

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**CONTROLE DE CLIMATIZAÇÃO HÍBRIDA
VISANDO A REDUÇÃO DO CONSUMO
DE ENERGIA**

William Batista Aguiar Motta

Brasília, Junho de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASILIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**CONTROLE DE CLIMATIZAÇÃO HÍBRIDA
VISANDO A REDUÇÃO DO CONSUMO
DE ENERGIA**

William Batista Aguiar Motta

Relatório submetido ao Departamento de Engenharia

*Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação*

Banca Examinadora

Prof. Adolfo Bauchspies, ENE/UnB _____

Orientador

Prof. Lélio Ribeiro Soares Júnior, ENE/UnB _____

Examinador interno

Prof. Marco Antônio F. do Egito Coelho, ENE/UnB _____

Examinador interno

Dedicatória

Aos meus pais, irmãos, minha esposa Caroline Betker Mariano de Oliveira Motta, meus animais de estimação e a toda a minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegassem até esta etapa da minha vida.

William Batista Aguiar Motta

Agradecimentos

Aos meus pais acreditaram em mim e me deram e ainda me dão suporte para alcançar meus sonhos.

A minha esposa Caroline, que também foi revisora dos meus textos e que não poupou franqueza ao criticar a falta de conectivos nos rascunhos deste manuscrito, mas que principalmente não saiu do meu lado, nem nos momentos mais difíceis.

Aos estudantes habitantes do Lara que acompanharam de perto os desafios que superei, sempre propondo possíveis soluções para os problemas que surgiam durante a execução deste trabalho.

Ao professor do ENE, pela orientação e seu grande desprendimento em ajudar-me.

Ao Laboratório de Robótica e Automação pela disponibilização do material e o espaço necessário para a pesquisa e desenvolvimento deste projeto.

Aos técnicos de laboratório que sempre foram cordiais e prestativos.

Ao Miaw e a Eluna, meus adotados de estimação, que sempre me deram apoio emocional e controle de estresse durante todo o processo.

William Batista Aguiar Motta

RESUMO

O intuito deste projeto foi conhecer melhor uma das áreas em que a engenharia de controle e automação vem atuando no mercado, que é a climatização de ambientes comerciais, residenciais e industriais. O presente trabalho leva em consideração os parâmetros que são exigidos nesse sistema em diferentes situações com a redução de custos de instalação e manutenção como também de operação.

O objetivo deste trabalho foi reestruturar um sistema de climatização híbrido já existente com a implementação de controladores capazes de atender os requisitos daqueles que contratam este serviço, sendo que um dos principais é a redução do consumo de energia. Tais controladores devem atuar sobre a temperatura e umidade do ambiente visando o conforto térmico e melhor eficiência no quesito consumo de energia.

Foram estudados e implementados três controladores distintos, comparando-os uns aos outros em cada um dos seguintes quesitos: temperatura média, variância da temperatura, umidade média, variância da umidade e por fim consumo de energia.

Cada controlador se destacou em um quesito diferente, portanto a escolha do controlador ótimo deve ser analisada junto ao cliente, observando-se suas necessidades específicas, para estabelecer assim o controlador que atende a esses critérios.

ABSTRACT

The purpose of this project was to know better one of the areas in which control and automation engineering has been operating in the market, which is the air conditioning of commercial, residential and industrial environments. The present work considers the parameters that are required in this system in different situations with the reduction of installation and maintenance costs as well as operation.

The objective of this work was to restructure an existing hybrid HVAC system with the implementation of controllers capable of meeting the requirements of those who hire this service, and one of the main ones is the reduction of energy consumption. Such controllers should act on the temperature and humidity of the environment aiming at thermal comfort and better efficiency in the consumption of energy.

Three distinct controllers were studied and implemented, compared to each other in each of the following requirements: Average temperature, temperature variance, average humidity, humidity variance and energy consumption.

Each controller stood out in a different item, so choosing the optimal controller should be analyzed with the customer, observing their specific needs, to establish the controller that meets these criteria.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS DO PROJETO.....	1
1.2 APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 SISTEMAS HVAC	2
2.1.1 CONDICIONADOR DE AR	2
2.2 CARTAS PSICROMÉTRICAS	3
2.2.1 PROJETO DE CLIMATIZAÇÃO COM O AUXILIO DE CARTAS PSICROMÉTRICAS	5
2.3 MODELAGEM DO TRANSPORTE DE CALOR.....	8
2.3.1 RESFRIAMENTO DO AR INTERNO À SALA DE REUNIÕES.....	8
2.3.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DAS PAREDES, TETO E PISO.....	9
3 DESENVOLVIMENTO.....	13
3.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	13
3.2 RECONSTRUÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL	14
3.3 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA PLANTA	20
3.4 PROJETO DOS CONTROLADORES	20
3.4.1 CONTROLE LIGA-DESLIGA.....	20
3.4.2 COMPENSADOR PROPORCIONAL DIGITAL.....	21
3.5 IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR	22
3.5.1 IMPLEMENTAÇÃO UTILIZANDO RELÉS.....	22
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	24
4.1 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DA PLANTA	24
4.2 SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE CALOR	27
4.3 SIMULAÇÕES COM CONTROLADORES	29
4.4 IMPLEMENTAÇÃO DOS CONTROLADORES	31
4.5 ENSAIOS COM CONTROLADORES	32
5 CONCLUSÕES.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
ANEXOS	40
I TRIACS	41
I.1 MOTIVAÇÃO PARA O USO DO CONVERSOR AC-AC	43
I.2 SIMULAÇÃO DO CONVERSOR AC-AC.....	43
I.3 IMPLEMENTAÇÃO DO CONVERSOR AC-AC	44

LISTA DE FIGURAS

2.1	Ciclo de refrigeração de um condicionador de ar doméstico, obtida de (1)	3
2.2	Carta psicrométrica, obtida de (2).	4
2.3	Temperatura de bulbo seco, obtida de (1)	5
2.4	Temperatura de bulbo úmido, obtida de (1)	5
2.5	Umidade relativa, obtida de (1)	5
2.6	Condições de contorno para o verão em laranja e para o inverno em azul.....	6
2.7	Caminho percorrido pelas propriedades do ar: Sistema híbrido em azul, Ar condicionado em laranja, Umidificador Evaporativo em verde.....	7
2.8	Fluxo de calor entre duas superfícies imersas em ar à temperaturas distintas; Modelagem utilizando resistências térmicas. Retirado de (3).....	10
2.9	Modelo resistivo do sistema.....	11
2.10	Diagrama Simulink para a transferência de calor através das paredes para uma sala cercada por três salas a três temperaturas distintas.....	12
3.1	Painel elétrico da bancada experimental.	14
3.2	Atuadores, obtida de (4).	15
3.3	Vista lateral dos atuadores, obtida de (4).	15
3.4	Vista superior dos atuadores, obtida de (4).	15
3.5	Vista superior da sala de reuniões, obtida de (4).	16
3.6	Interligação elétrica entre evaporadora e condensadora, obtido de (5).	17
3.7	Diagrama elétrico condensadora, obtido de (5).	17
3.8	Diagrama elétrico evaporadora, obtido de (5).	18
3.9	Linhas da evaporadora.....	19
3.10	Placa de circuitos da evaporadora.	19
3.11	Placa de circuitos da evaporadora reconfigurada.....	19
3.12	Controle remoto com fio.	19
3.13	Condensadora.....	20
3.14	Terminais da condensadora.	20
3.15	Diagrama de blocos da planta controlada por um controlador do tipo relé com histerese.	21
3.16	Diagrama de blocos da planta controlada por um controlador digital proporcional.	22
4.1	Ensaio Condensadora.....	25
4.2	Ensaio Umidificador.	26
4.3	Ensaio Condensadora e Umidificador.	27
4.4	Modelo pronto para ser calibrado.....	28
4.5	Simulação e comparação do modelo com os dados experimentais.	29
4.6	Simulação com controlador do tipo relé com histerese.....	30
4.7	Simulação com controlador do tipo digital proporcional.	31
4.8	Arduino, Relés, DHTs e circuitos de apoio.	32

4.9	Painel com contactoras, medidor de energia, disjuntores e transformador.....	32
4.10	Ensaio com temperatura e umidade controladas por Compensador Proporcional Digital.	34
4.11	Ensaio com temperatura e umidade controladas por Relés com Histerese.	35
4.12	Ensaio com temperatura controlada por Relé com Histerese.	36
I.1	Triac, retirado de (6).	41
I.2	Forma de onda sobre a carga após um disparo com atraso.	42
I.3	Circuito de isolamento elétrico e adequação de sinal para um triac BTA12. Projetado a partir de (7).....	42
I.4	Detector de passagem por zero.....	43
I.5	Sequência de ângulos de disparo obtidas em simulação.	44
I.6	Testes do conversor AC-AC, ângulo de disparo 171 graus.	44
I.7	Testes do conversor AC-AC, ângulo de disparo 90 graus.....	45
I.8	Testes do conversor AC-AC, ângulo de disparo 9 graus.	45

LISTA DE TABELAS

2.1	Resistências térmicas.	11
3.1	Cronograma de atividades.	13
3.2	Conforto térmico, segundo (8).	14
4.1	Dados utilizados para a simulação de calibração.	28
4.2	Consumo de energia por cada controlador em kWh.....	33
4.3	Sumário dos dados experimentais.	33

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	$[m^2]$
C_p	Calor específico a pressão constante	$[kJ/kg.K]$
h	Coeficiente de convecção	$[W/m^2K]$
K	Coeficiente de condução	$[W/mK]$
P	Pressão Atmosférica	$[kPa]$
R	Constante universal dos gases perfeitos	$[kJ/kgK]$
T	Temperatura em graus Kelvin	$[K]$
V	Volume	$[m^3]$

Siglas

ASHRAE	American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers
ENE	Departamento de Engenharia Elétrica
HR	Umidade Relativa
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LARA	Laboratório de Robótica e Automação
LGR	Lugar Geométrico das Raízes
MIMO	Multiple Input Multiple Output
PWM	Pulse-Width Modulation
TBU	Temperatura de Bulbo Úmido
UnB	Universidade de Brasília

1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais as pessoas têm buscado criar ambientes controlados que favoreçam a execução de suas atividades diárias e a engenharia de controle e automação tem sido requisitada cada vez mais neste campo. Tem crescido a demanda por sistemas de climatização inteligentes, capazes de reduzir custos de operação e manutenção, principalmente em grandes centros urbanos. Brasília possui uma grande quantidade de escritórios, e estes podem se beneficiar com aprimoramentos que a indústria de climatização tem desenvolvido. Como estudante de engenharia mecatrônica vejo potencial de evolução neste campo e como habitante de Brasília vejo uma oportunidade para ingressar no mercado rapidamente. O professor Bauchspies tem um histórico de projetos na área e isso me motivou a trabalhar sob a orientação dele.

O Laboratório de Robótica e Automação da Universidade de Brasília possui uma sala de reuniões equipada com um sistema híbrido de climatização o qual possui um ar condicionado e um umidificador acoplado. É necessário realizar o condicionamento das variáveis temperatura e umidade e para isso vale-se da engenharia de controle para projetar e implementar os controladores para este sistema.

1.1 OBJETIVOS DO PROJETO

Projetar e implantar controladores distintos capazes de condicionar a temperatura e a umidade da sala, com a finalidade de compará-los quanto ao consumo de energia elétrica e a sua capacidade de garantir condições de temperatura e umidade dentro das especificações de projeto.

1.2 APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO

Neste documento são descritas e exemplificadas todas as etapas necessárias para a execução e conclusão deste projeto. Primeiramente são apresentados e definidos conhecimentos adicionais para a compreensão dos funcionamentos de sistemas de climatização comumente chamados de sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar, do inglês heating, ventilation and air conditioning (HVAC). Em seguida é exposto a definição e o uso de carta psicrométricas para o projeto de sistemas de condicionamento de ar. Ainda nesta seção é exibido o componente Triac e como ele pode ser utilizado na implementação dos controladores requeridos por este projeto.

No capítulo seguinte é exposta a metodologia experimental na qual se define um roteiro a ser seguido para a execução do projeto. Em seguida há uma seção detalhando os desafios encontrados para a estruturação da bancada experimental. Posteriormente são mostrados em várias seções como os conhecimentos do capítulo anterior estão sendo utilizados na construção dos controladores que serão implementados.

Por fim, os resultados experimentais são apresentados em um capítulo específico. Em seguida todo o trabalho é reanalizado e são apresentadas as conclusões finais do projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foi necessária a aquisição de conhecimentos fundamentais para a realização do projeto de controle de climatização híbrida visando a redução do consumo de energia, que ao longo do curso de graduação em engenharia mecatrônica não houve um estudo aprofundado dos mesmos, visto que são temas pertencentes a outras áreas do conhecimento.

O estudo feito será exposto a seguir com definições mais aprofundadas de cada item ou informação necessária para a obtenção dos objetivos deste projeto de graduação.

2.1 SISTEMAS HVAC

HVAC - abreviação da nomenclatura do inglês "Heating, ventilation and air conditioning" [Aquecimento, ventilação e condicionamento de ar]. Seu objetivo é proporcionar conforto térmico e qualidade de ar dentro de especificações aceitáveis, as quais são estipuladas por normas como (8). O projeto de sistemas HVAC é uma subdisciplina de engenharia mecânica, com base nos princípios da termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor. Refrigeração às vezes é adicionada à abreviatura, formando HVAC & R ou HVACR, ou mesmo a ventilação é removida formando sistemas HACR.

Sistemas HVAC são uma parte importante de estruturas residenciais, como casas unifamiliares, prédios de apartamentos, hotéis, instalações para idosos, edifícios industriais e de escritórios de médio a grande porte, tais como arranha-céus e hospitais. As três funções centrais: aquecimento, ventilação e ar condicionado estão inter-relacionadas, especialmente com a necessidade de proporcionar conforto térmico e qualidade de ar aceitáveis dentro de custos razoáveis de instalação, operação e manutenção. Os sistemas HVAC podem ser usados em ambientes domésticos e comerciais, podendo também fornecer ventilação e manter espaços internos sobre diferentes pressões atmosféricas.

Nos edifícios modernos, o projeto, instalação e controle dessas funções estão integrados em um ou mais sistemas HVAC. Para edificações pequenas, os empreiteiros geralmente estimam a capacidade e tipo de sistema necessário, então desenvolvem o projeto, fazendo o possível para utilizar componentes e sistemas comerciais, evitando o desenvolvimento de um sistema totalmente novo. Para grandes obras é comum projetar e construir um sistema do zero, criando um sistema otimizado e pouco flexível, o que reduz consideravelmente os custos de operação do sistema, no entanto, custos como manutenção e atualização são aumentados. É uma escolha geralmente vantajosa, neste contexto.

2.1.1 Condicionador de Ar

A transferência de calor, de uma fonte fria para uma fonte quente requer o uso de refrigeradores. Estes, assim como motores à combustão, operam em ciclos. O fluido de trabalho utilizado no ciclo de refrigeração é chamado refrigerante. O ciclo de uso comum no meio comercial é o ciclo de refrigeração

vapor-compressão, o qual requer quatro componentes essenciais: o compressor, o condensador, a válvula de expansão e o evaporador.

O fluido refrigerante entra no compressor no estado vapor e é comprimido até a pressão do condensador. Ele sai do compressor a uma temperatura elevada e então resfria-se e condensa-se conforme flui pelas bobinas do condensador, dissipando o calor para o meio externo. Então entra em um tubo capilar onde a sua pressão e temperatura caem drasticamente devido ao estrangulamento. O refrigerante no estado líquido e em baixa temperatura entra no evaporador, então absorve energia do ambiente e evapora. O ciclo se completa quando o gás entra novamente no compressor. A figura 2.1 mostra um condicionador de ar de uso doméstico. O condensador está localizado no exterior da residência e o evaporador está localizado no interior da mesma.

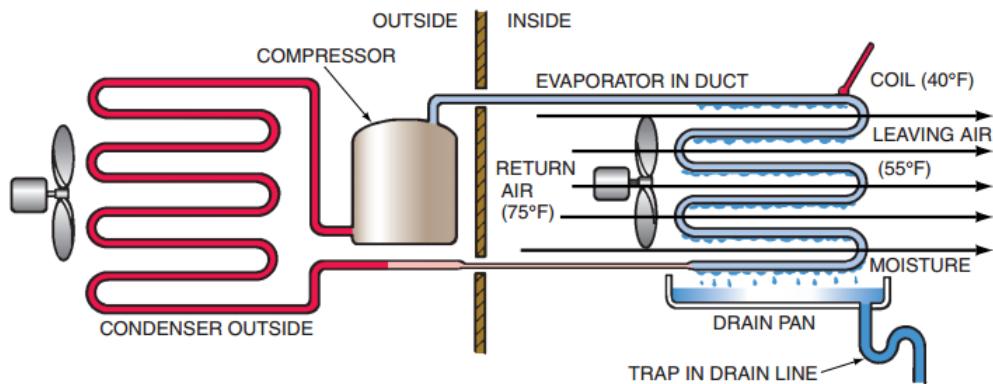


Figura 2.1: Ciclo de refrigeração de um condicionador de ar doméstico, obtida de (1)

2.2 CARTAS PSICROMÉTRICAS

Uma carta psicrométrica é uma representação gráfica dos processos psicrométricos do ar. Processos psicrométricos incluem propriedade físicas e termodinâmicas, tais como a temperatura de bulbo úmido, temperatura de bulbo seco, umidade relativa, conteúdo de umidade de ar seco, fator de calor sensível, entalpia de saturação e por fim volume específico. Uma carta psicrométrica para uma região pode lhe dizer sobre temperatura (bulbo úmido e bulbo seco) e umidade (relativa e absoluta). Dentre as formas em que a carta é utilizada por engenheiros, uma delas é a estipulação de uma região de conforto térmico para um executar um processo ou para uma sala destinada a atividades humanas. Esta região é definida por pontos na carta estabelecendo um polígono, sobre as linhas já traçadas. Pode-se então propor estratégias de condicionamento de ar passivas ou ativas que mantenham o ar do ambiente dentro desta zona. Mesmo que visualmente essas cartas pareçam intimidadoras a princípio, ao aprender como as variáveis interagem, é possível traçar rotas para o condicionamento do ar, de forma a alcançar as regiões de conforto térmico, utilizando os recursos disponíveis de forma inteligente.

