
           └─11106 /bin/sh /usr/share/openhab/bin/openhab.sh -o
           └─11135 /usr/bin/java -Dlogback.configurationFile=/etc/openhab/logback.xml -Dosgi.clean=true -Declipse.ignoreApp=true
pi@raspberrypi:~$ exit
logout
Connection to 192.168.1.4 closed.
```

Figura 5.4: Login via SSH

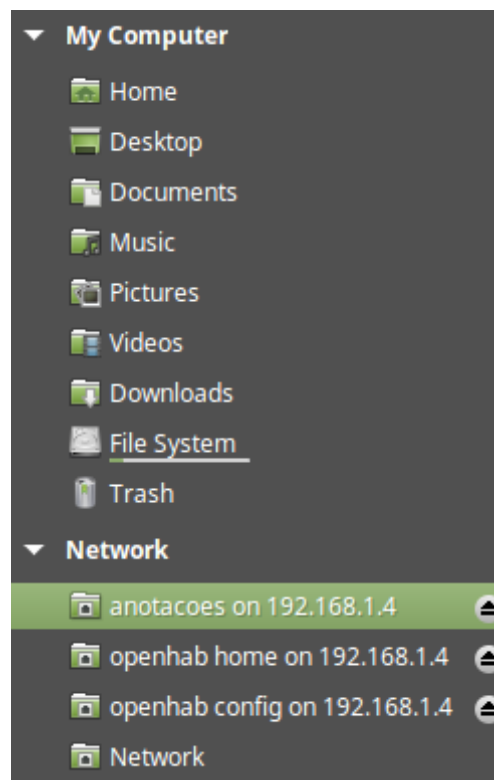


Figura 5.5: Acesso de pastas via SAMBA

```
dan@dan-Lenovo ~ $ mysql openhab -h 192.168.1.4 -u danilo -p
Enter password:
Reading table information for completion of table and column names
You can turn off this feature to get a quicker startup with -A

Welcome to the MySQL monitor.  Commands end with ; or \g.
Your MySQL connection id is 80
Server version: 5.5.50-0+deb8u1 (Raspbian)

Copyright (c) 2000, 2016, Oracle and/or its affiliates. All rights reserved.

Oracle is a registered trademark of Oracle Corporation and/or its
affiliates. Other names may be trademarks of their respective
owners.

Type 'help;' or '\h' for help. Type '\c' to clear the current input statement.
mysql>
```

Figura 5.6: Acesso aos dados do sistema via MySQL pela linha de comando

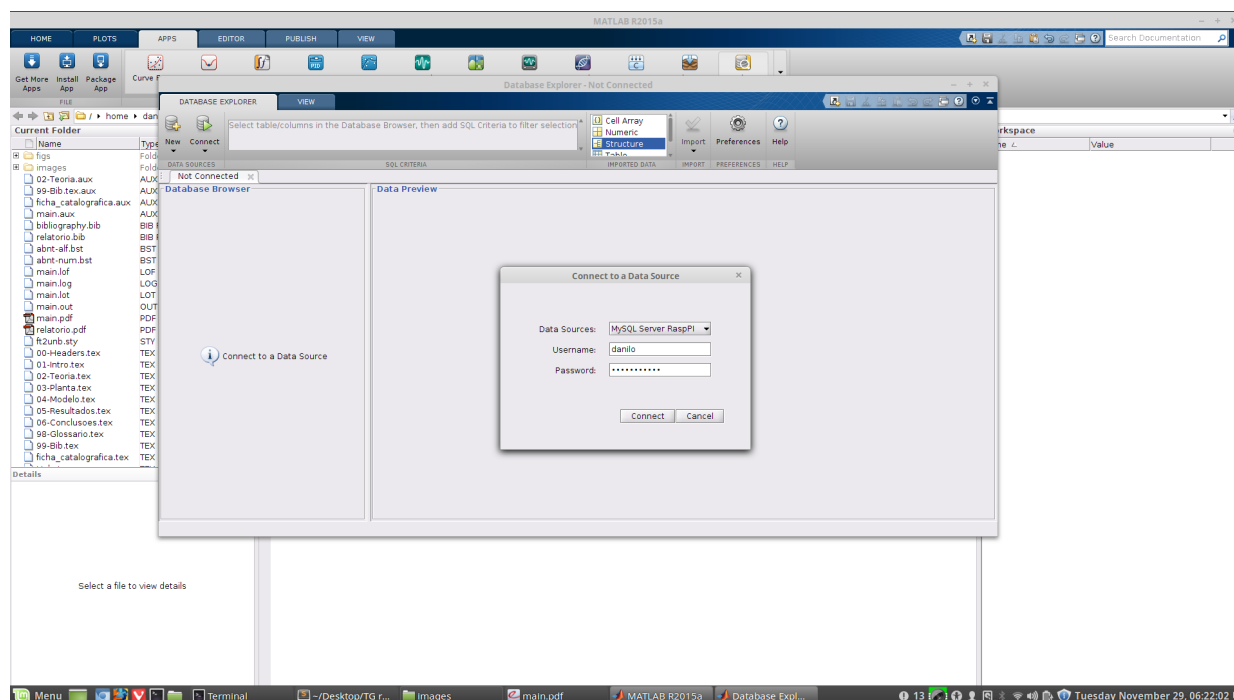


Figura 5.7: Acesso aos dados do sistema via MySQL por um aplicativo do Matlab

Com a adição destes três métodos não é mais necessário utilizar o RPi como computador. É possível via rede local usar um notebook, um PC normal ou até mesmo smartphones e tablets para acessar as informações do Raspberry Pi. É importante ressaltar que com o openHAB em funcionamento, o mesmo gera um servidor de páginas de internet locais nas quais são possíveis monitorar o funcionamento do sistema sem alterar o openHAB.

