



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MONIK MAIA SANTA ROSA OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO VOLUME DE CONDENSADO, A TAXA DE CO₂ E A
INFLUÊNCIA DA RENOVAÇÃO DO AR INTERNO EM AMBIENTES FECHADOS
UTILIZANDO UM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR TIPO EXPANSÃO
DIRETA**

Recife
2019

MONIK MAIA SANTA ROSA OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO VOLUME DE CONDENSADO, A TAXA DE CO₂ E A
INFLUÊNCIA DA RENOVAÇÃO DO AR INTERNO EM AMBIENTES FECHADOS
UTILIZANDO UM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR TIPO EXPANSÃO
DIRETA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos e Sistemas Térmicos.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Antônio Ochoa Villa

Coorientador: Prof. Dr. Ângelo Peixoto da Costa

Recife
2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

O48a

Oliveira, Monik Maia Santa Rosa.

Análise experimental do volume de condensado, a taxa de CO₂ e a influência da renovação do ar interno em ambientes fechados utilizando um sistema de condicionamento de ar tipo expansão direta / Monik Maia Santa Rosa Oliveira. - 2019. 92 folhas, il. e tabs.

Orientador. Prof. Dr. Álvaro Antônio Ochoa Villa.
Coorientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Mecânica. 2. Ar condicionado. 3. Coleta de condensado.
4. Níveis de CO₂. I. Ochoa Villa, Álvaro Antônio (Orientador). II. Costa, José Ângelo Peixoto da (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-170

MONIK MAIA SANTA ROSA OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO VOLUME DE CONDENSADO, A TAXA DE CO₂ E
A INFLUÊNCIA DA RENOVAÇÃO DO AR INTERNO EM AMBIENTES FECHA-
DOS UTILIZANDO UM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR TIPO EX-
PANSÃO DIRETA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 08/02/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa (Orientador)
Instituto Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa (Coorientador)
Instituto Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Marcus Costa de Araújo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a Dr^a Andrezza Carolina Carneiro Tomás (Examinadora Externa)
Instituto Federal de Pernambuco

Em memória de minha bisavó materna, Severina Pereira de Oliveira. Deus não permitiu que a senhora acompanhasse minha trajetória acadêmica, mas me deixou a certeza que sem seu amor e dedicação incondicional, eu não seria quem sou, você me permitiu acreditar em voos mais altos e aqui estou, obrigada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me segurou em sua mão protetora e me permitiu realizar esta caminhada atribulada com a certeza de que não estava só.

Aos professores Álvaro Antônio Ochoa Villa e Ângelo P. da Costa, que embarcaram neste desafio comigo, sempre aconselhando, apoiando e orientando de forma atenciosa, e fornecendo o ânimo e a confiança necessários para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho. Vocês são incríveis e exemplos de professores.

Ao professor Jorge Recarte Henriquez Guerrero por toda disponibilidade em me esclarecer algumas dúvidas, e fornecer a parte da instrumentação utilizada nos procedimentos experimentais.

Ao meu marido, Luiz Oliveira Jr., por me amparar nos momentos difíceis, sendo meu porto seguro todo o tempo e o maior incentivador dos meus sonhos. Agradeço também pela confecção de todos os suportes utilizados na bancada experimental.

Ao meu amigo Antônio Alberto Lima por ceder as instalações de sua empresa, estando sempre disponível a ajudar e extremamente paciente com todo aparato experimental que montei em seu ambiente de trabalho e que passaram a fazer parte de sua rotina.

Ao querido amigo Luiz Otávio Alves, pelo auxílio nas disciplinas, trabalhos e no desenvolvimento desta pesquisa, sempre atencioso e prestativo.

Ao grande Rubens, que salvou minha pesquisa ao reparar a placa de comando do *split*.

A Antônio Henrique Braga, por realizar toda manutenção do *split* e estar sempre disponível a ajudar.

Ao sr. Célio Gomes, por flexibilizar meus horários na empresa onde trabalhava e viabilizar o início desta pós-graduação.

A minha família, por todo apoio e amor, e em especial ao meu pai e minha mãe que muitas vezes se disponibilizaram a ajudar na montagem dos experimentos e a contornar dificuldades.

A todos os amigos do programa de pós-graduação, cada um contribuiu um pouco para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao professor Luciano Prestrelo, pelo empréstimo do medidor portátil de CO₂.

A Luana e Jorge pelas orientações cedidas e apoio na secretaria.

À UFPE pela oportunidade de ingressar no programa, e também pela disponibilidade dos laboratórios.

A todos os professores do programa, pelo conhecimento transmitido.