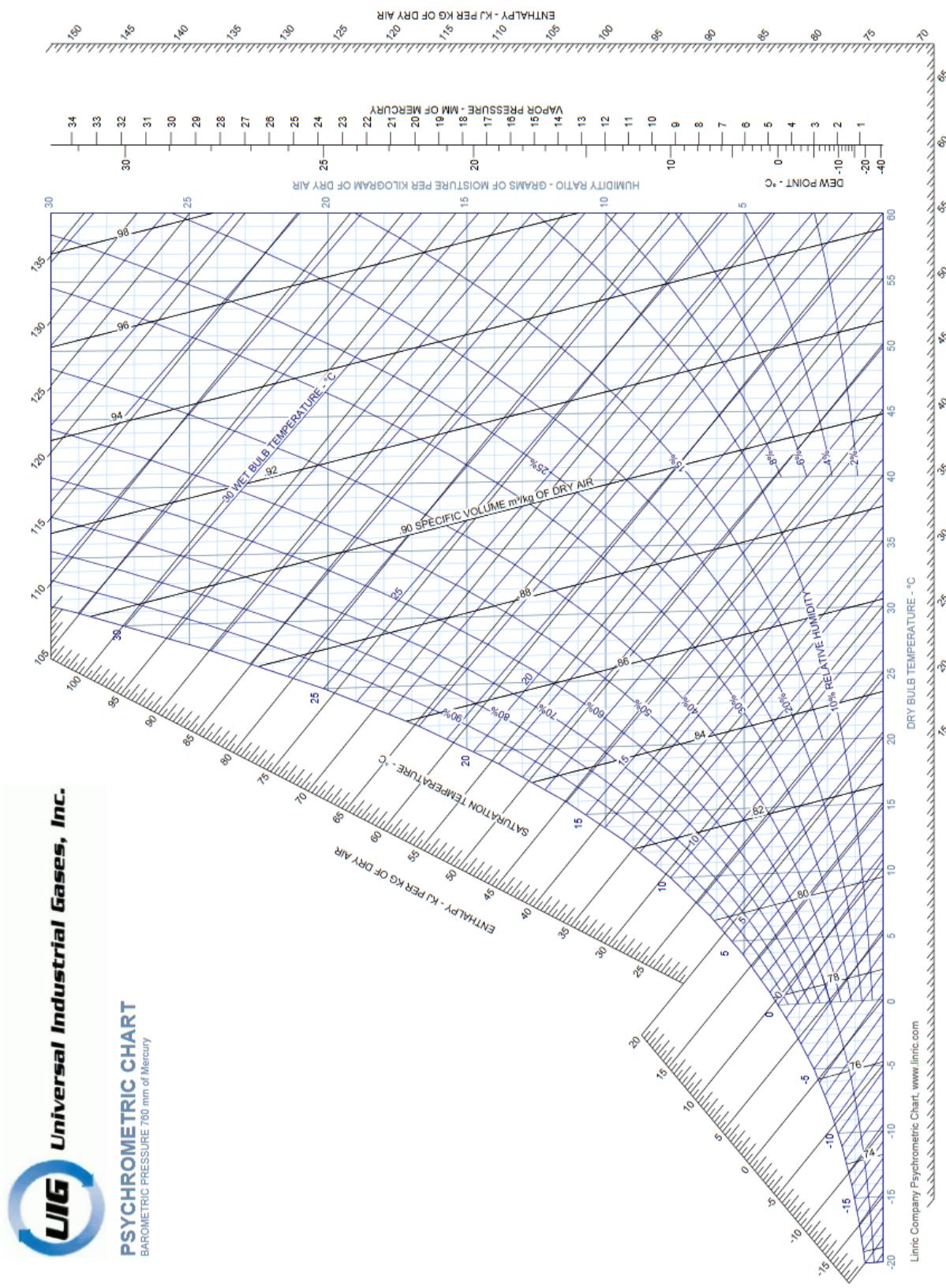


Figura 2.2: Carta psicrométrica, obtida de (2).

As linhas verticais representam temperaturas de bulbo seco, figura 2.3. A temperatura do ar aumenta da

esquerda para a direita, enquanto a temperatura de bulbo úmido é marcada por linhas diagonais, figura 2.4, e como as temperaturas de bulbo seco, aumentam da esquerda para a direita. Outra característica indicada pela carta são as linhas de umidade relativa. figura 2.5. Estas linhas são curvadas, iniciam-se em 100% no topo da carta e decrescem em direção à base. É muito comum que o intervalo entre estas linhas seja de 10% de umidade.

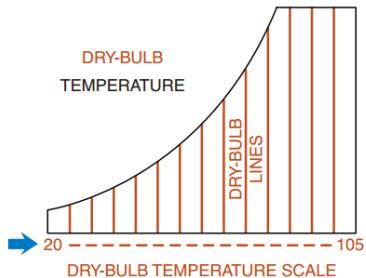


Figura 2.3: Temperatura de bulbo seco, obtida de (1)

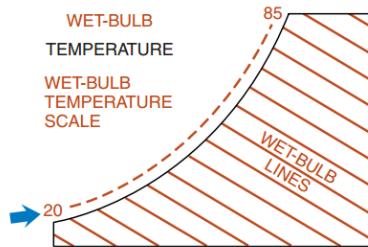


Figura 2.4: Temperatura de bulbo úmido, obtida de (1)

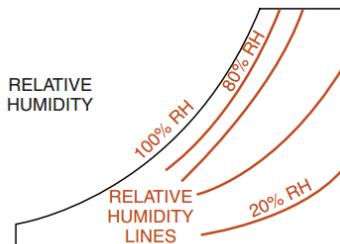


Figura 2.5: Umidade relativa, obtida de (1)

2.2.1 Projeto de climatização com o auxílio de cartas psicrométricas

Uma carta psicrométrica pode ser utilizada para melhor visualizar as zonas de conforto térmico estabelecidas para o projeto. Na figura 2.6 a região de conforto térmico durante o verão é mostrada em laranja e a região de conforto térmico durante o inverno é mostrada em azul. Um sistema de climatização é um processo que fará uma massa de ar percorrer um caminho nesta carta psicrométrica, partindo de uma temperatura e umidade relativa inicial e chegando em uma temperatura e umidade relativa final. Após sair do processo a massa de ar se mistura ao ar ambiente.

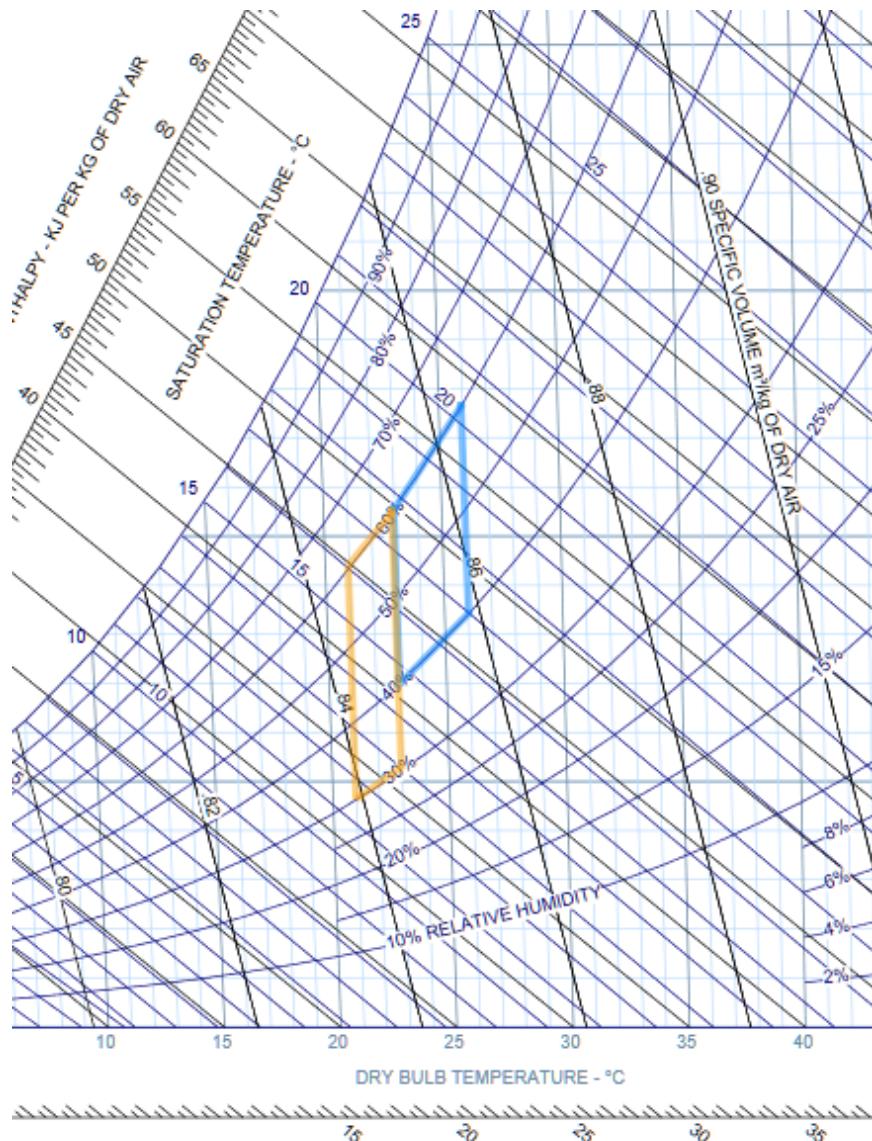


Figura 2.6: Condições de contorno para o verão em laranja e para o inverno em azul.

A proposta de climatização comum no mercado é utilizar somente um condicionador de ar. Vamos observar o caminho da massa de ar nesta solução, figura 2.7. Partindo de uma temperatura de 35 graus Celsius e uma umidade relativa de 20 por cento. Assumindo que a diferença entre a temperatura do ar no coletor do sistema e a temperatura do mesmo ar na saída deste seja de 10 graus - um valor comercial válido segundo (1) - o caminho percorrido pela massa de ar é a linha reta mostrada em laranja na figura 2.7. Ao final deste caminho a massa de ar estará à temperatura de 25 graus e umidade relativa de 35 por cento, conforme mostra a carta.

Supondo agora que seja adicionado um umidificador industrial em série com o condicionador de ar do exemplo anterior. Assume-se que este umidificador tenha comportamento linear e que aumente a umidade relativa da massa de ar em 30 por cento - meramente ilustrativo visto que o sistema é não linear. A massa de ar seguirá primeiro o caminho em laranja durante a refrigeração, em seguida seguirá o caminho em verde - na figura 2.7 - durante a umidificação. A nova temperatura desta massa será de 19.5 graus e sua umidade

relativa será de 65 por cento. É notável a redução adicional de temperatura de 5.5 graus, ainda mais porque um umidificador consome menos energia que um ar condicionado típico.

Por fim, suponha que a ordem do sistema seja alterada. Desta vez o ar é umidificado e em seguida resfriado. O caminho em azul na figura 2.7 mostra que o estado final da massa de ar é uma temperatura de 16 graus e umidade relativa de 95 por cento. A alteração permitiu reduzir a temperatura final em mais 3.5 graus. No entanto a umidade relativa atingiu 95 por cento e por isso saiu das especificações de projeto. Porém, sabendo-se que o ar será difundido e misturado ao ar da sala, pode ser que a umidade final da sala esteja dentro das especificações.

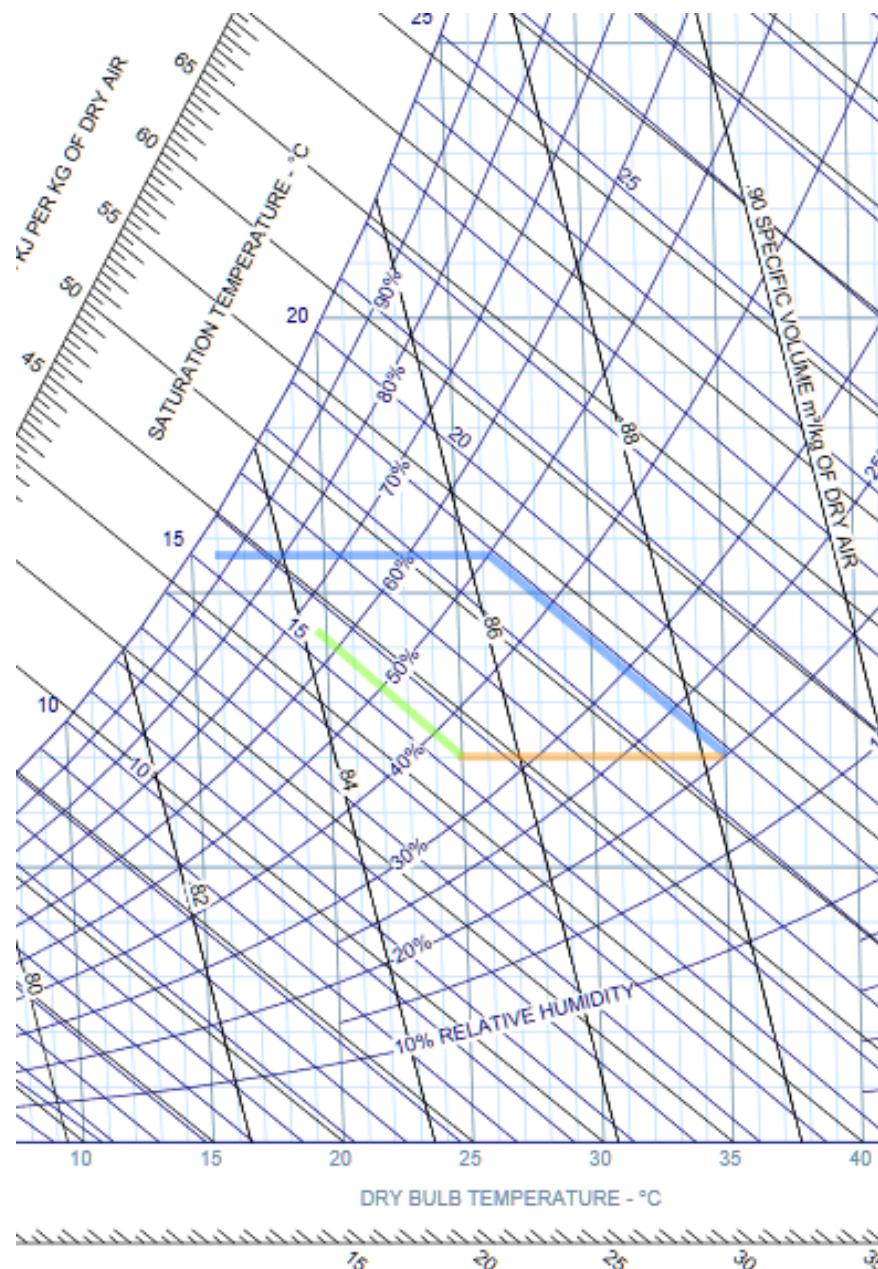


Figura 2.7: Caminho percorrido pelas propriedades do ar: Sistema híbrido em azul, Ar condicionado em laranja, Umidificador Evaporativo em verde.

Os exemplos mostram a eficácia do uso de umidificadores para reduzir a temperatura ambiente em climas secos. O autor de (4), construiu um sistema híbrido no qual o ar externo é umidificado e em seguida resfriado. Em seu sistema, no entanto, o ar interno que recircular pelo sistema é somente resfriado. Em seu trabalho, (4) mostrou que o seu sistema foi capaz de manter a temperatura e a umidade da sala de reuniões dentro das especificações de conforto térmico com o menor custo energético. Neste trabalho mantém-se a configuração de (4), apesar de que modificar a posição dos atuadores seria mais vantajoso. No entanto, para executar essas mudanças, haveria um custo financeiro que não está previsto no orçamento atual do projeto.

2.3 MODELAGEM DO TRANSPORTE DE CALOR

Seguindo os procedimentos descritos em (3).

2.3.1 Resfriamento do ar interno à sala de reuniões.

A sala de reuniões possui 43.89 m^3 de ar atmosférico. A vedação da mesma é fraca, portanto ciclos de aquecimento ou resfriamento acontecem à pressão constante. Em Brasília, a pressão atmosférica comum é, de acordo com o INPE, de 102 kPa . Durante um ciclo de aquecimento à pressão constante a principal grandeza de interesse é a entalpia do sistema. A variação da entalpia de um volume de ar é dada pela equação 2.1, onde m é a massa de ar, c_p é o calor específico à pressão constante e T é a temperatura do sistema em graus Kelvin. Para se obter uma função que descreva a temperatura do sistema após absorver ou perder calor Δq , parte-se da igualdade $\Delta q = \Delta H$, então resolve-se a equação da entalpia, para que esta se torne uma equação da temperatura do sistema em função do calor recebido ou perdido. Após resolver esta equação obtém-se que:

$$\Delta H = mc_p\Delta T \quad (2.1)$$

$$T = \frac{\Delta q}{(mc_p)} + T_0 \quad (2.2)$$

Para utilizar esta equação na malha de controle onde o calor será provido à uma taxa $w = dq/dt$, primeiro deriva-se a equação anterior em relação ao tempo, obtendo-se a equação 2.3 e em seguida aplica-se a transformada de Laplace à mesma. A partir deste procedimento é obtida a função de transferência, equação 2.4, que relaciona a potência absorvida ou retirada do sistema com a temperatura do mesmo. A massa da sala pode ser obtida pela equação geral dos gases, equação 2.5, rearranjando-a para equação 2.6, sabe-se que $P = 102 \text{ kPa}$, $V = 43.89 \text{ m}^3$, $R = 0.2870 \text{ kJ/kgK}$ e $T = 296 \text{ K}$ o que equivale a 25°C . O calor específico à pressão constante tem valor 1.005 kJ/kgK . A partir destes valores encontra-se o valor para a massa do sistema de 52.34 kg . Finalizando, a função de transferência é dada pela equação 2.7.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{(mc_p)} \frac{dq}{dt} \quad (2.3)$$

$$G(s) = \frac{T(s)}{W(s)} = \frac{1}{(mc_ps)} \quad (2.4)$$

$$PV = mRT \quad (2.5)$$

$$m = \frac{PV}{RT} \quad (2.6)$$

$$G(s) = \frac{19.01 \times 10^{-6}}{s} \quad (2.7)$$

Para a correta caracterização do sistema deve ser avaliado também o fluxo de calor através das paredes, teto, piso e janelas, assim como estimar a presença de fontes de calor internas à sala.