Nesse ponto do sistema, um usuário com a senha da rede "ArCondicionadoLara" pode acessar as páginas do openHAB, apertar botões e alterar as referências de temperatura e umidade mas não consegue alterar o formato das páginas, as variáveis internas do sistema, ver o banco de dados MySQL ou ter qualquer acesso ao Raspberry Pi. Este é o nível de acesso desejado para os usuários do laboratório, podem ligar e desligar os sistemas de saída sem capacidade de alterar o sistema de controle enquanto o nível administrador terá acesso aos serviços SAMBA, SSH e MySQL por exemplo para alterar o sistema de controle.

### 5.2.3 Acesso via rede remota

O próximo passo foi a adição de acesso remoto fora do LARA. Para isso foram utilizados dois serviços o "dataplicity" e o "MyopenHAB".

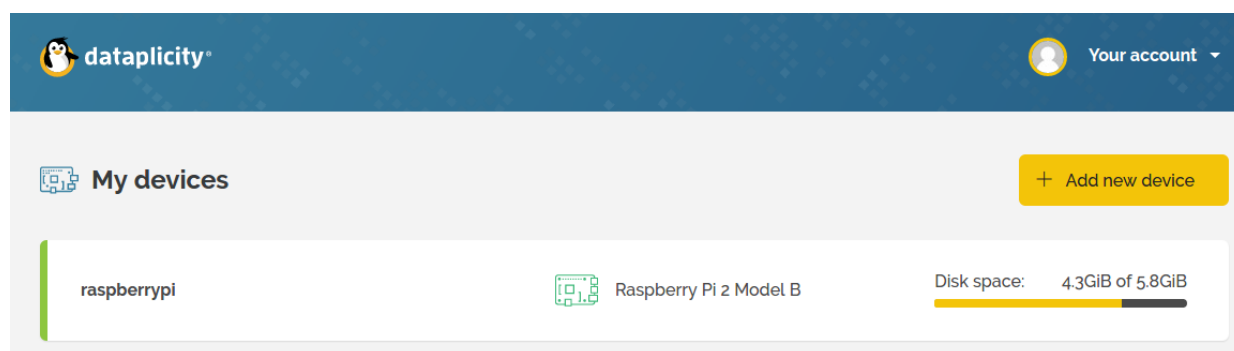


Figura 5.8: Acesso remoto ao Raspberry Pi

O dataplicity permite o acesso remoto à linha de comando do RPi. Para isso, é necessário cadastrar um e-mail e senha para permitir o acesso à um dispositivo raspberry conectado à internet. Essa conexão funciona, mas tem problemas de atraso de comunicação devido ao servidor intermediário. A conexão não é entre o computador local e o RPi, mas sim entre o computador local, o servidor do dataplicity e o RPi.