Ao IFPE pelo fornecimento de grande parte da instrumentação utilizada e colaboração do pessoal docente e discente no desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

O crescimento populacional e a industrialização ao redor do mundo aumentaram a demanda de aparelhos de ar condicionado e conseqüentemente de energia, já que estes sistemas são responsáveis por grande parte do consumo. Sendo assim, a otimização de sistemas de ar condicionado com foco na sustentabilidade e redução de energia já é um tema bastante discutido principalmente em regiões com escassez de água doce, como o Oriente Médio. Neste trabalho experimental, foi estudado o volume de condensado gerado por um equipamento com ciclo de refrigeração por compressão de vapor, 6,45 kw, tipo *split*, instalado em num escritório localizado no Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP), localizado em Recife/PE. A variação de temperatura, umidade relativa e concentração de CO₂ no ambiente, sem renovação de ar, também foram avaliadas. As análises de resultados mostram que são produzidos em média 0,5417 L/h, mas se considerar a primeira hora de medição, os valores coletados ficam em torno de 1,1430 L/h. O padrão de temperatura e umidade relativa é caracterizado por repetidas variações em determinado espaço de tempo, isto porque o equipamento estudado possui compressor com funcionamento *on/off* fazendo as grandezas oscilarem em torno do valor de *set point* do equipamento. Os períodos de oscilação foram determinantes no desenvolvimento da metodologia aplicada no experimento. Os níveis de CO₂ não ultrapassaram o limite de 1000 ppm considerado nas normativas, mas chama atenção pois mesmo com apenas uma pessoa na sala, foram aferidos valores superiores a 900 ppm.

Palavras-chave: Ar condicionado. Coleta de condensado. Níveis de CO₂.

ABSTRACT

Populational growth and global industrialization have increased the demand for air conditioning, and consequently energy, since these systems account for a large part of the consumption. Therefore, air conditioning system optimization focusing on sustainability and energy consumption reduction is already a theme largely discussed, specially in regions where freshwater shortage is an issue, like Middle East. In this experimental work, the condensate volume generated by a split air conditioning equipment steam compression cycle, 6,45kw, installed in an office located at the Pernambuco Institute of Technology (ITEP), located at Recife/PE, was studied. In addition to condensate collection, the temperature, relative humidity and CO₂ concentration in the environment without air renewal were analyzed. The results analysis shows that an average of 0,5417 L/h is produced, but if only the first hour of measurement is considered, the collected values are around 1,1430 L/h. The temperature and relative humidity pattern is characterized by repeated variations over a certain period of time, because the evaluated equipment has a compressor with on/off operation making the quantities oscillate around the set point value of the equipment. The periods of oscillation were determinant in the development of the methodology applied in the experiment. The levels of CO₂ did not exceed the limit of 1000 ppm considered in the regulations, but draws attention because even with only one person in the room, values were measured above 900 ppm.

Keywords: Air conditioning. Condensate collection. CO₂ levels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Produção de condensado em função da umidade para um dia típico de Agosto em Dhahran.....	22
Figura 2 –	Taxa de extração de condensado versus umidade relativa para diferentes temperaturas de bulbo seco.....	23
Figura 3 –	Esquema do experimento montado por Ibrahim et al. (2017).....	24
Figura 4 –	Sistema de refrigeração por compressão de vapor.....	30
Figura 5 –	Ciclo de refrigeração de Carnot e sua representação em diagrama T-s.....	32
Figura 6 –	Ciclo de refrigeração ideal e sua representação em diagrama T-s.	34
Figura 7 –	Diagrama T-s para um ciclo de refrigeração por compressão de vapor real, as linhas pontilhadas representam os desvios do ciclo teórico.....	35
Figura 8 –	Representação esquemática da Lei de Dalton.....	36
Figura 9 –	Representação esquemática do processo de resfriamento e desumidificação.....	38
Figura 10 –	Taxa de respiração, consumo de oxigênio e produção de CO ₂ em função do metabolismo.....	40
Figura 11 –	Fluxograma da metodologia aplicada.....	42
Figura 12 –	Sala da Avantec.....	43
Figura 13 –	Equipamento utilizados no experimento.....	44
Figura 14 –	Esquema de distribuição dos termopares no interior da sala.....	45
Figura 15 –	Data logger.....	46
Figura 16 –	Calibração dos termopares.....	46
Figura 17 –	Medidor de CO ₂ posicionado no ambiente.....	47
Figura 18 –	Representação gráfica do funcionamento de um compressor inverter e on/off.....	48
Figura 19 –	Temperatura do ar no interior da sala para um set point de 25°C e velocidade máxima do ventilador, como medições a cada 60 s.....	49