Para a determinação do modelo que descreve a relação entre a adição ou remoção de água ao ar e a resultante alteração na temperatura, foram pesquisadas as seguintes fontes: (9), (1), (3), (4), (10), (11) e (12). No entanto a relação entre essas variáveis é descrita somente pela carta psicrométrica, visto que não foram encontrados modelos matemáticos referentes a elas em minhas pesquisas.

2.3.2 Transferência de calor através das paredes, teto e piso.

O fluxo de calor através de uma superfície que separa dois meios preenchidos com ar pode ser descrito de forma simplificada e a figura 2.8 exemplifica esse processo. As duas superfícies da parede são mantidas à uma temperatura definida e a taxa de calor que atravessa esta parede deve ser determinada. É assumido que a transferência de calor através da parede é estacionária, visto que as temperaturas das superfícies são mantidas constantes. A transferência de calor é unidimensional e pressupõe-se que quaisquer gradientes de temperatura significativos existem somente na direção ambiente interno ao ambiente externo. A condutividade térmica da parede é constante.

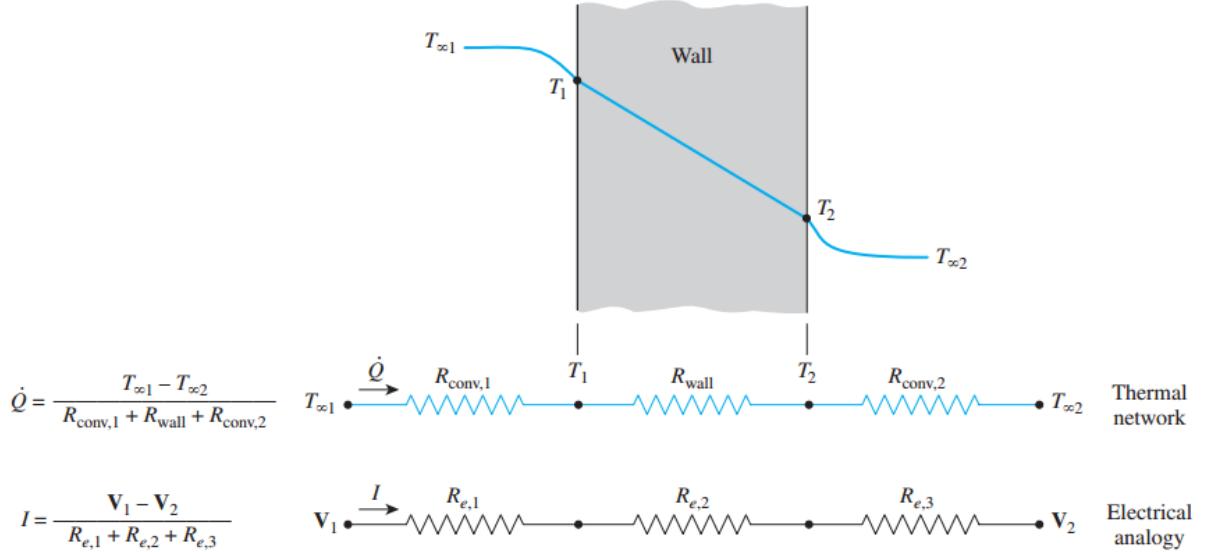


Figura 2.8: Fluxo de calor entre duas superfícies imersas em ar à temperaturas distintas; Modelagem utilizando resistências térmicas. Retirado de (3).

De acordo com (3), o sistema pode ser modelado como um circuito térmico onde o fluxo de calor é representado por uma corrente elétrica, a temperatura representa o potencial elétrico e as resistências térmicas surgem da equação 2.8, onde ΔT é a diferença de temperatura entre as superfícies, medida em graus Kelvin, \dot{Q} é o fluxo de calor resultante medido em watts e R é a resistência térmica medida em K/W .

$$\Delta T = \dot{Q}R \quad (2.8)$$

Ainda segundo (3), a resistência térmica devido à convecção é dada por 2.9, onde h é o coeficiente de convecção do meio acrescido do efeito de radiação, medido em W/m^2K , o qual leva em conta a transferência de calor via radiação e a velocidade do ar durante o processo de convecção; A é a área em m^2 da superfície.

$$R_{conv} = \frac{1}{(hA)} \quad (2.9)$$

A resistência térmica devido à condução através dos sólidos é dada por 2.10, onde L é a espessura do sólido, K é o coeficiente de condução do material e A é a sua área superficial.

$$R_{cond} = \frac{L}{(KA)} \quad (2.10)$$

A condutividade térmica para o concreto é de $0.9 W/mK$, já para o vidro é de $0.78 W/mK$. O coeficiente de convecção para o ar interno é de $10 W/m^2K$ e o coeficiente de convecção para o ar externo leva em conta efeitos de radiação, sendo o seu valor de $40 W/m^2K$. Tal aproximação é válida nesta ocasião segundo (3). De acordo com (4), as janelas externas têm área igual a $5.04 m^2$, compostas por uma armação de metal e uma única camada de vidro cuja espessura é $8 mm$; A parede que contém a janela,

também contém uma região de alvenaria cuja área é de 3.48 m^2 e a espessura é de 30 cm . O telhado é constituído por uma laje de concreto de espessura 30 cm e área de 15.30 m^2 . Usando os valores descritos anteriormente, são obtidos os valores para as resistências térmicas, exemplificados na tabela 2.1. Estas resistências estão dispostas em um circuito, conforme a figura 2.9.

Resistência	K/W
R_{Janela}	2.035×10^{-3}
R_{Parede}	95.79×10^{-3}
$R_{Telhado}$	21.79×10^{-3}
R_{conv_1}	4.198×10^{-3}
R_{conv_2}	1.050×10^{-3}

Tabela 2.1: Resistências térmicas.



Figura 2.9: Modelo resistivo do sistema.

As resistências R_{Janela} , R_{Parede} , $R_{Telhado}$ estão em paralelo e podem ser substituídas pela resistência equivalente $R_{eq1} = 1.823 \times 10^{-3} \text{ K/W}$, utilizando a seguinte equação 2.11, obtida em (13), a qual é resolvida para R_{eq1} , 2.12.

$$\frac{1}{R_{eq1}} = \frac{1}{R_{Janela}} + \frac{1}{R_{Parede}} + \frac{1}{R_{Telhado}} \quad (2.11)$$

$$R_{eq1} = \left(\frac{1}{R_{Janela}} + \frac{1}{R_{Parede}} + \frac{1}{R_{Telhado}} \right)^{-1} \quad (2.12)$$

O novo circuito passa a ter 3 resistências em série. A resistência equivalente $R_{eq2} = 7.073 \times 10^{-3} \text{ K/W}$ é obtida a partir da equação 2.13, encontrada em (13):

$$R_{eq2} = R_{conv_1} + R_{eq1} + R_{conv_2} \quad (2.13)$$

Pode-se observar que o transporte de calor através das paredes age como uma malha de controle re-alimentada. Cada ambiente adjacente pode ser adicionado ao modelo seguindo o raciocínio mostrado na figura 2.10. A influência da umidade não será adicionada pois o autor não encontrou material suficiente para construir um modelo e para validar o modelo proposto por (12).

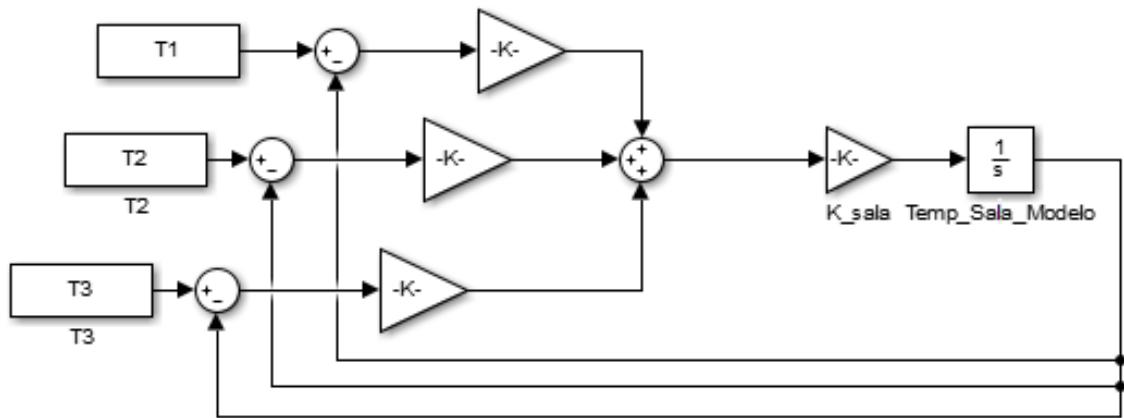


Figura 2.10: Diagrama Simulink para a transferência de calor através das paredes para uma sala cercada por três salas a três temperaturas distintas.

3 DESENVOLVIMENTO

Durante o período de janeiro de 2017 a junho de 2018 o sistema de ar condicionado já existente na sala de reuniões do Laboratório de Robótica e Automação (LARA), da Universidade de Brasília, foi estudado e reestruturado para acomodar os novos requisitos estabelecidos para a implementação deste projeto de controle de climatização híbrida visando a redução do consumo de energia. Os trabalhos de (4), (10), (11) e (12) foram estudados como base para a compreensão do sistema já existente, visto que esses estudantes de graduação e mestrado foram os responsáveis pelas mudanças que o sistema de ar condicionado sofreu durante os últimos anos. Este sistema está representado com detalhes nas figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5. Pode-se observar que esta planta é composta por um ar condicionado industrial, ao qual foi acoplado um sistema de umidificação, composto por uma bomba d'água, reservatório e manta de celulose. Há também um *damper* cuja função é forçar a passagem de ar por esta manta quando estiver fechado, fazendo-se assim o processo de umidificação do ar no sistema.

3.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O objetivo central e primordial deste trabalho é a redução do consumo de energia elétrica para a climatização de um ambiente, aperfeiçoando-se o sistema de climatização já existente na sala de reuniões do LARA por meio de controladores. Para isso, proponho que o sistema seja controlado utilizando técnicas vindas da teoria de controle, cujos principais autores são: (14), (15) e (16). Este trabalho seguiu o cronograma apresentado na tabela 3.1.

Julho, 2017	Iniciação
Agosto, 2017	Planejamento
Setembro, 2017 a Maio, 2018	Execução e controle
Junho, 2018	Fechamento

Tabela 3.1: Cronograma de atividades.

O sistema sob estudo é do tipo MIMO, ou seja, múltiplas entradas e múltiplas saídas. As saídas de interesse são a temperatura e umidade da sala. As entradas que influenciam a saída são a temperatura e umidade dos ambientes ao redor, e são eles o ambiente externo e as salas adjacentes. É feita a modelagem termodinâmica do sistema, baseando-se nos conhecimentos de (9) e (1). Essa modelagem permitirá a simulação do sistema com a ferramenta Simulink, ambiente Matlab. O cruzamento de informações experimentais com a modelagem da planta possibilitará validar o modelo e realizar a sua calibragem. Essa etapa de calibragem é fundamental, pois o modelo teórico contém valores não passíveis de serem medidos com elevada precisão e, portanto, possuem consequentemente elevadas incertezas.

Primeiro são realizados ensaios para caracterizar a resposta da planta. Os ensaios consistem em aplicar um sinal de onda quadrada de amplitude 1 e período 40 minutos e cada ensaio tem a duração de 2 horas, sendo um total de três ensaios executados. No primeiro ensaio o sinal ativa o relé que por sua vez ativa a

condensadora e o ventilador. No segundo ensaio o sinal ativa o relé que por sua vez ativa o umidificador evaporativo, ventilador e fecha o *damper* para forçar a passagem de ar pela manta. Como sensor de temperatura foi escolhido o DHT22. São utilizados dois sensores ao todo. Um é posicionado na entrada de ar do sistema o outro é posicionado do lado externo ao prédio. O medidor de energia utilizado é o Landis+Gyr.

O projeto do controlador segue com o apoio do Simulink. Nele são testados controladores que utilizam relés com histerese e um compensador digital. Esses controladores, após as simulações, são implementados na plataforma Arduino e então o sistema é submetido a ensaios de 1 hora de duração nos quais as temperaturas interna e externa, as umidades interna e externa, o sinal de controle nos atuadores são coletados. Os ensaios são: controle de temperatura utilizando relés com histerese; controle de temperatura e umidade utilizando relés com histerese; controle de temperatura e umidade utilizando um compensador proporcional digital. São utilizados os valores de temperatura e umidade estabelecidos pela norma (8) como parâmetros de conforto ideais. A tabela 3.2 expõe esses valores. Ao final os dados coletados são utilizados para a análise estatística e interpretação.

Estação do ano	Temperatura	Umidade
Verão	$22 \pm 1^\circ\text{C}$	$45 \pm 15\%$
Inverno	$24.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$	$50 \pm 10\%$

Tabela 3.2: Conforto térmico, segundo (8).

3.2 RECONSTRUÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

Ao início dos trabalhos o sistema encontrava-se inoperante e os motivos ainda eram desconhecidos. O processo de depuração para detectar em quais pontos o sistema se encontrava comprometido teve início em abril de 2017. A primeira etapa foi entender o funcionamento do painel e suas configurações, figura 3.1, sendo utilizados os diagramas deixados por (4), (12), (11) e (10). Os sistemas presentes é o descrito por (4), visto que os sistemas utilizados por (12), (11) e (10) não estavam presentes ao iniciar o projeto.



Figura 3.1: Painel elétrico da bancada experimental.

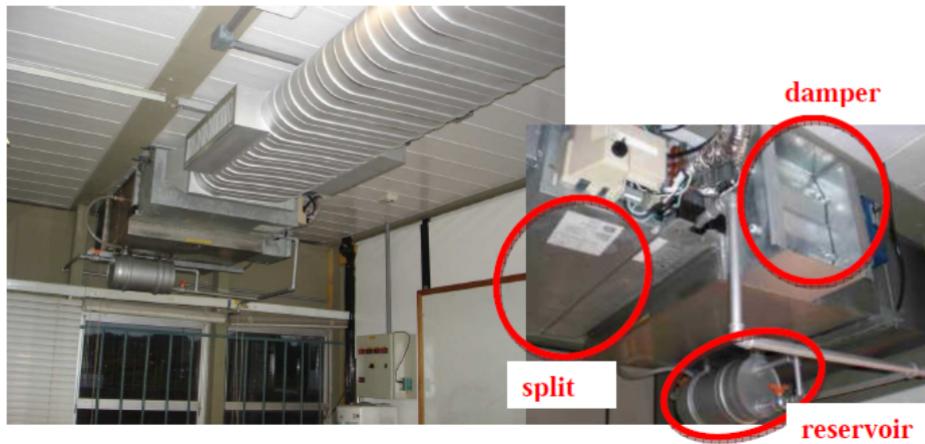


Figura 3.2: Atuadores, obtida de (4).

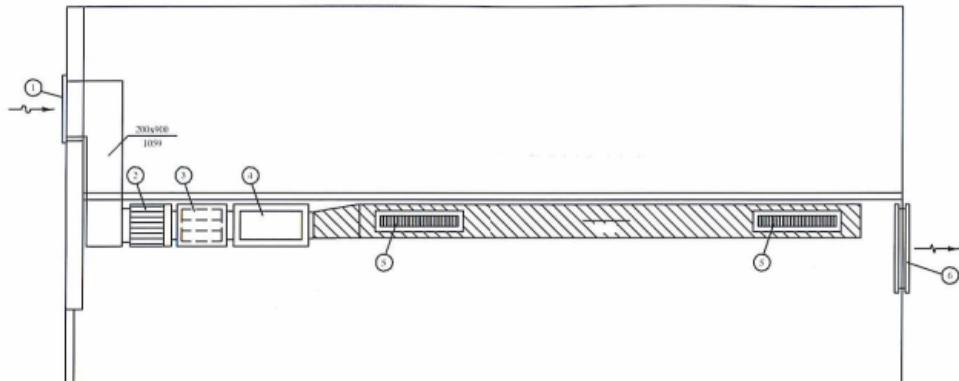


Figura 3.3: Vista lateral dos atuadores, obtida de (4).

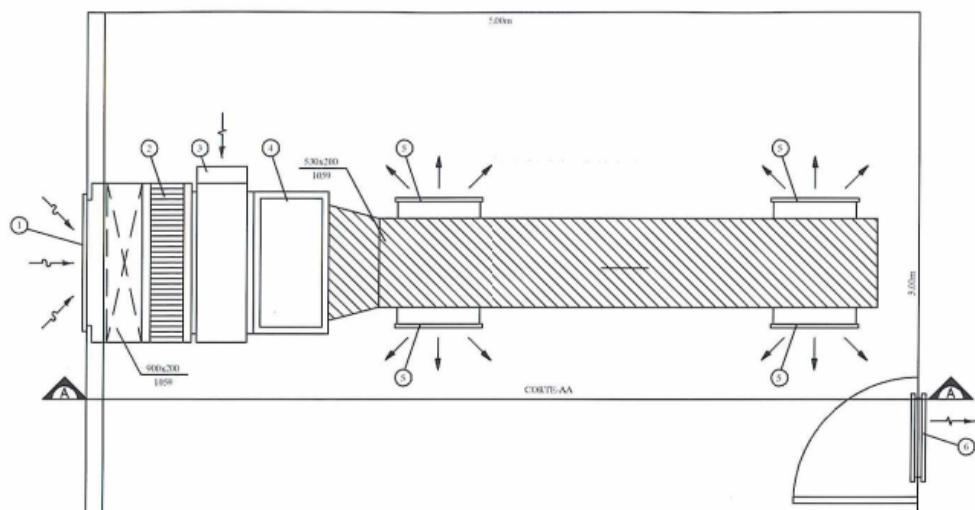


Figura 3.4: Vista superior dos atuadores, obtida de (4).