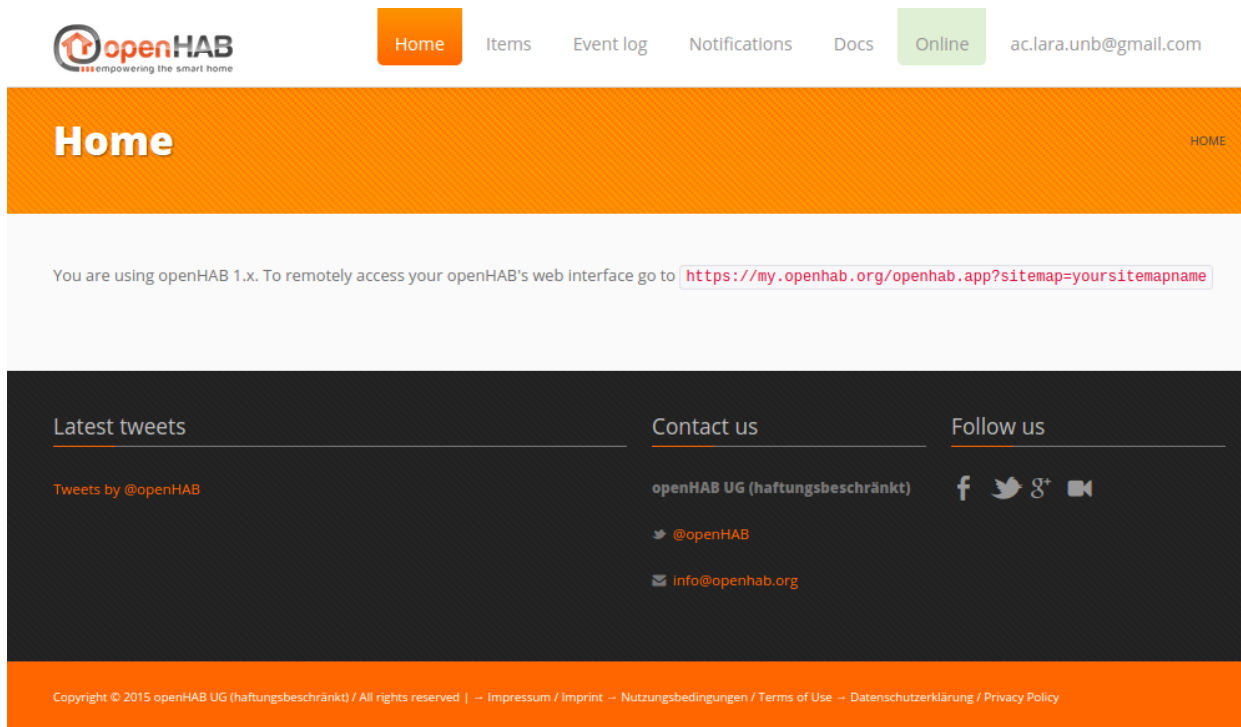


Figura 5.9: Acesso remoto ao sistema openHAB

O sistema MyopenHAB é um sistema fornecido pelo próprio openHAB e permite o acesso remoto da maioria das funções online do openHAB. Assim, remotamente é possível ver as páginas do sistema, é possível ver as alterações mais recentes das variáveis do sistema e receber notificações de eventos importantes.

Estes serviços só funcionam com uma conexão entre a rede local e a internet. Para isso, usou-se um cabo de rede para conectar o roteador com a rede local do LARA. Assim, com a rede local dentro da rede do LARA e a mesma conectada na internet é possível acessar dados via uma rede conectada na internet.

O fato desses serviços só funcionarem com conectividade à internet significa que problemas na rede do LARA ou na rede da UNB geram problemas de inacessibilidade mesmo com o sistema funcionando.

### 5.3 Testes preliminares

Foram decididos fazer testes preliminares para a verificação se de fato o sistema manteve sua eficácia ao longo do tempo, afinal de contas o sistema foi cosntruido em 2009, sete anos atrás.