Figura 20 –	Umidade relativa no interior da sala para um set point de 25°C e velocidade máxima do ventilador, como medições a cada 60 s.....	49
Figura 21 –	Recipiente calibrado utilizado para coleta de condensado..	50
Figura 22 –	Volume coletado por hora na temperatura de 25°C, velocidade mínima do ar.....	51
Figura 23 –	Volume coletado por hora na temperatura de 23°C, velocidade mínima do ar.....	51
Figura 24 –	Volume coletado por hora na temperatura de 21°C, velocidade mínima do ar.....	52
Figura 25 –	Volume coletado por hora na temperatura de 21°C e velocidade mínima do ar para nova escala.....	53
Figura 26 –	Volume coletado por hora na temperatura de 23°C e velocidade mínima do ar para nova escala.....	53
Figura 27 –	Volume coletado por hora na temperatura de 25°C e velocidade mínima do ar para nova escala.....	54
Figura 28 –	Temperatura do ar no interior da sala, na primeira hora de medição, para um set point de: (a) 21°C e velocidade máxima do ventilador; (b) 23°C e velocidade máxima do ventilador; (c) 25°C e velocidade máxima do ventilador.....	55
Figura 29 –	Umidade relativa do ar no interior da sala, na primeira hora de medição, para um set point de: (a) 21°C e velocidade máxima do ventilador; (b) 23°C e velocidade máxima do ventilador; (c) 25°C e velocidade máxima do ventilador.....	56
Figura 30 –	Anemômetro de fio quente KIMO VT50.....	59
Figura 31 –	Sequência de passos para exemplificar o experimento.....	61
Figura 32 –	Gráfico comparativo entre o tempo de funcionamento do compressor a 25°C e 21°C.....	63
Figura 33 –	Gráfico destacando o tempo de funcionamento do compressor para temperatura de a 23°C.....	64
Figura 34 –	Varição da temperatura no ambiente em comparação ao set point de 23°C.....	66
Figura 35 –	Varição da temperatura no ambiente em comparação ao set point de 21°C.....	67
Figura 36 –	Varição da temperatura no ambiente em comparação ao set point de 25°C.....	67

Figura 37 –	Varição da umidade relativa no ambiente para o set point de 23°C.....	69
Figura 38 –	Varição da umidade relativa no ambiente para o set point de 21°C.....	69
Figura 39 –	Varição da umidade relativa no ambiente para o set point de 25°C.....	70
Figura 40 –	Varição da concentração de CO2 no interior do ambiente para um período de 4h.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Processos de refrigeração, princípios de funcionamento e aplicações típicas.....	31
Tabela 2 –	Características físicas do ambiente.....	43
Tabela 3 –	Combinações entre temperatura e intensidade da velocidade do ventilador utilizadas no experimento.....	58
Tabela 4 –	Vazões de ar calculadas para cada nível de velocidade do aparelho.....	59
Tabela 5 –	Volume coletado por hora para todas as combinações testadas.....	62
Tabela 6 –	Resumo dos valores máximos, mínimos e médios aferidos pelos termopares nos diferentes set points.....	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Apresentação do problema.....	13
1.2	Motivação – Justificativa.....	15
1.3	Objetivos.....	16
1.3.1	Objetivo Geral.....	16
1.3.2	Objetivos específicos.....	17
1.4	Metodologia Empregada.....	17
1.5	Estrutura da Dissertação.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Contribuição científica do trabalho.....	29
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
3.1	Introdução à refrigeração.....	30
3.2	Refrigeração por compressão mecânica de vapor.....	31
3.2.1	Ciclo de refrigeração de Carnot.....	31
3.3	Ciclo de compressão de vapor.....	32
3.4	Psicrometria.....	35
3.4.1	Lei de Dalton.....	35
3.4.2	Umidade absoluta, umidade relativa e temperatura de orvalho.....	37
3.4.3	Resfriamento e desumidificação	38
3.5	Qualidade do ar interior em ambientes climatizados.....	39
3.5.1	CO ₂ e qualidade do ar interior.....	40
4	METODOLOGIA	42
4.1	Caracterização do Local do experimento.....	43
4.2	Parâmetros de medição e instrumentos.....	44
4.2.1	Pré-experimento.....	48
4.3	Metodologia Experimental.....	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
5.1	Volume de Condensado.....	62
5.2	Análise financeira.....	65
5.3	Temperatura e Umidade.....	66
5.4	Níveis de CO₂.....	71
5.5	Considerações Finais dos Resultados.....	72
5.6	Dificuldades encontradas.....	74
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	76
6.1	Conclusões.....	76
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	77
	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICE A – ANÁLISE DE ERROS.....	82
	APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES.....	88

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será realizada uma breve introdução a problemática além de apresentação da motivação, objetivos, metodologia e estrutura da dissertação.