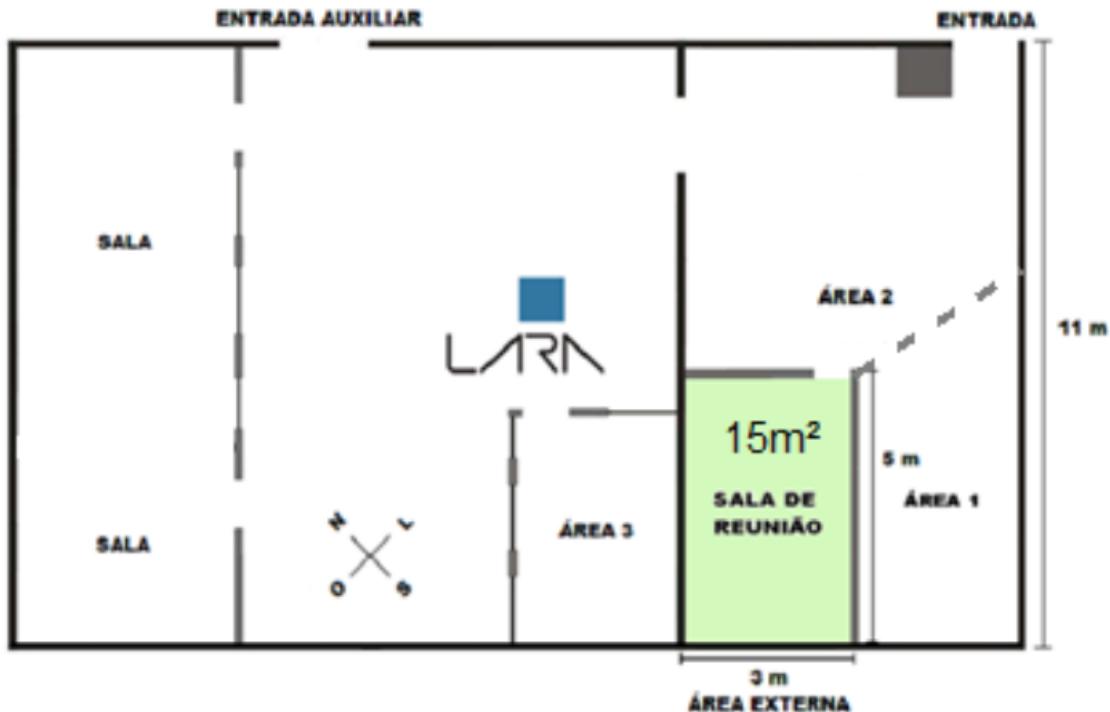


Figura 3.5: Vista superior da sala de reuniões, obtida de (4).

Constatou-se que ao ligar o disjuntor principal do sistema e em seguida a chave seletora, nenhum dos atuadores apresentou qualquer resposta. Os controladores Full Gauge também permaneceram desligados. Ao abrir o painel, constatou-se que boa parte dos fios não estavam rotulados de acordo com o projeto inicial. Após algum estudo foi descoberto que o sistema possui três níveis de tensão distintos: 220 V_{RMS} , 24 V_{RMS} e 24 V . Existem 16 fios entrando no painel. Os fios que carregam os sinais de fase, 220 V_{RMS} , e neutro estavam facilmente identificáveis. Os fios referentes aos sensores de temperatura também foram facilmente identificados. Os nove fios restantes correspondem à bomba d'água, condicionador de ar e *damper*. De acordo com os diagramas de interligação elétrica retirados de (17), figuras 3.6, 3.7 e 3.8, o condicionador de ar contém três fios, dois quais dois representam fase e neutro 220 V_{RMS} , enquanto o terceiro ativa ou desativa a condensadora utilizando um sinal de 220 V_{RMS} . De acordo com (18), o *damper* possui três fios também: fase 24 V_{RMS} , neutro e referência 24 V , já a bomba d'água possui duas linhas: fase 220 V_{RMS} e neutro.

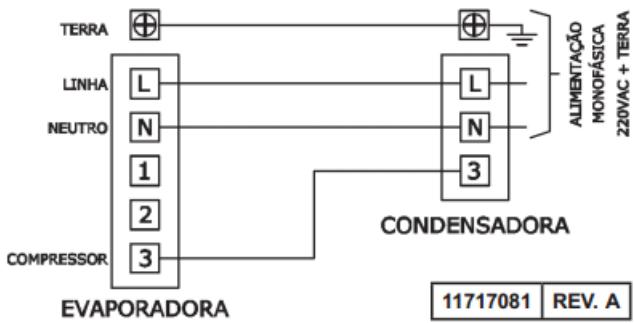


Figura 3.6: Interligação elétrica entre evaporadora e condensadora, obtido de (5).

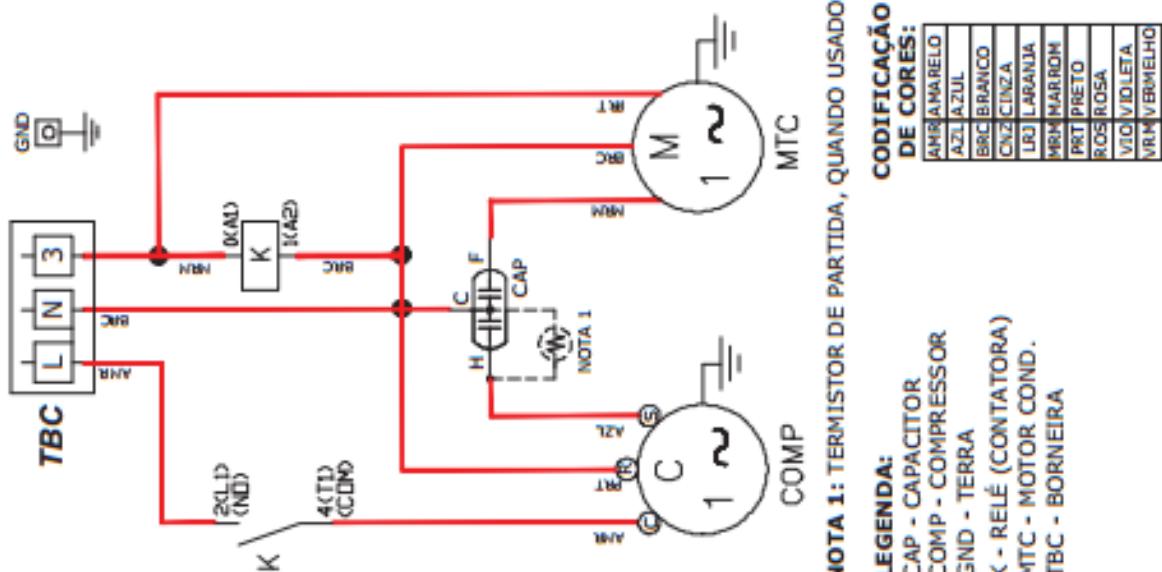


Figura 3.7: Diagrama elétrico condensadora, obtido de (5).

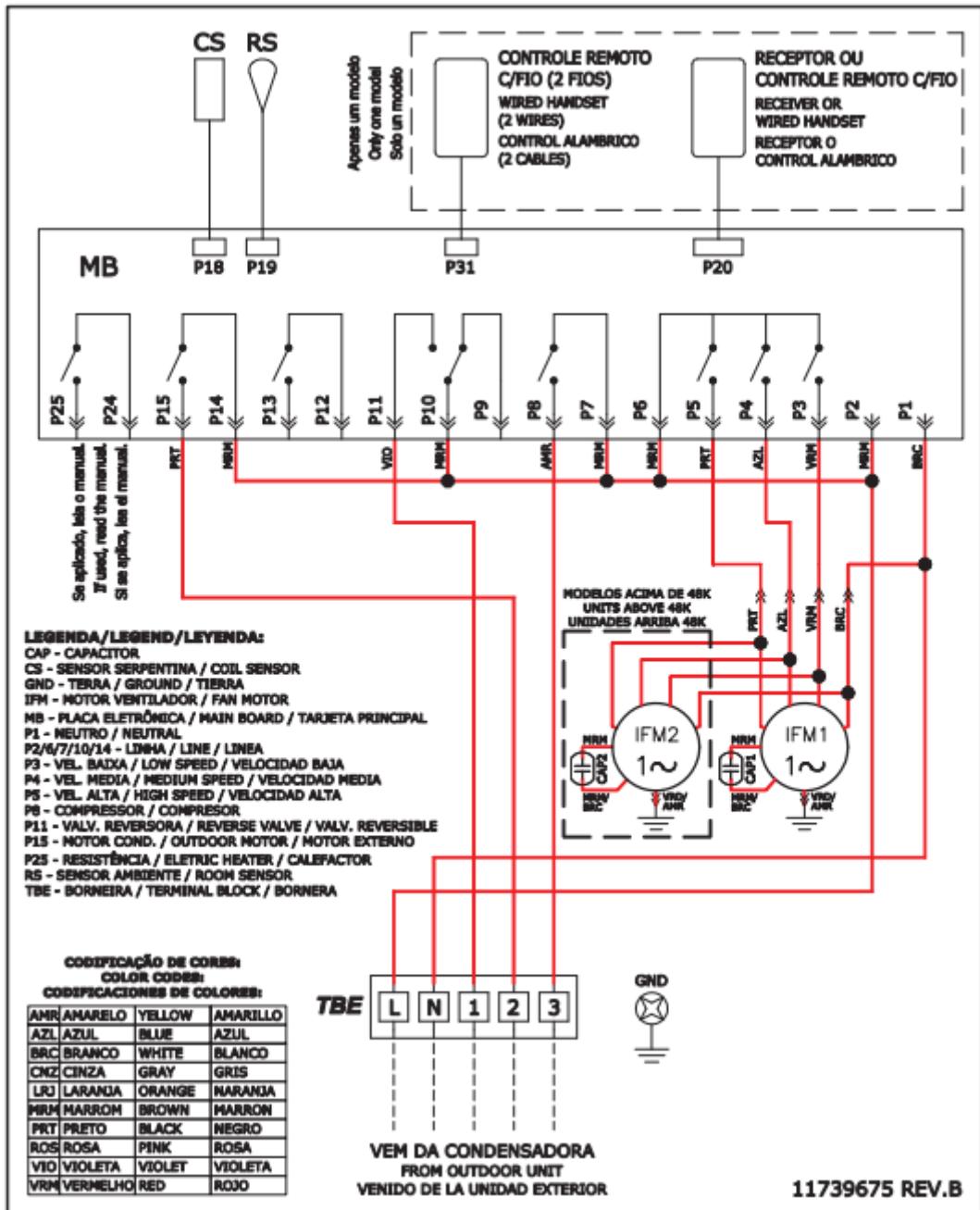


Figura 3.8: Diagrama elétrico evaporadora, obtido de (5).

Após identificar e rotular as linhas, processo que levou semanas devido ao risco de queimar algum subsistema, foi feito um novo teste e o resultado foi: *damper* e bomba funcionando corretamente; condicionador de ar com o compressor inoperante. Segundo a seção 12: análise de ocorrências do manual de instalação fornecido por (17), constata-se que as ligações elétricas estão incorretas ou rompidas. Parte-se para o reparo da instalação elétrica. O forro da sala de reuniões é removido para expor as linhas. Constatase que fase e neutro não chegam à placa de circuito presente na evaporadora. As linhas tomam rumos incoerentes; o neutro sai da evaporadora e termina em nada, figura 3.9; linhas do *damper* acompanham as linhas do condicionador de ar que vão em direção à condensadora, do lado externo ao edifício; linhas do

damper vem de fora do edifício junto à linhas dos condicionador de ar.



Figura 3.9: Linhas da evaporadora.



Figura 3.10: Placa de circuitos da evaporadora.

Primeiramente a instalação elétrica do condicionador de ar é feita seguindo as especificações de (17). A instalação do *damper* é feita seguindo as especificações de (18). Todos os fios entrando e saindo destas unidades são numerados utilizando-se anilhas como os valores 0 e 1, seguindo a codificação de números inteiros sem sinal em base 2. Fios saindo de um atuador são agrupados com o auxílio de lacres ou fita isolante. É feito um novo teste. O resultado é: o condicionador de ar permanece inoperante. As linhas são checadas novamente e constata-se que os sinais de tensão estão chegando corretamente aos atuadores: bomba, evaporadora e *damper*.

Ao inspecionar a placa de circuitos da evaporadora, figura 3.10, nota-se que ela difere significativamente do especificado por (17). A linha de fase não alcança os terminais P2, P6, P7, P10, P14 e L; a linha de neutro não alcança o terminal P1; os terminais 1 e P11, 2 e P15, assim como 3 e P8 estão desconectados; as linhas do ventilador - azul, vermelho e preto - estão desconectadas dos terminais P3, P4 e P5, respectivamente. Os *jumpers* OP2, OP3, OP6 devem estar em aberto enquanto o jumper OP7 deve estar fechado. Isto assegura a configuração: somente frio, retorno após falha de energia, desgelo automático e controle remoto com fio.

Procede-se com a reconfiguração da placa seguindo as especificações de seu fabricante. A placa reconfigurada, figura 3.11, é instalada novamente na evaporadora. O sistema é testado e o resultado é: o ventilador funciona e sua velocidade é controlada pela placa. O sistema pode ser ligado e desligado pelo controle com fio, figura 3.12; em caso de falha de energia o sistema é religado.



Figura 3.11: Placa de circuitos da evaporadora re-configurada.



Figura 3.12: Controle remoto com fio.

Por fim, restava apenas realizar a inspeção da unidade condensadora localizada sobre o telhado do SG11, figura 3.13. Subindo no telhado e verificando o estado da máquina constata-se que a ligação elétrica está em desacordo com o proposto por (17). É feita a reconfiguração da condensadora. O sistema é testado e o resultado é: todos os atuadores estão operantes. O ar condicionado comporta-se como esperado e pode ser utilizado pela comunidade do Lara.



Figura 3.13: Condensadora.



Figura 3.14: Terminais da condensadora.

Com a bancada experimental funcionando corretamente, procede-se ao foco deste trabalho que é o projeto e implementação de um controlador visando o conforto térmico e a redução no consumo de energia na sala de reuniões do LARA. Deixo aqui a recomendação para trabalhos vindouros que utilizarão este mesmo sistema como objeto de estudo, de não subir no telhado do SG-11. O edifício não possui laje e por isso é muito suscetível a graves acidentes gerados por desequilíbrio ou quedas. O acesso pela escada exterior também é muito perigoso, já que não oferece nenhum apoio ou proteção a quem usa.

3.3 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA PLANTA

A caracterização da planta é feita ligando o ar condicionado no máximo por vinte minutos, em seguida mantém-se o aparelho de ar condicionado desligado por mais vinte minutos. Durante os ensaios a temperatura interna, temperatura externa, umidade interna, umidade externa e sinal de controle dos atuadores são medidas a cada 1 segundo. O processo é repetido três vezes. O ensaio tem duração de duas horas. O processo é repetido, desta vez utilizando o umidificador evaporativo. Por fim o processo é realizado mais uma vez, porém nesta os dois atuadores são ligados ao mesmo tempo. Este procedimento visa observar a resposta da planta a uma entrada degrau unitário para cada atuador.

3.4 PROJETO DOS CONTROLADORES

3.4.1 Controle Liga-Desliga

Para a implementação de controladores do tipo Liga-Desliga, forma utilizados relés com histerese. Este dispositivo fecha quando a entrada é maior que o valor de histerese e abre quando a entrada é menor

que o valor negativo de histerese. Aqui, ele foi posicionado de forma que o aparelho de ar condicionado ligue caso a temperatura esteja acima da referência acrescida da histerese. O aparelho é desligado quando a temperatura da sala for menor que a temperatura de referência menos o valor de histerese. A escolha do valor de histerese tem impacto sobre o consumo e sobre a vida útil do aparelho. Intervalos menores requerem um chaveamento frequente do aparelho, isso pode reduzir a vida útil do mesmo. Para este trabalho adota-se o valor de histerese igual a um grau Celsius seguindo o valor de tolerância para a temperatura nas especificações, tabela 3.2. A referência é ajustada para vinte e dois graus Celsius seguindo a mesma tabela para a condição de verão. Os demais valores da simulação foram definidos nas seções anteriores deste trabalho. A figura 3.15 apresenta o diagrama utilizado.

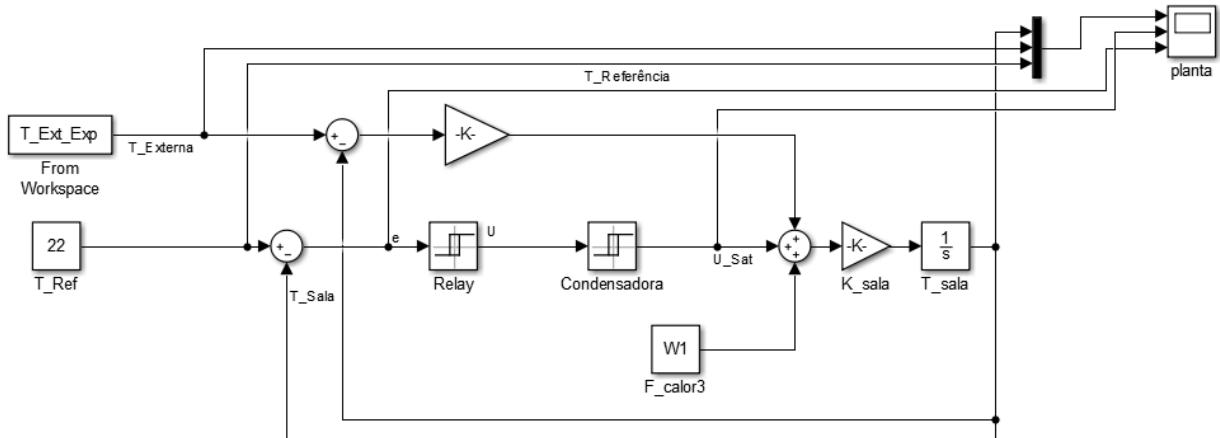


Figura 3.15: Diagrama de blocos da planta controlada por um controlador do tipo relé com histerese.