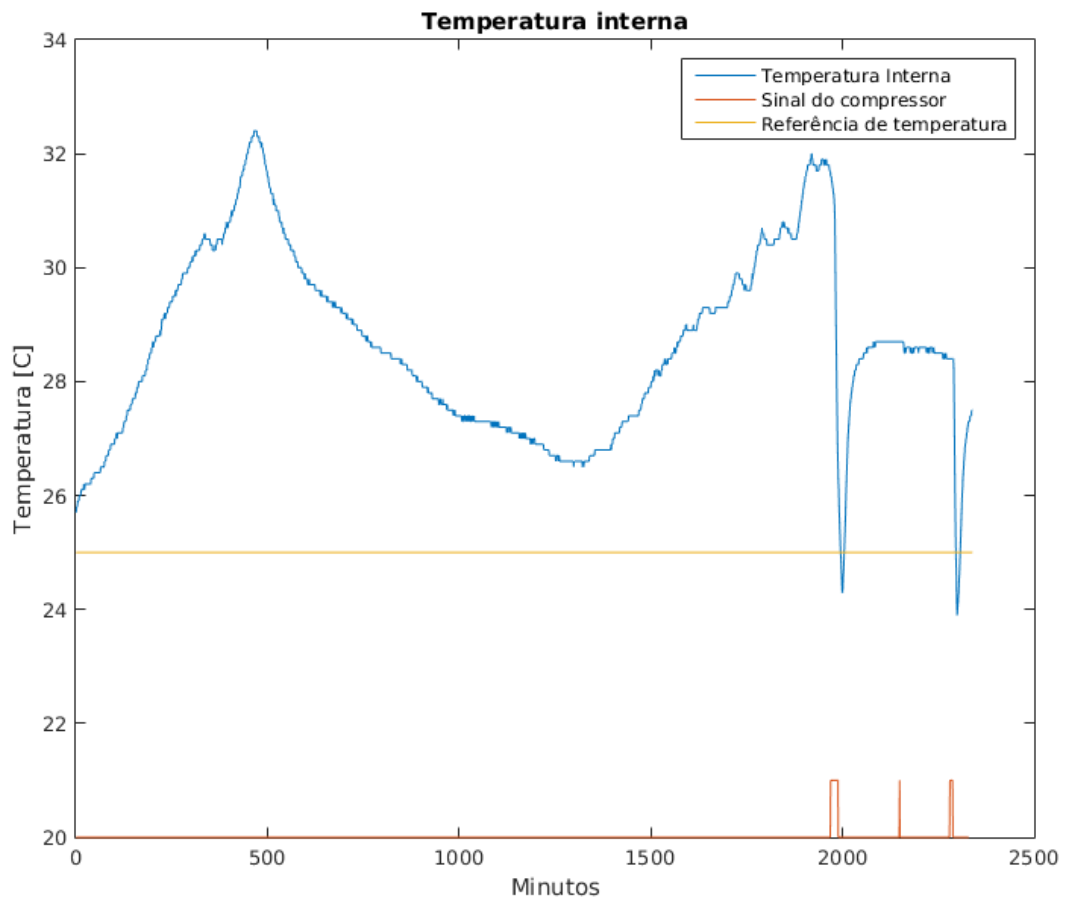


Figura 5.10: Resultado da atuação do compressor

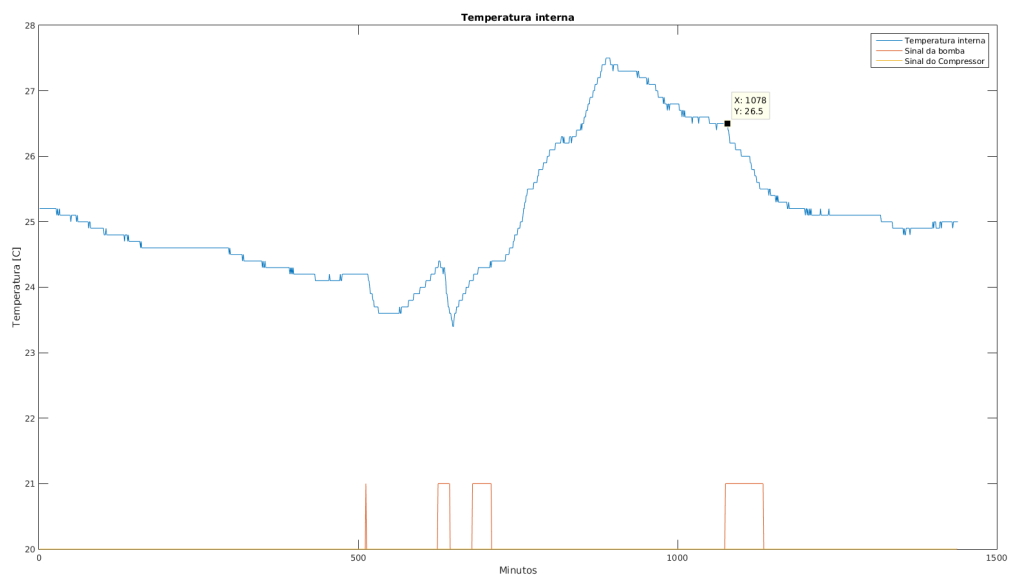


Figura 5.11: Resultado da atuação da bomba d'água

O sistema evaporativo tem capacidade de atuação limitada. A imagem 5.11 ilustra uma situação que com uma hora de funcionamento da bomba d'água a temperatura da sala caiu 1 °C em uma situação normal, as 18h da tarde. A umidade da sala no mesmo período subiu de 30% para 50%. Em termos práticos o sistema de refrigeração evaporativo é muito inefetivo em controlar a temperatura, com resposta moderada e lenta.