3.4.2 Compensador Proporcional Digital

Seguindo os procedimentos descritos em (14) e (16), é feita a análise de estabilidade da planta em malha aberta, cuja função de transferência é dada pela equação 2.7, sem a presença de perturbações. Partindo-se da mesma equação, é adicionado o controlador em série com um segurador de ordem zero. Tal controlador é definido pela equação 3.1. Aplica-se então a transformada-Z utilizando o tempo de amostragem de 100 segundos, o qual foi escolhido arbitrariamente pelo autor, e obtém-se a equação 3.2; então é feita a realimentação da planta, resultando na equação 3.3. Aplica-se o critério de estabilidade de Jury, que é definido no sistema de inequações 3.5, sabendo-se que o polinômio característico é dado pela equação 3.4. Resolvendo-se o sistema, obtém-se a solução dada pela inequação 3.6. Substituindo as variáveis por seus valores numéricos obtém-se a equação 3.7. Para a simulação escolhe-se arbitrariamente o valor de ganho 751, o qual está contido no intervalo 3.6, a referência é definida para 22 graus Celsius. O diagrama de blocos pode ser visto na figura 3.16.

$$G_C = K_C \quad (3.1)$$

$$G_C G_P(z) = \frac{K_C K_P T Z^{-1}}{(1 - z^{-1})} \quad (3.2)$$

$$F(z) = \frac{G_C G_P(z)}{1 + G_C G_P(z)} \quad (3.3)$$

$$P(z) = z + (K_c K_P T - 1) \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} P(1) > 0 \\ P(-1)(-1) > 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$0 < K_C < \frac{2}{K_P T} \quad (3.6)$$

$$0 < K_C < 1052 \quad (3.7)$$

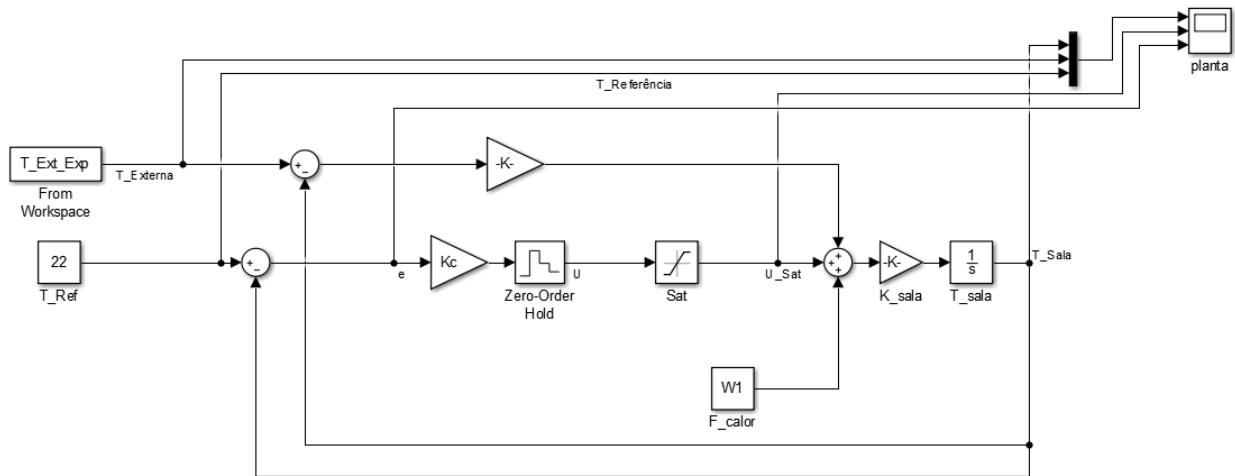


Figura 3.16: Diagrama de blocos da planta controlada por um controlador digital proporcional.

3.5 IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR

Primeiro tentou-se implementar o controle utilizando conversores AC-AC por viabilizarem um menor tempo de amostragem para o controlador. No entanto após trabalhar por semanas em sua implementação ainda restaram alguns comportamentos indesejados. Ao fim do prazo para a conclusão dos trabalhos fui forçado a utilizar relés e contactoras. Deixo aqui um pouco do que desenvolvi para fins de registro.

3.5.1 Implementação utilizando Relés

É implementado o circuito de controle utilizando um *Shield* com quatro relés. Neste arranjo são utilizados dois relés. Cada relé é responsável por ativar uma contactora no painel. Cada contactora ativará

um conjunto de atuadores: a contactora 1 quando ligada, ativa o compressor e ventilador, já a contactora 2 quando ativada, aciona o umidificador evaporativo, ventilador e fecha o damper para forçar a passagem de ar pela manta. É escolhido o microcontrolador Arduino Mega para enviar os sinais de comando para o *Shield* de relés.

São implementados dois módulos PWM para elevados períodos e os sinais de comando destes são entregues pelas portas digitais do microcontrolador. São codificados dois compensadores proporcionais digitais, o primeiro é responsável pela contactora 1 e o segundo pela contactora 2. O sinal de controle do compensador 1 é usado como entrada para o módulo PWM 1 enquanto o sinal de controle do compensador 2 é aplicado sobre a entrada do módulo PWM 2. A referência de cada compensador é definida estaticamente no código. O sinal de realimentação do compensador 1 vem da variável temperatura obtida do DHT interno à sala de reuniões enquanto o sinal de realimentação do compensador 2 vem da variável umidade obtida também do DHT interno à sala de reuniões. O PWM implementado tem ciclo de 100 segundos.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO DA PLANTA

Após observar a resposta do sistema, como mostram as figuras 4.1, 4.2 e 4.3, e ter coletado dados para validar modelos teóricos, parte-se para o ajuste das constantes do modelo. Observa-se ruído entre os instantes 0.33 horas e 0.67 horas. O motivo mais provável para este sintoma é ruído injetado na rede elétrica, proveniente de motores elétricos. O ruído é observado nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3. A figura 4.3 mostra que o efeito de redução de umidade por parte do ar condicionado é mais influente do que o aumento da umidade causado pelo umidificador.

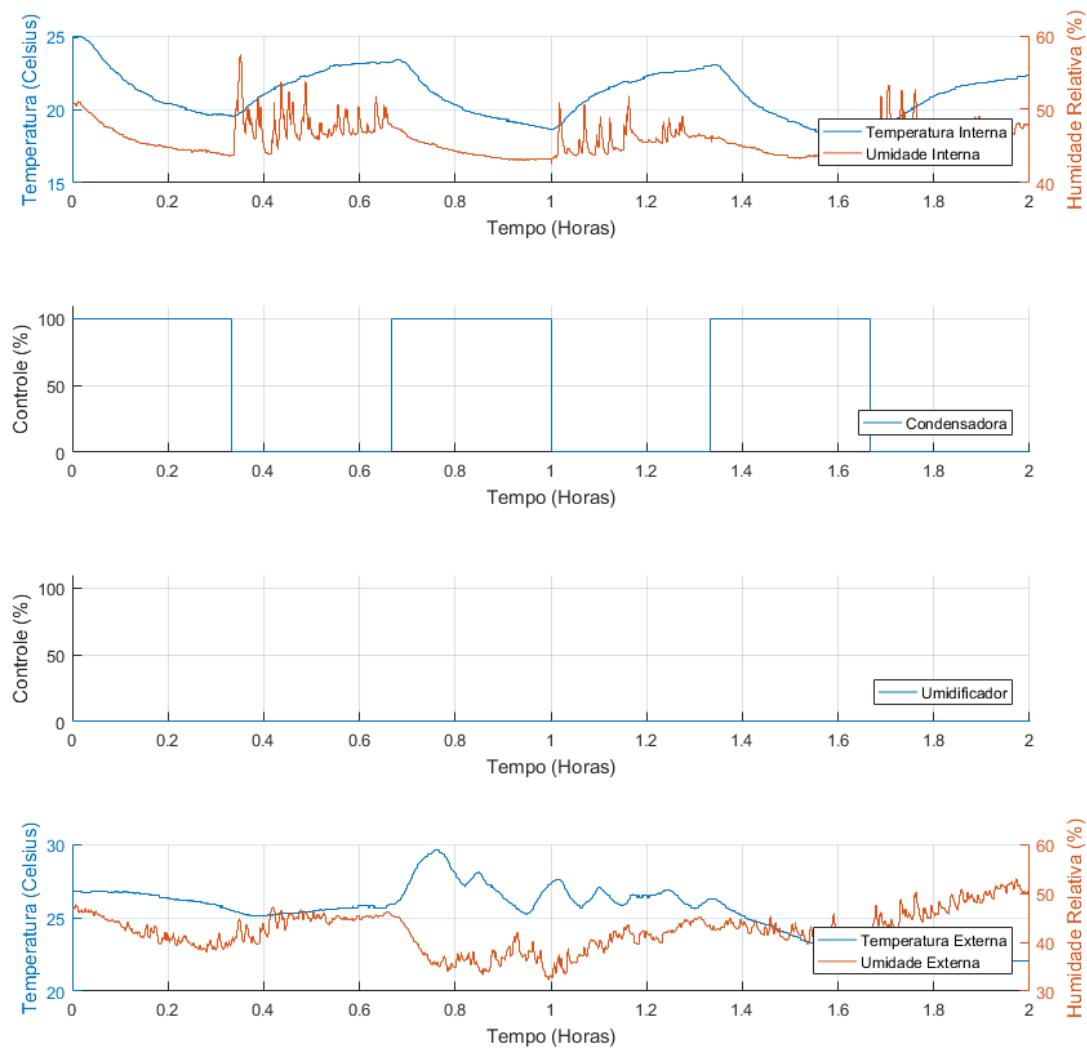


Figura 4.1: Ensaio Condensadora.

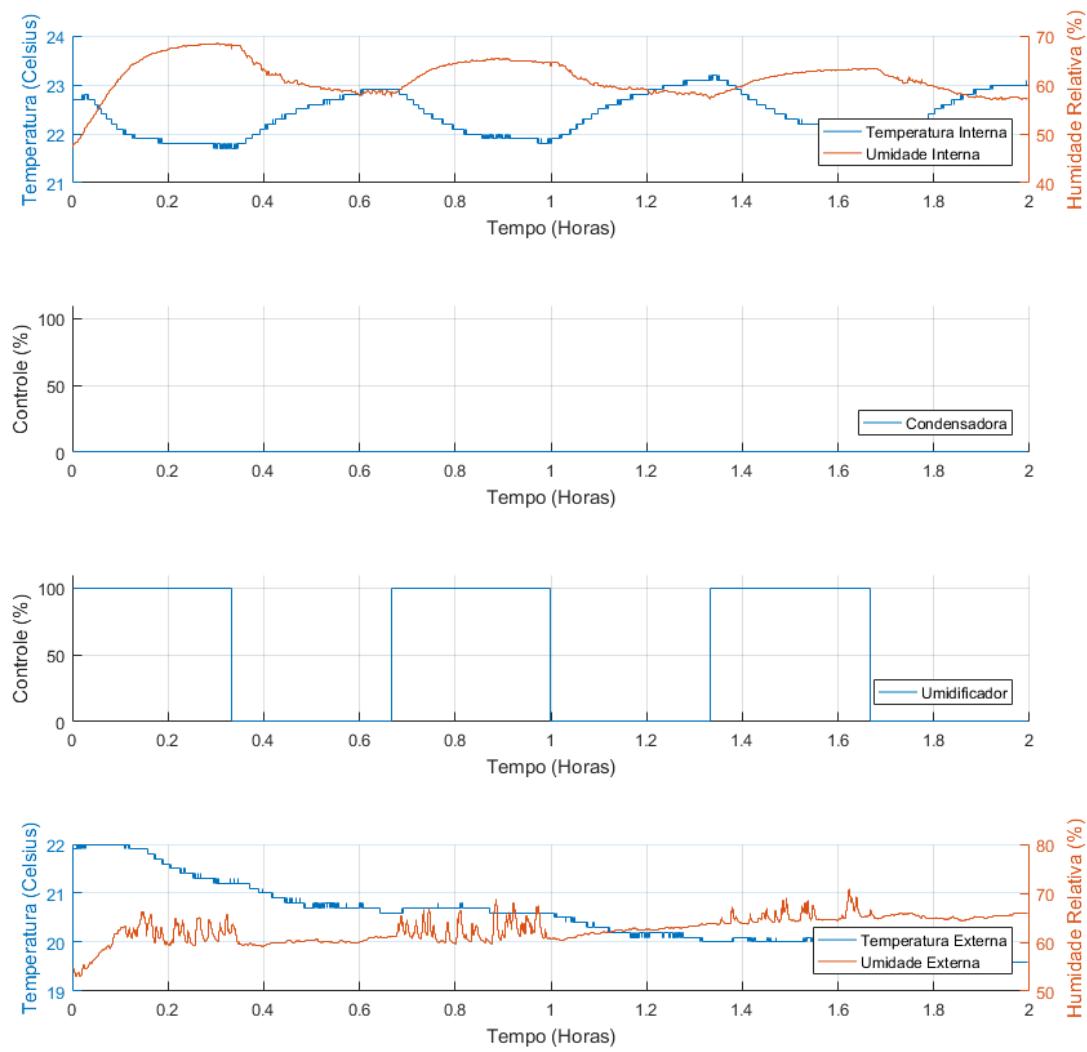


Figura 4.2: Ensaio Umidificador.

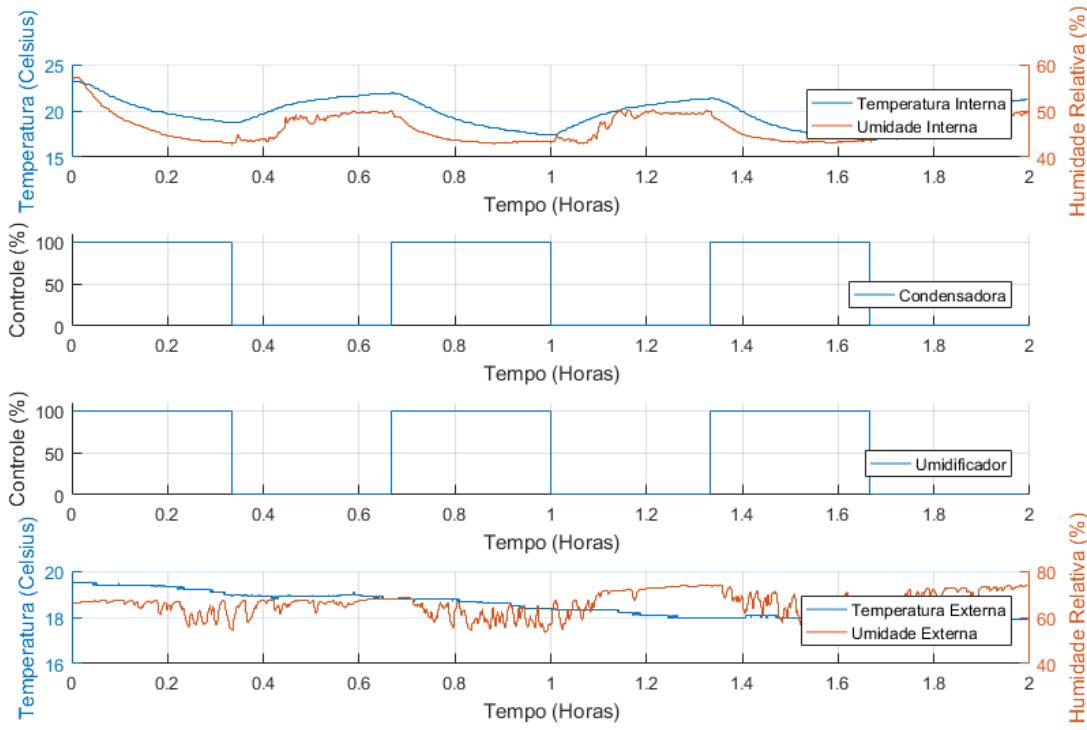


Figura 4.3: Ensaio Condensadora e Umidificador.

4.2 SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE CALOR

Usa-se o modelo final, figura 4.4, para comparar o comportamento da planta com o modelo construído. Os sinais de entrada são os coletados durante o ensaio de caracterização da planta. Pode-se observar que o comportamento é semelhante, no entanto a sobreposição não satisfaz. Isso indica que há um erro significativo na estimativa dos parâmetros K , W_1 e Potência do atuador. Isso não inviabiliza o projeto do controle. Pois o ganho do compensador proporcional pode ser obtido a partir de tentativa e erro, visto que não há riscos de destruir a planta no processo. Fica para trabalhos futuros utilizar uma forma mais eficaz de se obter os parâmetros seja de forma analítica ou numérica. Para a simulação foram utilizados os parâmetros da tabela 4.1. Estes valores foram ajustados em pequenos incrementos até que a sobreposição ficasse melhor visualmente. O resultado da simulação pode ser observado na figura 4.5. Pode-se observar que no modelo a temperatura decai menos do que no ensaio experimental. Isto indica a presença de uma perturbação $W < 0$. Este fenômeno pode ser justificado da seguinte forma, a sala perde calor para as salas adjacentes, visto que estas devem estar à uma temperatura inferior à sala em questão. Para corrigir o modelo, deve-se adicionar a influência destes ambientes, deve-se portanto coletar a temperatura destes também.

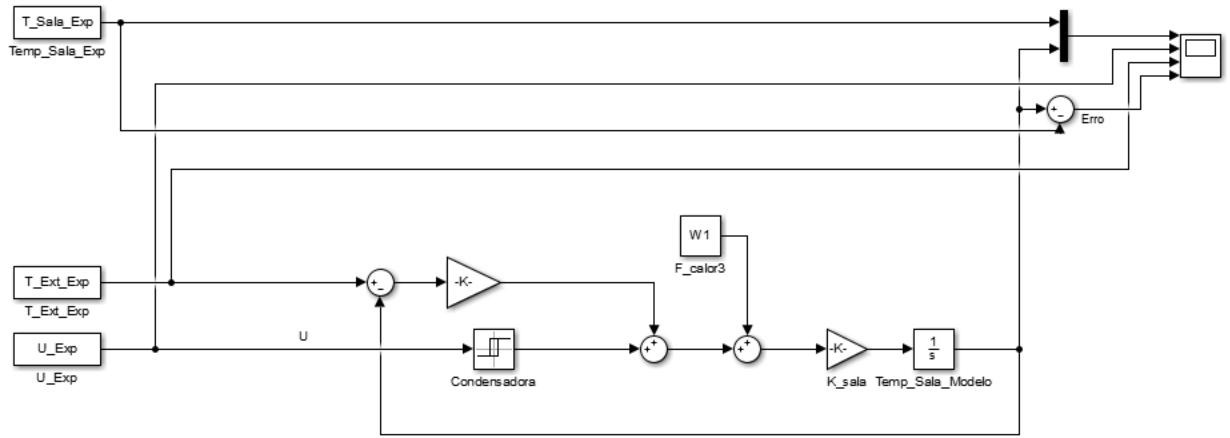


Figura 4.4: Modelo pronto para ser calibrado.

Variável	Valor
W_1	0
$P_{condensadora}$	558
K	56.55

Tabela 4.1: Dados utilizados para a simulação de calibração.