Já o compressor, cumpre o que se espera. O dispositivo é capaz de reduzir a temperatura em 7.3 °em 20 minutos em uma situação similar.

A conclusão principal é que o sistema de climatização tem que ter como componente primária o ar-condicionado tradicional e uma vez próximo do ponto desejado é possível usar o sistema de resfriamento evaporativo para ajudar a manutenção e diminuir a quantidade de acionamentos do ar-condicionado.

## 5.4 Controle PID

Foi decidido a adição de um segundo modo de controle, um controle PID para controlar automaticamente o sistema funcionando chaveado com um sistema que o usuário ligar e desliga quando ele quiser. Isso é definido com uma chave virtual que o usuário seleciona para alternar entre o modo manual e o automático.

Um empecilho grande para o sistema é a questão da atuação. O sistema de ar-condicionadoo split existente na sala não tem um inversor, e assim a atuação tem que ser binária apenas com um liga ou desliga. Assim, é necessário utilizar PWM para atuar com o sinal de controle. O problema, no entanto, é que com o acionamento de grandes cargas não é possível usar um PWM tradicional com KHz de frequência.

Dada a recomendação de depois de desligar o ar-condicionado mantê-lo desligado por alguns minutos para depressurizar o sistema, o PWM tem que ser mais longo e isso gera um problema de um PWM ficar alguns minutos ligado e alguns desligado tornando a atuação mais próxima de um controle Liga-Desliga do que um controle PID tradicional.

A implementação do PWM é simples, dada uma janela de tamanho  $T$  e uma entrada com valor entre 0 e 1, mapeia-se a atuação do sistema entre 0 e 100% do tempo  $T$ . Assim, dada uma janela de 5 minutos e sinal 0.5, a saída fica 2.5 minutos ligada e 2.5 desligada. Não foram consideradas mais divisões (por exemplo, em dez partes) devido à recomendação de procurar manter o ar-condicionado desligado por alguns minutos antes de ligá-lo de novo, sendo muito mais fácil atender esse requisito com tempos mais previsíveis de troca de estado.



Na prática, o problema da saída em PWM faz com que a saída seja parecida com um liga-desliga com o integrador se esforçando para que a média seja próxima da referência. Um dos problemas é que, de uma maneira geral, o público não quer que a temperatura fique um pouco mais alta de dia para compensar a noite aonde ela fica mais baixa.

O controle implementado pode ser facilmente alterado, foram adicionados ao openHAB os parâmetros do controlador -o ganho proporcional, o derivativo e o integral- de ambos os controladores e assim ajuste fino pode ser feito pelo site sem necessidade de paralisação ou reinicialização do sistema. Dessa forma, o site funciona bem como uma tela de supervisor para o sistema, mas sendo implementada com bastante facilidade em menos de 30 linhas o que mostra a força do openHAB pois telas de sistemas supervisórios usando programas industriais são bastante trabalhosas.

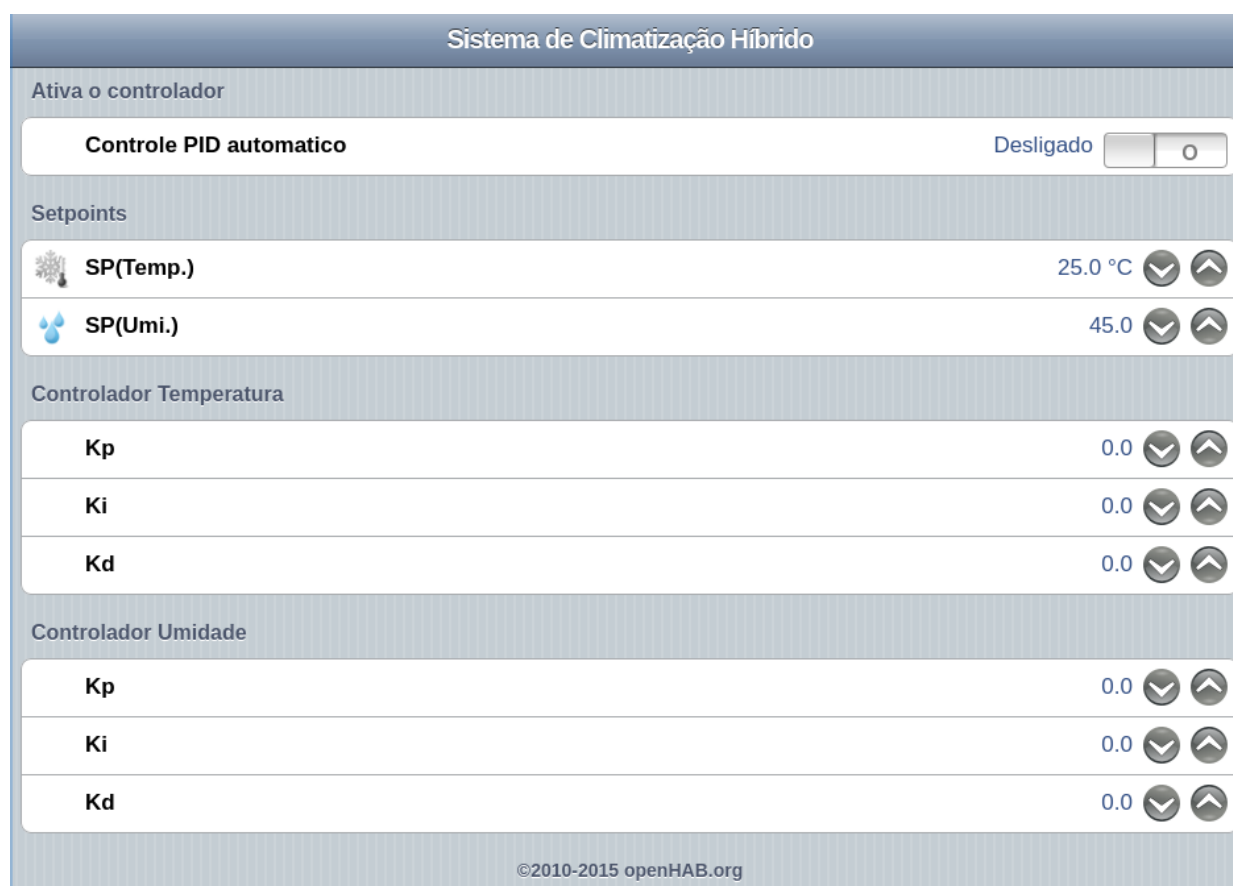


Figura 5.12: Interface para ajuste do controlador

Essa tela de está acessível em "<http://192.168.1.4:8080/openHAB.app?sitemap=ajustaControlador>". Ou seja, no dispositivo com IP 192.168.1.4 (o RPi que serve como servidor), na porta 8080 (a porta o servidor openHAB) e a página é a "ajustaControlador".