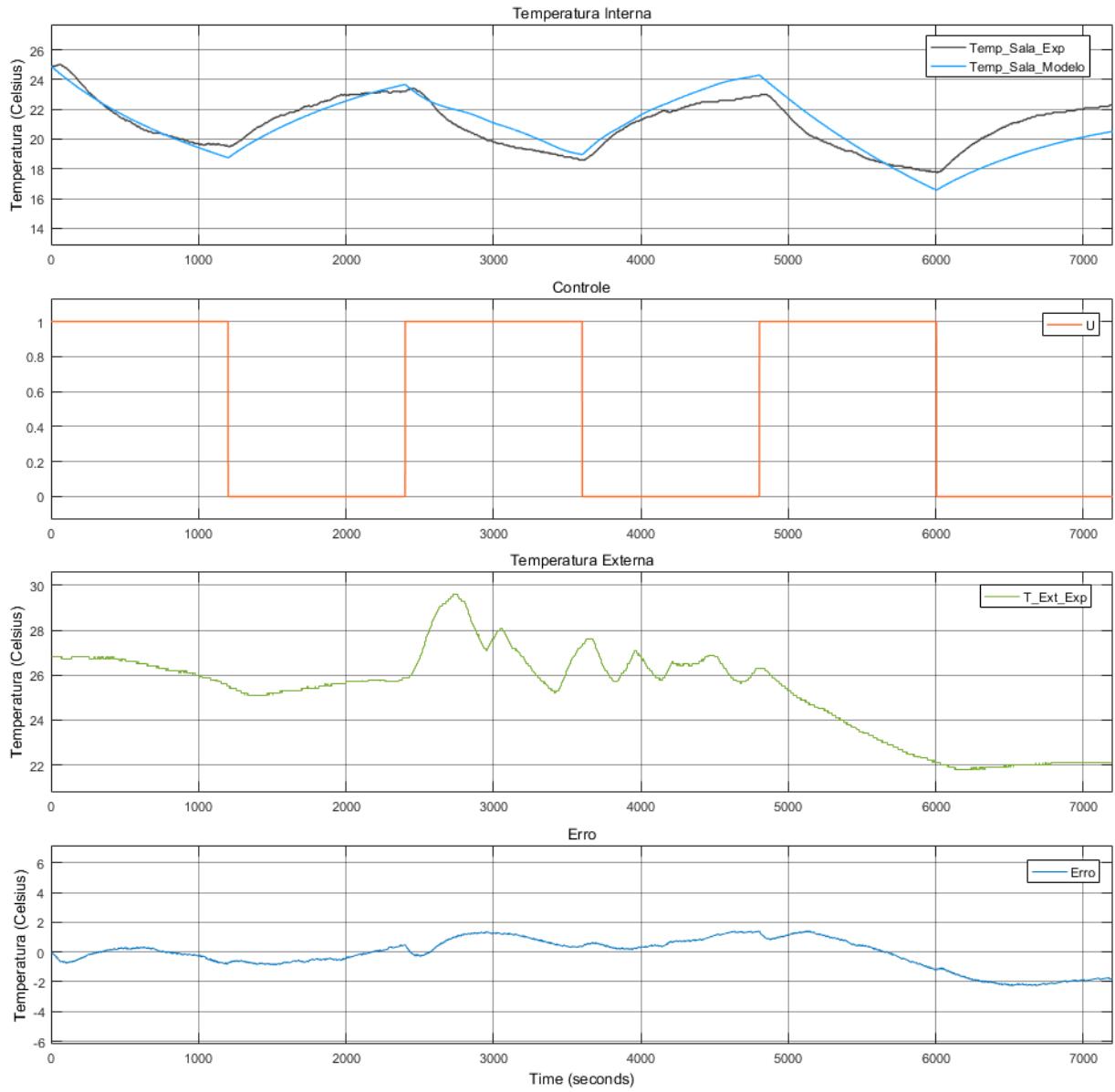


Figura 4.5: Simulação e comparação do modelo com os dados experimentais.

4.3 SIMULAÇÕES COM CONTROLADORES

A figura 4.6 mostra a simulação feita para o controlador do tipo relé com histerese, enquanto a figura 4.7 mostra a simulação realizada utilizando o controlador proporcional digital. O sinal de controle tem valor negativo visto que o ar condicionado remove calor do ambiente.

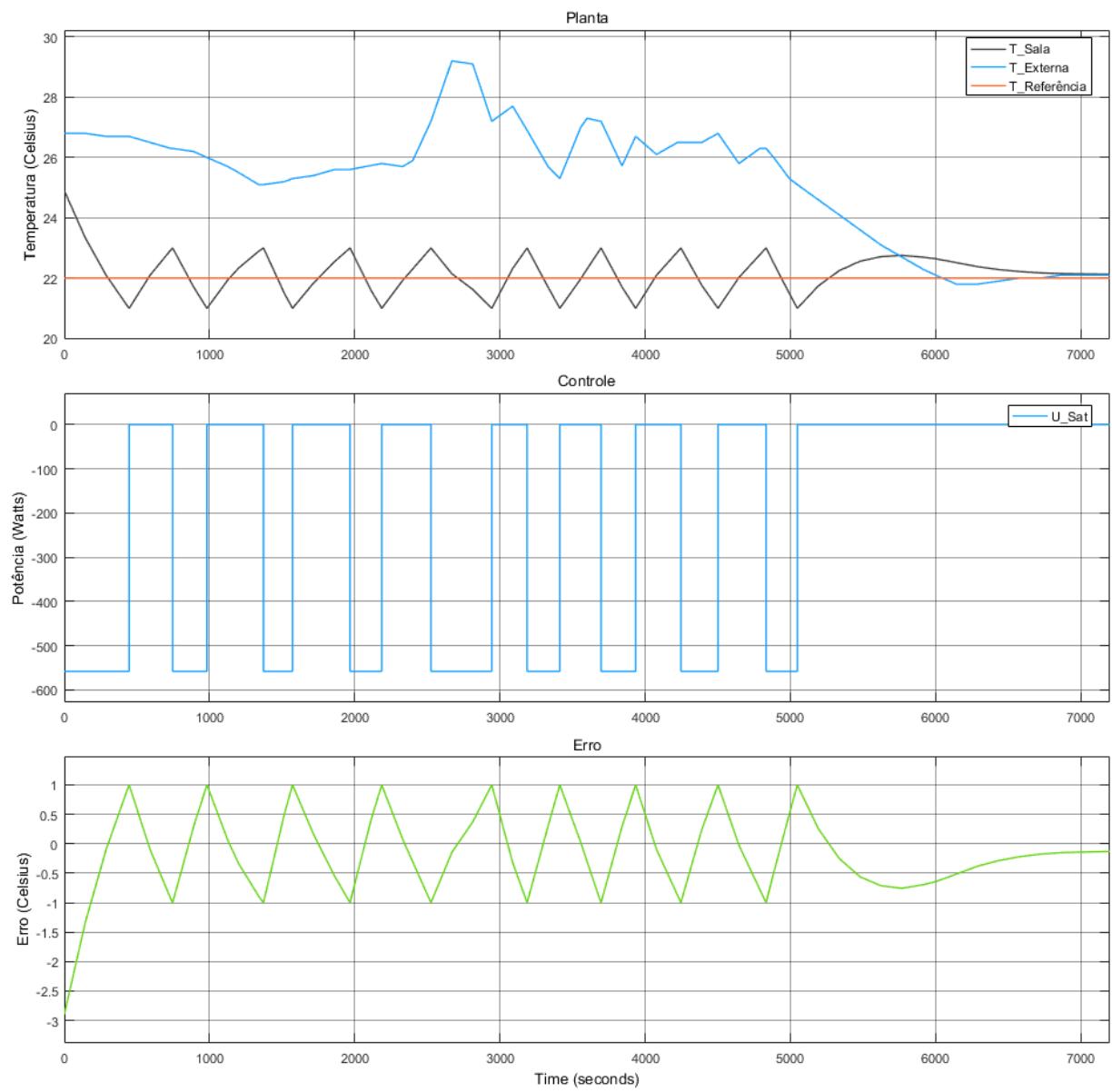


Figura 4.6: Simulação com controlador do tipo relé com histerese.

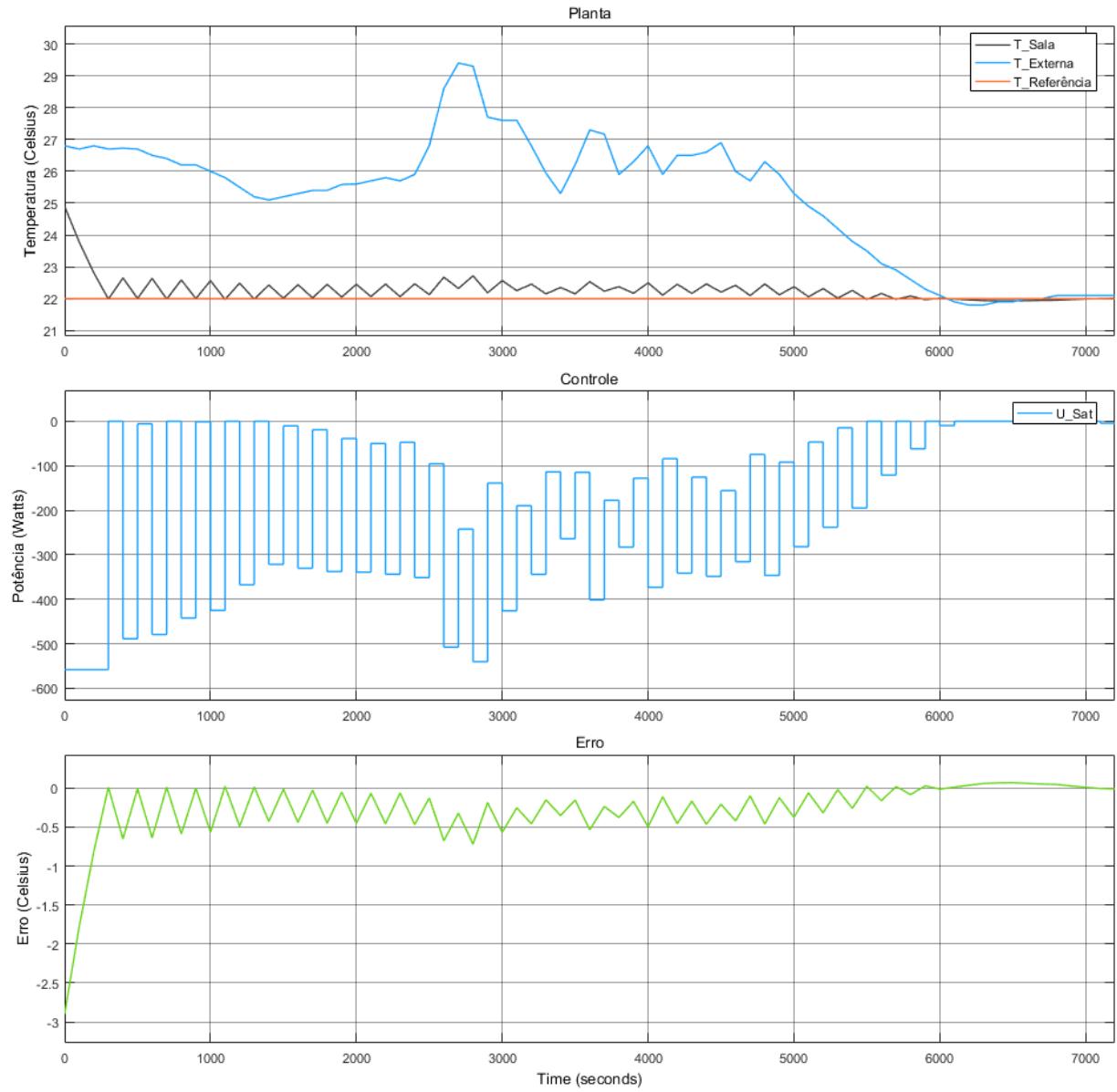


Figura 4.7: Simulação com controlador do tipo digital proporcional.

4.4 IMPLEMENTAÇÃO DOS CONTROLADORES

As figuras 4.8 e 4.9 mostram os circuitos utilizados na implementação dos três controladores utilizados para ensaios no sistema de climatização híbrido sob estudo.

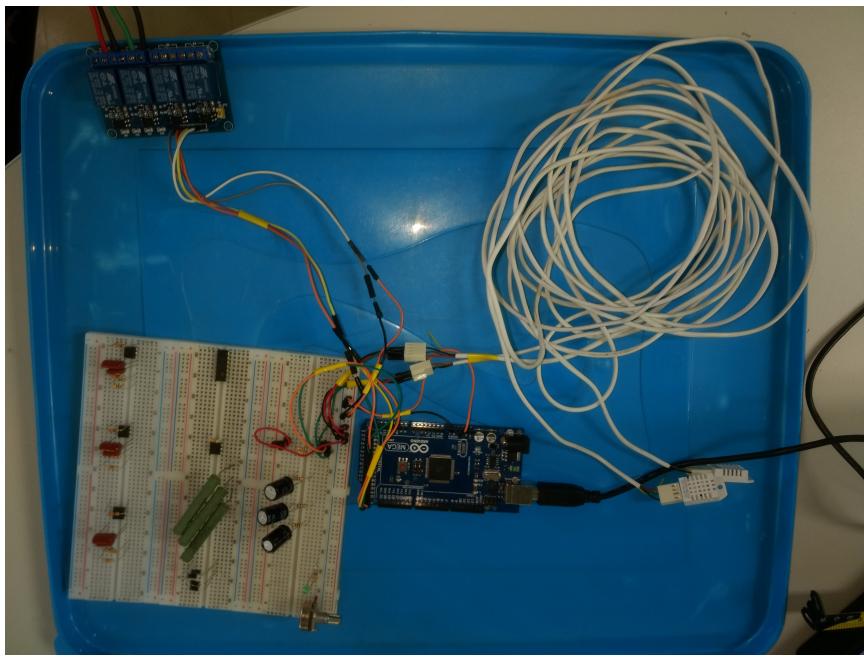


Figura 4.8: Arduino, Relés, DHTs e circuitos de apoio.

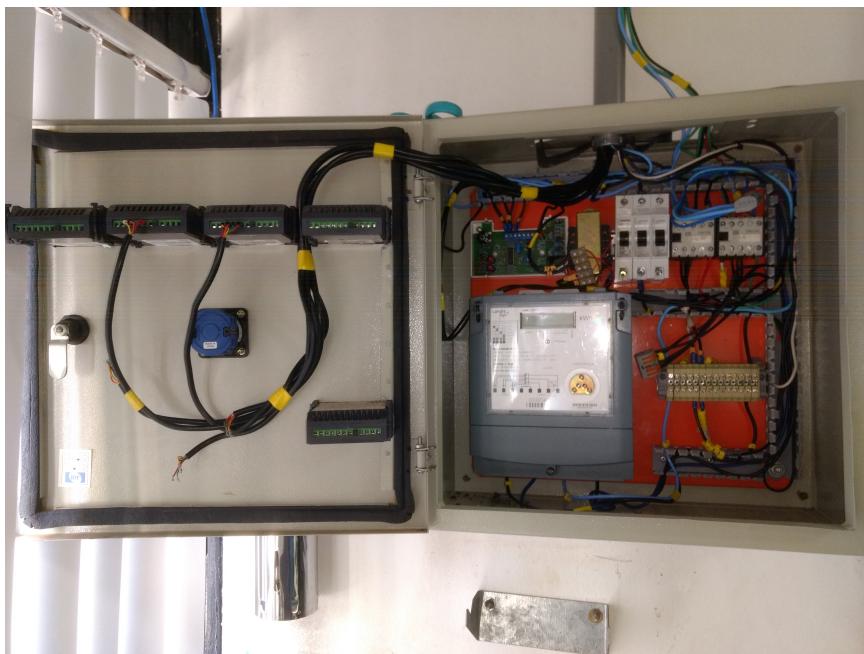


Figura 4.9: Painel com contactoras, medidor de energia, disjuntores e transformador.

4.5 ENSAIOS COM CONTROLADORES

Os dados experimentais são mostrados nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12. A tabela 4.2 mostra o consumo em cada ensaio, enquanto a tabela 4.3 apresenta um sumário das variáveis temperatura e umidade para cada um dos três ensaios.

Pode-se observar que ao utilizar dois relés com histerese para controlar tanto umidade como também a temperatura, obteve-se o melhor desempenho na redução do consumo de energia para o controle de temperatura de um ambiente. Em segundo lugar no *ranking* de consumo de energia elétrica, está o uso de dois compensadores digitais proporcionais, um para temperatura e outro para umidade. Por último nesta comparação, fica o uso de apenas um relé com histerese para o controle de temperatura. A temperatura média para o controlador 3 foi a mais próxima da referência em 22 graus Celsius, em segundo lugar está o controlador 2 e em terceiro o controlador 1. No entanto, é necessário apontar que o controlador 1 obteve a menor variância de temperatura e isso implica diretamente sobre o conforto térmico sentido pelos usuários do ambiente.

Em relação ao controle de umidade, o controlador 2 obteve o melhor resultado, ficando muito próximo da referência em 45%. Já controlador 3 saiu da especificação que admite erro de 15% para a umidade. O controlador 1, apesar de estar distante da referência, permanece dentro do intervalo da especificação. Ainda observando-se os resultados do controle de umidade feito pelos 3 controladores, o controlador 3 obteve a menor variância para a umidade, enquanto que o controlador 1 obteve a maior variância.

Controlador	Tipo	Controle umidade	Consumo de energia (kWh)
1	Compensador Digital	sim	0.880
2	Relé com Histerese	sim	0.710
3	Relé com Histerese	não	0.930

Tabela 4.2: Consumo de energia por cada controlador em kWh.

Controlador	1	2	3
Temperatura Média (Celsius)	22.5	22.4	22.2
Variância temperatura (Celsius)	0.041	0.633	0.698
Umidade Média (%)	54.0	45.5	26.6
Variância umidade (%)	14.3	7.48	1.42

Tabela 4.3: Sumário dos dados experimentais.