## 5.5 Controladores Projetados

## 5.6 Resultados

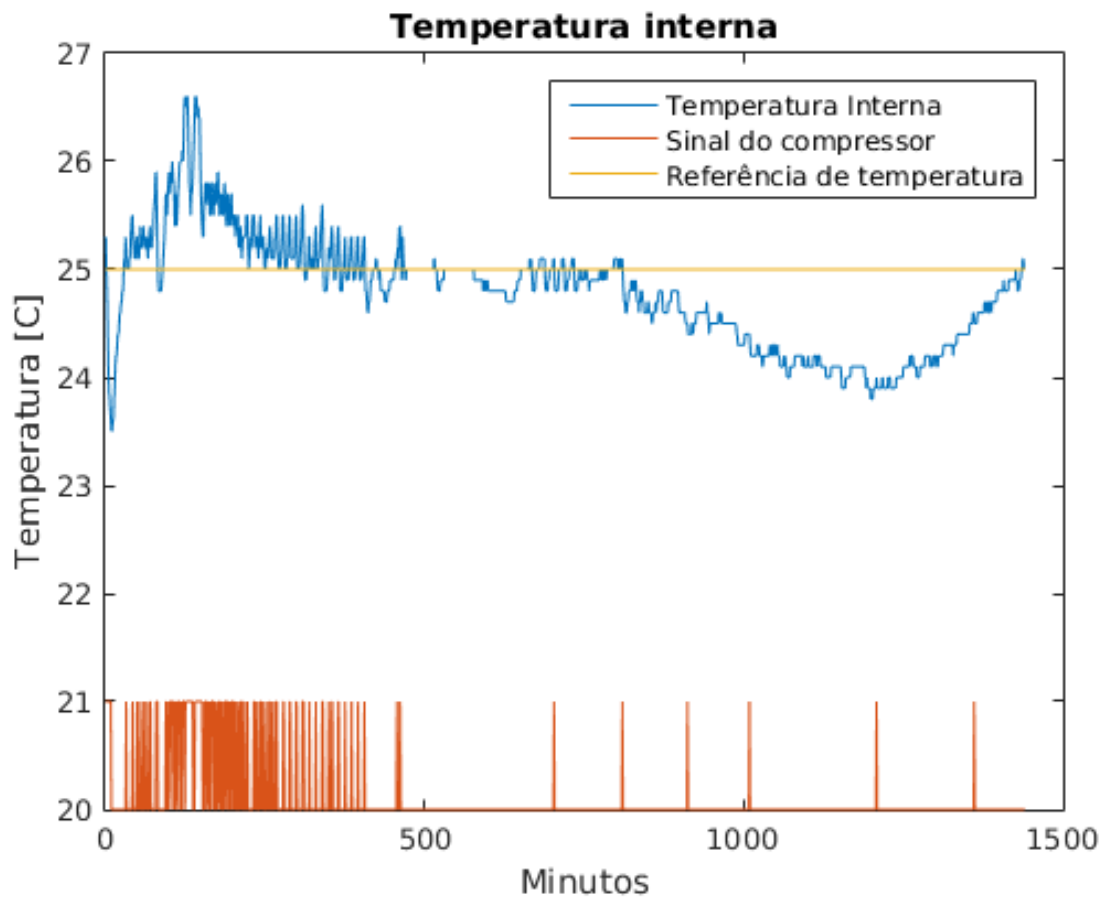


Figura 5.13: Acompanhamento diário da temperatura

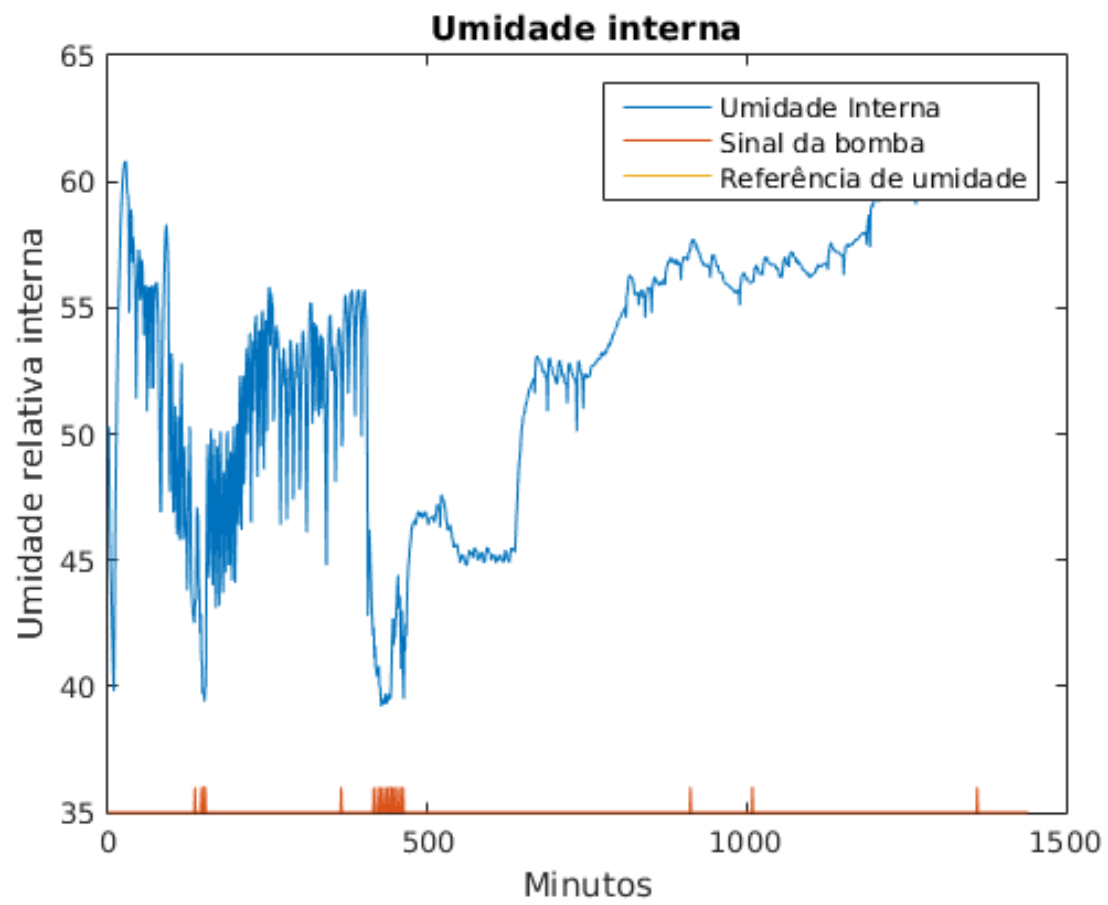


Figura 5.14: Acompanhamento diário da umidade

## Capítulo 6

## Conclusões

# Referências Bibliográficas

- [1] OLMOS, J. L. *Sistema híbrido de climatização visando conforto térmico e eficiência energética*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM- 393/09, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95p.
- [2] BELLO, D. *Automação com openHAB de sistema de climatização híbrida visando eficiência energética*. 2016. Trabalho de Graduação - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- [3] VIANNA, P. I. E. *Automação de um sistema de climatização visando conforto térmico e uso racional da energia*. 2012. Trabalho de Graduação - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- [4] RODRIGUES DE OLIVEIRA, F. A. *Instrumentação e identificação de um ambiente predial visando controle preditivo do conforto térmico*. 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM – 415/10, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 108p.