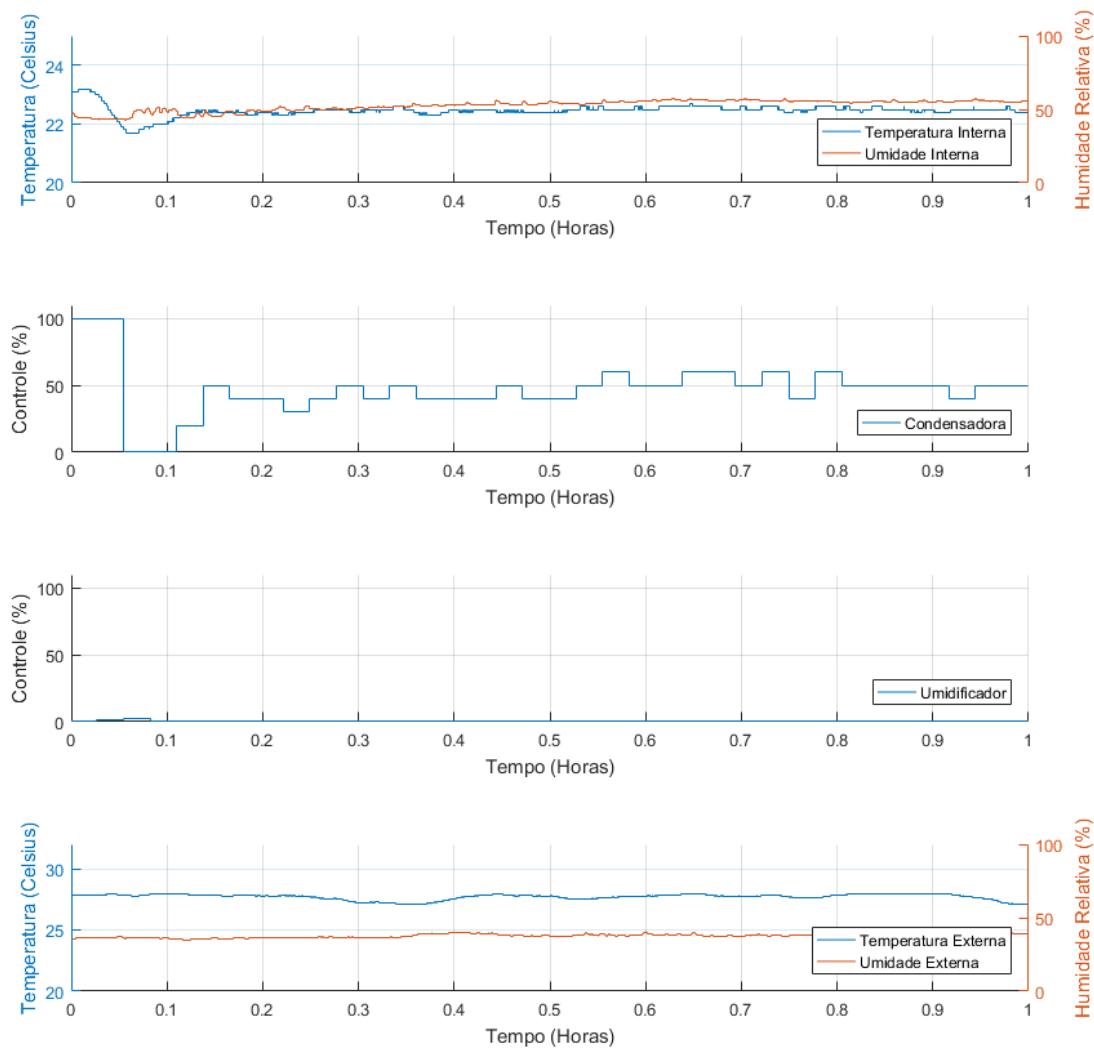


Figura 4.10: Ensaio com temperatura e umidade controladas por Compensador Proporcional Digital.

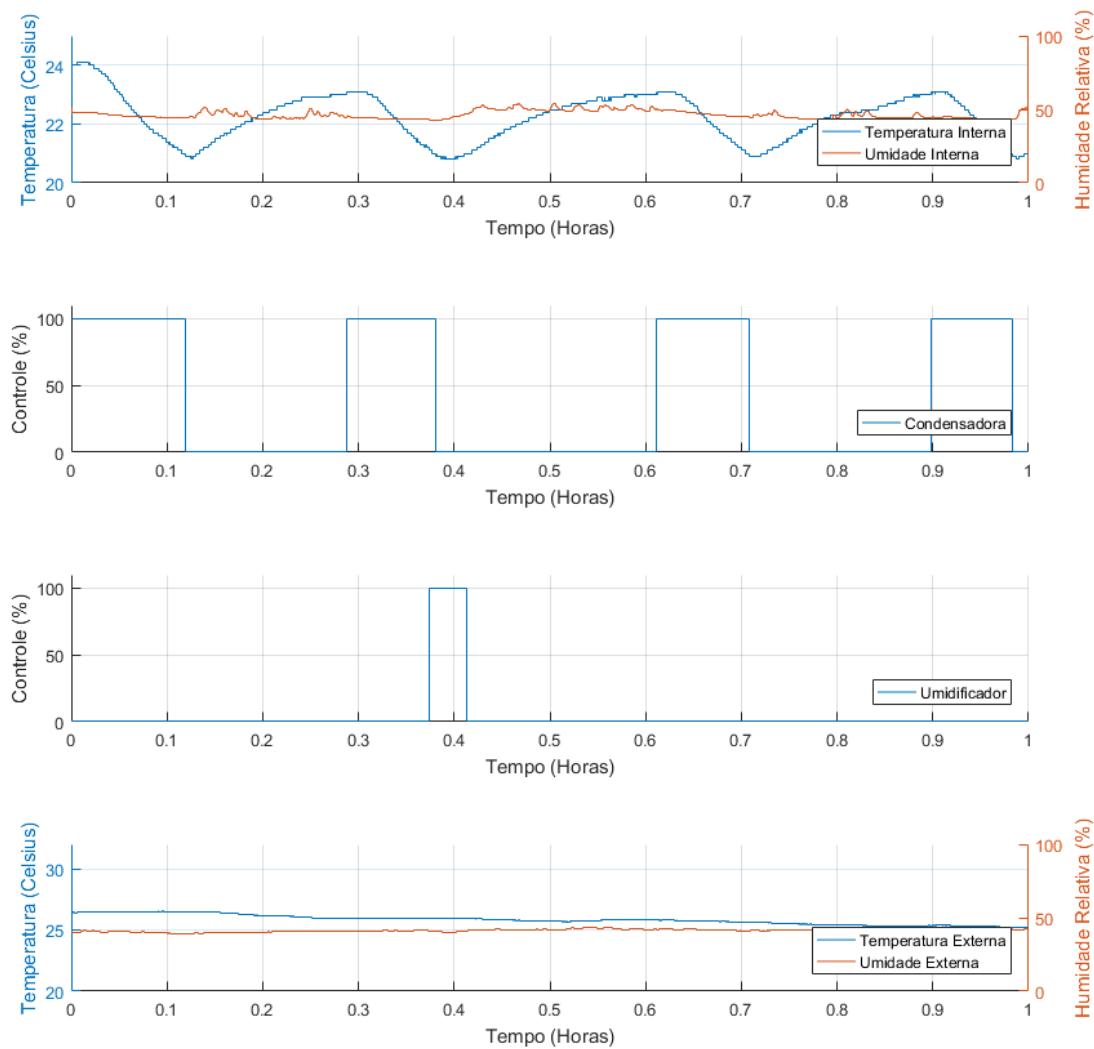


Figura 4.11: Ensaio com temperatura e umidade controladas por Relés com Histerese.

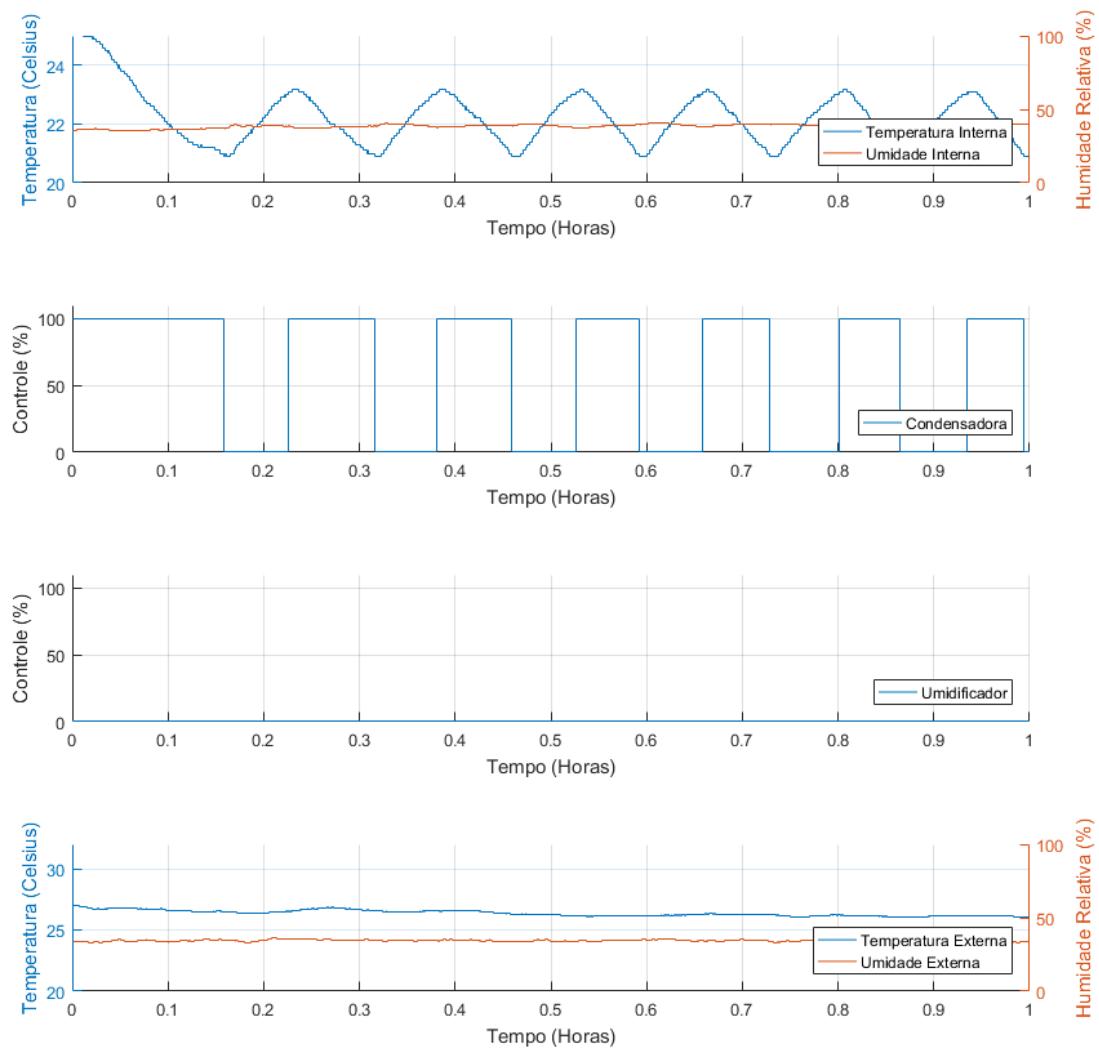


Figura 4.12: Ensaio com temperatura controlada por Relé com Histerese.

5 CONCLUSÕES

Os dados experimentais revelaram que o uso de dois relés com histerese para controlar um ar condicionado e um umidificador evaporativo de forma independente permitiram reduzir o consumo de energia com a climatização de um ambiente de trabalho. No entanto caso o conforto térmico seja levado em consideração, o uso de um compensador digital proporcional apresenta a menor variância na temperatura, a um custo um pouco maior. O uso de apenas um relé com histerese para controlar um aparelho de ar condicionado provou ser a alternativa menos vantajosa. De acordo com os experimentos a umidade da sala saiu das especificações de conforto e a temperatura apresentou uma elevada variância.

Ao analisar todos os resultados que os diferentes controladores apresentaram, pôde-se inferir que cada controlador é ótimo em uma situação específica. Caso o cliente que contrate os serviços de engenharia para a sua residência prefira uma solução que minimize o consumo de energia, será indicado o controlador de temperatura e umidade que utiliza relés com histerese. Já outro cliente que deseje manter variações mínimas de temperatura e umidade não se importando tanto com o consumo de energia preferirá o compensador proporcional digital. Por último, caso o cliente prefira a solução de menor custo de implementação irá optar pelo uso de um único relé com histerese para controlar a temperatura somente, não levando em conta a umidade.

Sugiro que em trabalhos futuros seja utilizado o conversor AC-AC proposto neste trabalho como alternativa ao uso de PWM. O uso desta tecnologia permite reduzir o intervalo de amostragem para, em teoria, pouco menos de nove milissegundos. De acordo com os estudos realizados sobre controle digital, quanto menor o tempo de amostragem mais próximo o controlador se comportará como se fosse contínuo. Isto permite o uso de ganhos maiores, sem cruzar o limite da estabilidade, e com isso obtêm-se respostas mais rápidas da planta. O uso de PWM limita o intervalo de amostragem, dado que o constante chaveamento pode reduzir a vida útil do compressor. Portanto deve-se utilizar o maior valor de período que satisfaça os requisitos de projeto. Fica aqui uma recomendação de que, caso se utilize o conversor AC-AC, o ângulo de disparo deve ser mantido acima de noventa graus. Esta recomendação, vinda de professores da UnB, baseia-se em que a rotação do rotor do compressor é responsável pela sua própria refrigeração. Logo, se mantido em baixas velocidades, pode operar acima da temperatura recomendada pelo fabricante e isso pode reduzir a sua vida útil. O uso do conversor AC-AC pode injetar ruído na rede elétrica devido ao chaveamento frequente, o que pode inviabilizar o seu uso em um laboratório.

Conforme discutido no início deste trabalho, a posição do umidificador evaporativo e do ar condicionado no circuito faz diferença, assim como a escolha da posição para os coletores de ar interno e externo. Para trabalhos futuros proponho que seja utilizado um sistema no qual tanto o ar externo quanto o ar que recircular passem pelo processo de umidificação seguido pela refrigeração, nesta ordem. Conforme demonstrado com a carta psicrométrica, este arranjo garante a menor temperatura final da massa de ar e com isto sugere que o processo possuirá um consumo energético ainda menor.

O modelo construído pode ser melhorado utilizando métodos numéricos para refinar os parâmetros. Neste trabalho o próprio autor efetuou pequenas alterações enquanto observava a adequação dos dados

aos resultados experimentais, o que foi um processo demorado. Deve-se atentar a que a variação destes parâmetros é permitida devido à imprecisão na medição dos mesmos. É esperado que tais valores variem pouquíssimo, e portanto, deve-se desconfiar da execução de métodos numéricos que alterem estes valores em excesso. É preciso também que sempre se questione a imprecisão de cada medida.

Este projeto permitiu ao autor aplicar conceitos e fundamentos obtidos na universidade em uma aplicação de mercado com possibilidade de retorno positivo à sociedade. Espera-se que o mesmo seja continuado por outros estudantes, contribuindo com sua formação profissional. A qualidade do ar e a climatização dos ambientes de trabalho é um tópico de elevada importância para a nossa sociedade, atuando diretamente na qualidade de vida e bem estar das pessoas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 SILBERSTEIN, B. W. B. J. J. T. E. *Refrigeration and Air Conditioning Technology*. 7. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2012.
- 2 UIG. *Universal Industrial Gases, Inc*. 2017. [Http://www.uigi.com/](http://www.uigi.com/). Online, acessado em janeiro de 2017.
- 3 CENGEL, A. G. Y. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 5. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2015.
- 4 FLORES, J. L. O. *Sistema híbrido de climatização visando conforto térmico e eficiência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Agosto 2009.
- 5 CARRIER. *Carrier*. 2017. [Http://carrierdobrasil.com.br/](http://carrierdobrasil.com.br/). Online, acessado em janeiro de 2017.
- 6 BISHOP, O. *Electronics - Circuits and Systems, Fourth Edition*. 4. ed. [S.l.]: Newnes, 2011.
- 7 MOTOROLA. *6-Pin DIO Random-Phase Optoisolators Triac Driver Output*. [S.l.], 1995. Rev. 1.
- 8 HEATING, R. American Society of; ENGINEERS, A. conditioning. *Fundamentals Handbook*. [S.l.]: ASHRAE, 1997.
- 9 ÇENGEL YUNUS A.; BOLES, M. A. *Thermodynamics : an engineering approach*. Eighth edition. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2015.
- 10 VIANNA, P. I. E. *Automação de um sistema de climatização híbrido com foco no processo evaporativo visando conforto térmico e uso racional da energia*. Dissertação (Graduação) — Universidade de Brasília, jul 2012.
- 11 ARAÚJO, H. A. S. de; MELO, M. C. C. *Controle adaptativo da climatização predial para eficiência energética*. Dissertação (Graduação) — Universidade de Brasília, jul 2013.
- 12 ARAÚJO, A. M. *Controle tito via desacoplamento de malhas de climatização híbrida*. Dissertação (Graduação) — Universidade de Brasília, dez 2016.
- 13 IRWIN, R. M. N. J. D. *Basic Engineering Circuit Analysis*. 11. ed. [S.l.]: Wiley, 2015.
- 14 NISE, N. S. *Control Systems Engineering*. 7. ed. [S.l.]: Wiley, 2015.
- 15 OGATA, K. *Discrete-Time Control Systems (Pie)*. [S.l.]: Pearson Education, 1994.
- 16 VELONI, N. M. A. *Digital Control Systems: Theoretical Problems and Simulation Tools*. [S.l.]: CRC Press, 2017.
- 17 CARRIER. *Manual de Instalação*. 2017. [Http://carrierdobrasil.com.br/](http://carrierdobrasil.com.br/). Online, acessado em janeiro de 2017.
- 18 CIBRACON. *Am 2001 - Proporcional Motor Atuador Rotativo*. 2017. [Http://www.cibracon.ind.br/](http://www.cibracon.ind.br/). Online, acessado em janeiro de 2017.

ANEXOS

I. TRIACS

Um Triac, figura I.1, é um dispositivo em que dois tiristores estão montados em paralelo, mas com a polaridade trocada, em um bloco de silício e os terminais *gate* dos dois tiristores estão conectados. Esse arranjo permite a condução de corrente em ambos os sentidos. O terminal *gate* é utilizado para receber disparos de tensão, os outros dois terminais são chamados MT1 e MT2. Ao receber um pulso positivo durante o semi-ciclo positivo, o triac permite a passagem de corrente e mantém-se em condução até que a corrente se torne suficientemente pequena, então deixa de conduzir. Quando recebe um pulso negativo durante o semi-ciclo negativo, o triac permite a passagem de corrente até que esta se torne suficientemente pequena, assim como durante o semi-ciclo positivo. Para outras condições de polaridade do pulso e da fonte o dispositivo bloqueia a corrente.

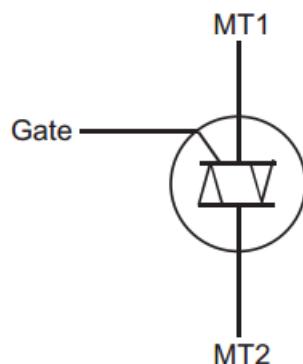


Figura I.1: Triac, retirado de (6).

Triacs são utilizados na implementação de conversores AC-AC. Nestes o ângulo de disparo do triac é utilizado para controlar a potência entregue à carga. O uso mais comum são os dimmers para lâmpadas domésticas, nos quais um potenciômetro é utilizado para controlar a constante de tempo do circuito de disparo. Esse disparo acontece cento e vinte vezes por segundo em um ambiente onde a rede elétrica tem frequência de sessenta hertz, ocorrendo após um atraso medido em relação ao cruzamento da tensão por zero.

É possível automatizar os disparos sobre o terminal *gate* com o auxílio de um microcontrolador. O microcontrolador deverá reagir ao evento cruzamento por zero e disparar o triac de acordo com o ângulo de disparo solicitado. O ângulo variando de zero a cento e oitenta graus controla a potência efetiva que atravessa a carga. A figura I.2 demonstra o resultado de um microcontrolador disparando um triac com atraso. A linha azul representa a tensão sobre a carga, a linha amarela representa a tensão da fonte, em verde está o sinal de disparo. Pode ser visto que o disparo é sempre positivo e tem duração pequena o suficiente para ser considerado um pulso.

Digital Oscilloscope

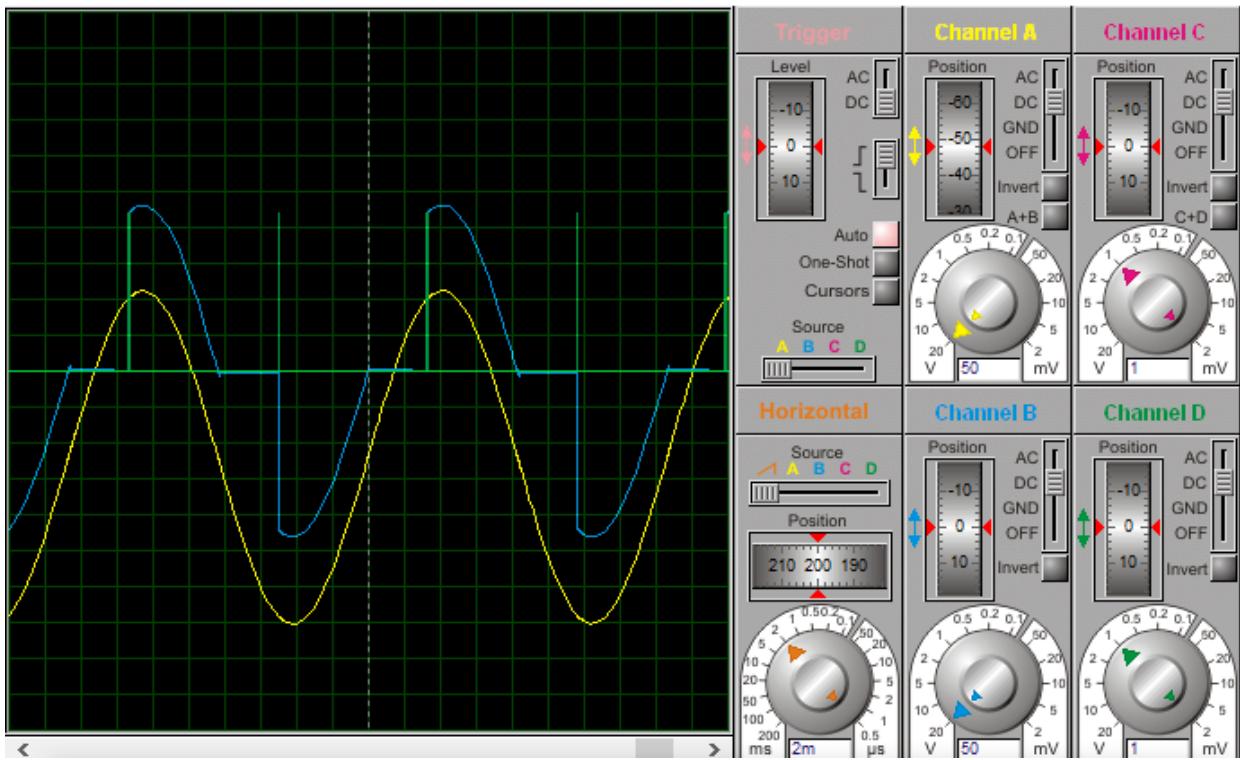


Figura I.2: Forma de onda sobre a carga após um disparo com atraso.

Ao aplicar uma tensão de cinco volts sobre o terminal de entrada (IO44) do circuito da figura I.3, o opto-acoplador MOC3021 dispara seu próprio triac. Durante o semicírculo positivo da fase, caso o triac dentro do opto-acoplador esteja conduzindo, uma tensão positiva é aplicada sobre o Triac U5 através do divisor de tensão. Este pulso dispara o triac e permite a passagem de corrente da fase para a carga. Durante o semicírculo negativo, caso o triac do opto-acoplador esteja ativo, uma tensão negativa é aplicada aos terminais do triac U5 e este passa a conduzir corrente entre a fase e a carga.

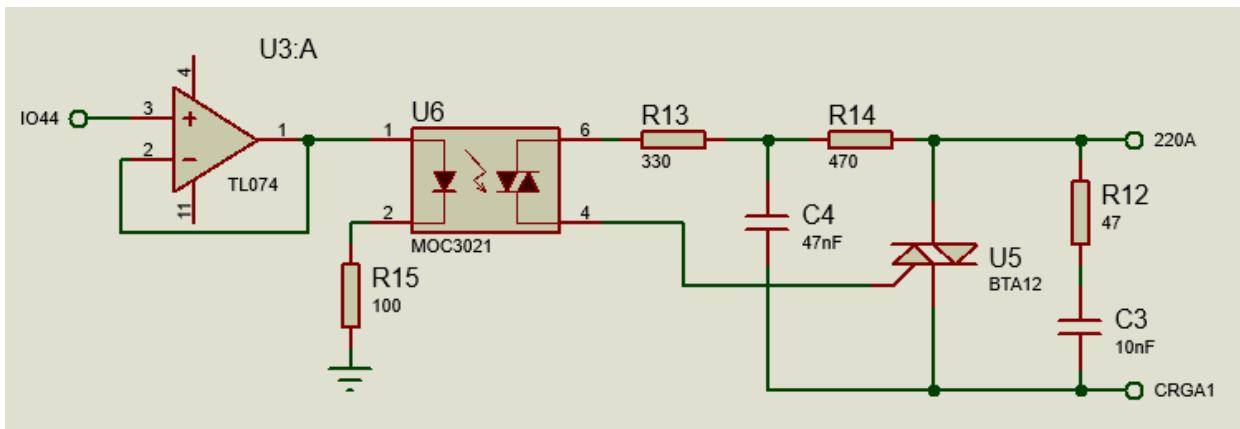


Figura I.3: Circuito de isolamento elétrico e adequação de sinal para um triac BTA12. Projetado a partir de (7).

O circuito detector de passagem por zero, figura I.4, funciona da seguinte forma: quando a tensão é positiva, a ponte retificadora permite que a tensão seja aplicada sobre a resistência, e como consequência, uma corrente atravessa o opto-acoplador, 4N25, o qual satura o transistor e permite a passagem de corrente proveniente do resistor R10. Como resultado a tensão vista na saída é interpretada como zero lógico. Quando a tensão da fonte se aproxima de zero, a corrente que atravessa R2 torna-se insuficiente para ativar o transistor e a corrente em R10 se aproxima de zero, assim, a saída lógica torna-se 1. Durante o semi-ciclo negativo a ponte retificadora garante que o comportamento seja idêntico ao já descrito para o opto-acoplador. Como resultado a saída emitirá um pulso equivalente ao sinal lógico 1, toda a vez que a tensão da fonte cruzar o zero.

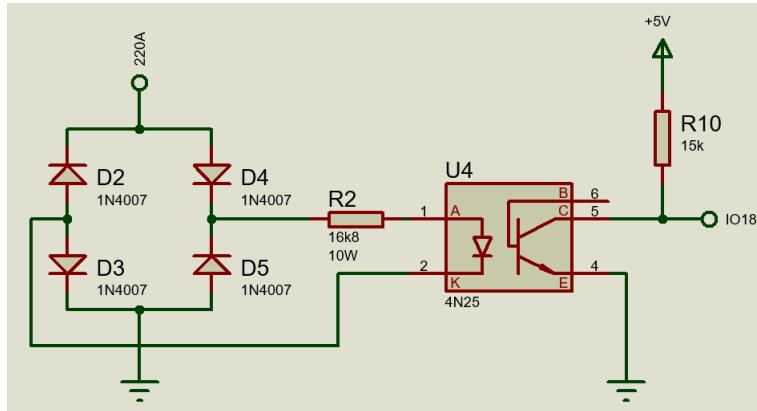


Figura I.4: Detector de passagem por zero.

I.1 MOTIVAÇÃO PARA O USO DO CONVERSOR AC-AC

Utilizando-se de um conversor AC-AC em conjunto com um termopar como sensor de temperatura é possível reduzir o tempo de amostragem para pouco menos de nove milissegundos, em uma rede elétrica operando a sessenta hertz. A implementação deste circuito é realizada utilizando o circuito da figura I.3 em conjunto com o circuito da figura I.4. Um Arduino UNO é utilizado como o microcontrolador que controlará os disparos. São implementados três conversores AC-AC, com o objetivo de controlar até três cargas. A quantidade de retificadores foi estabelecida pensando-se em reutilizar o circuito para futuros projetos. O projeto é primeiramente realizado na plataforma Proteus, o circuito é validado e testado em conjunto com o microcontrolador. Todo o processo durou cerca de três meses.

I.2 SIMULAÇÃO DO CONVERSOR AC-AC

A figura I.5 mostra uma sequência de ângulos de disparos diferentes obtidos em simulação.

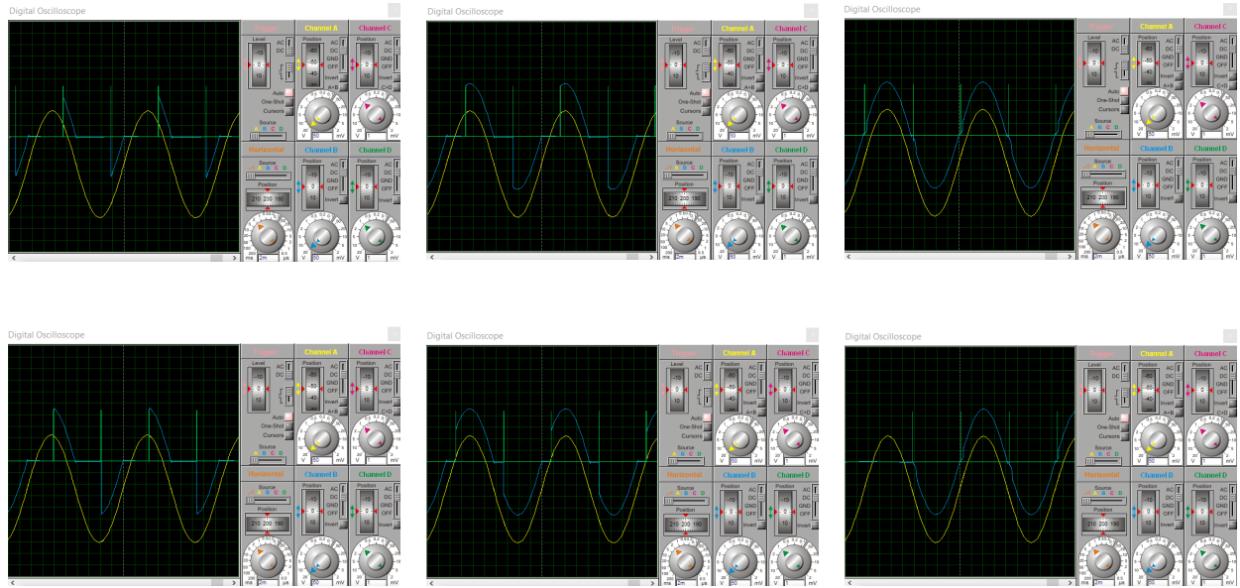


Figura I.5: Sequência de ângulos de disparo obtidas em simulação.

I.3 IMPLEMENTAÇÃO DO CONVERSOR AC-AC

As figuras I.6, I.7 e I.8 mostram o circuito implementado com o auxílio de *protoboards* e testado realizando o controle de potência de três lâmpadas fluorescentes.

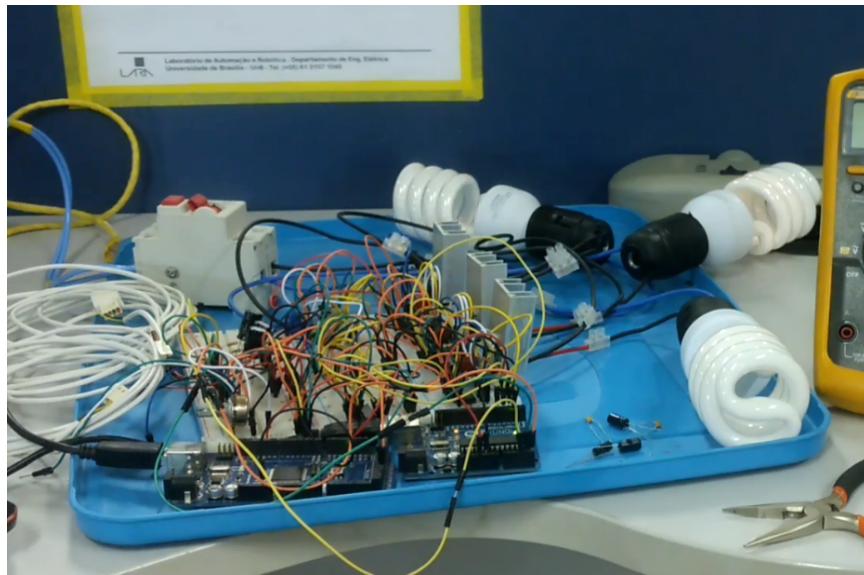


Figura I.6: Testes do conversor AC-AC, ângulo de disparo 171 graus.

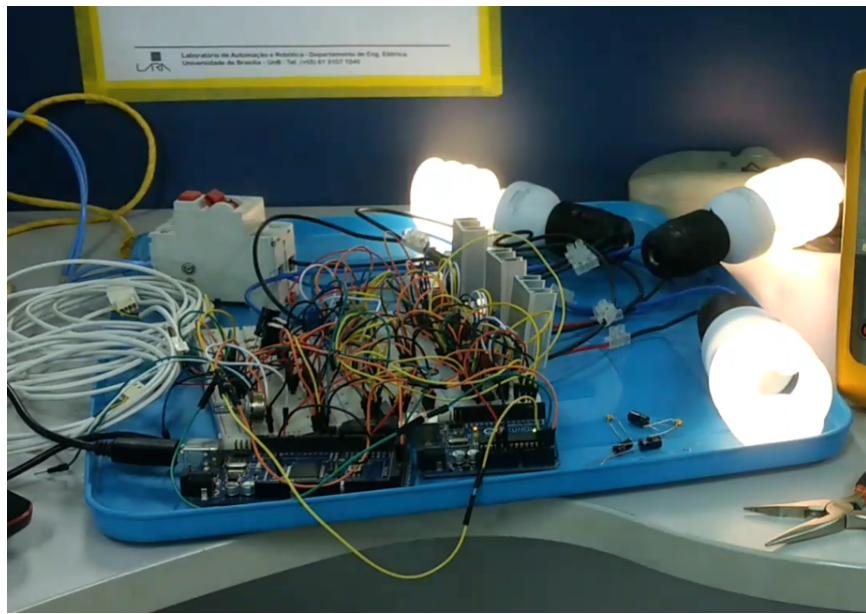


Figura I.7: Testes do conversor AC-AC, ângulo de disparo 90 graus.

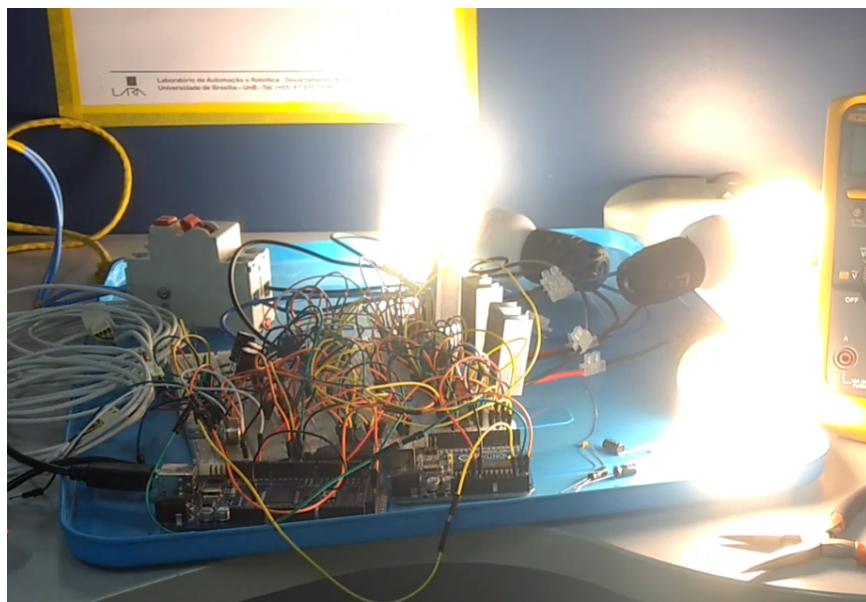


Figura I.8: Testes do conversor AC-AC, ângulo de disparo 9 graus.