- [5] BOTTEGA, L.; MELEGARI, S. *Análise da Eficiência de Um Sistema de Resfriamento Evaporativo para a Cidade de Cascavel-Pr. 1*. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v.4, p. 131-143, 2015
- [6] CARDOSO, S., CAMARGO, J. R., TRAVELHO, J. S. *Introdução à utilização do resfriamento evaporativo para condicionamento de ar automotivo*, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, COBEM99, Águas de Lindóia, SP. 1999.
- [7] CAMARGO, J. R. *Resfriamento evaporativo: poupando a energia e o meio ambiente*. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, SP. 2004.
- [8] RIANGVILAIKUL, B.; KUMAR, S. *An experimental study of a novel dew point evaporative cooling system*. Energy and Buildings, v.42, n.5, p.637-644, 2010.
- [9] MORGADO, I. B.; MELERO, S. T.; NEILA, J. G.; ACHA, C. R. *Evaporative cooling efficiency according to climate conditions*, 2011 International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities, Madrid, Spain. 2011.
- [10] CREDER, H. (2000), *Instalações de Ar Condicionado*, 5a Edição, Editora Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 2000.
- [11] Ecobrisa website, [on line] disponível: <http://www.ecobrisa.com.br/funcionamento.html>, (2009, julho).

[12] MUNTERS, Painéis De Resfriamento Evaporativo Celdek, Munters Brasil Indústria e Comércio Ltda. Curitiba.2008.