1.1 Apresentação do problema

Devido à importância dos recursos hídricos, seu manejo de forma sustentável é imprescindível para o bem-estar das populações e desenvolvimento dos países. O Brasil possui cerca de 12% da disponibilidade de água doce do planeta, no entanto a distribuição natural deste recurso não é uniforme, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA). A região Norte concentra mais de 60% dos recursos hídricos do país, em contrapartida possui a menor densidade demográfica do território nacional, 4,12 hab/km² conforme IBGE (2010). A irregular distribuição de água associada a fatores climáticos faz do Nordeste o número um na lista de registros de eventos de seca e de cidades em situação de emergência ou calamidade pública devido à falta de água (ANA). No entanto, o ano de 2014 se destacou por uma estiagem severa na região sudeste e, entre 2014 e 2015, uma crise sem precedentes afetou o abastecimento de água na região. Assim, um problema antes visto como exclusividade da região Nordeste, ganhou enfoque nacional e ampliou as discussões sobre reaproveitamento, economia e uso consciente da água.

Essa busca por sustentabilidade, através do reaproveitamento de recursos, conservação de energia, e tecnologias amigas do meio ambiente, já vem sendo o foco de vários estudos em regiões que historicamente sofrem com escassez de água doce, como oeste dos Estados Unidos da América e alguns países asiáticos, principalmente os localizados na península arábica. Muitas tecnologias foram desenvolvidas ao longo do tempo para produção de água consumível como dessalinização, destilação solar, coleta de água das nuvens e coleta do vapor de água atmosférico. No entanto, algumas dessas alternativas chocam com os conceitos de energia limpa e eficiente (Algarni, 2018). Neste contexto, a coleta de água condensada nos sistemas de ar condicionado, que se enquadra na alternativa de coleta do vapor de água atmosférico, foi identificada como potencial fonte de água limpa. O volume de coleta e sua viabilidade dependem principalmente do clima. Regiões quentes e úmidas são mais favoráveis, pois quanto maior a diferença entre a umidade absoluta do ar externo e interno, maior o volume condensado. No entanto, o tipo de instalação e o nível de solicitação dos

equipamentos também são fatores importantes quando se analisa a viabilidade do processo de coleta (Lawrence,2010).

A alternativa de obtenção de água a partir da condensação ocorrida nos evaporadores dos sistemas de ar condicionado, apresenta condições favoráveis em climas quentes e úmidos como os encontrados nas cidades litorâneas do Nordeste, como é o caso de Recife. As altas temperaturas favorecem a instalação de sistemas de condicionamento de ar, para que os ambientes internos alcancem as condições de conforto térmico indicadas por normas brasileiras (NBR-16401) e internacionais (ISO-7730), elevando as condições propícias para coleta, neste caso, devido aos níveis de solicitação dos equipamentos tanto em ambientes industriais e comerciais, como residenciais. Vale também ressaltar que, além do conformo térmico humano, muitas indústrias, a exemplo das farmacêuticas, alimentícias, de equipamentos e os laboratórios, possuem processos onde são necessários controle de temperatura e umidade, e estas condições só são alcançadas através de sistemas de condicionamento de ar.

O reaproveitamento de condensado pode se dar por várias formas, algumas relacionadas diretamente a questões de economia de água e outras a questões energéticas. As aplicações de condensado que visam reduzir o consumo de água vinda da companhia de saneamento são comumente: utilização em descargas de banheiros, irrigação de jardins e água de compensação em torres de resfriamento. Para fins de redução do consumo de energia e aumento da eficiência dos equipamentos, pode ser citado como exemplo: utilização em serpentinas de pré-resfriamento de ar, resfriamento evaporativo e irrigação de telhados verdes. Algumas instalações podem ir além e utilizar o condensado para mais de uma finalidade, associando a redução do consumo de água com eficiência energética.

Vale chamar a atenção, entretanto, para outra prerrogativa indispensável aos projetos de sistemas de ar condicionado, a qualidade do ar. As pessoas dependem de instalações de ar condicionado para gerar condições de conforto em ambientes internos, principalmente em locais quentes e úmidos. Visando maior eficiência das instalações climatizadas artificialmente, ambientes cada vez mais isolados do ambiente externo foram surgindo, todavia, esta estratégia trouxe consigo o enclausuramento de contaminantes em níveis não desejados no interior das edificações. A preocupação com a qualidade do ar interior vai além da poluição atmosférica, se estende

aos os problemas de saúde que advém de condições desfavoráveis de higienização interna e dos equipamentos de ar condicionado, e ao desempenho dos usuários em suas atividades.

No Brasil, após a morte do ministro das Comunicações, Sérgio Motta, em 1998, provocada pela bactéria *Legionella* alojada nos dutos de ar condicionado de seu gabinete, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) criou a portaria nº3523 ainda em 1998, instituindo a obrigatoriedade do Plano de Manutenção, Operação e Controle (PMOC), e em 2000 a RE nº176. Devido a multidisciplinaridade das avaliações referentes a qualidade do ar, a ANVISA revisou a RE nº 176 e lançou a RE nº09 em 2003, vigente até hoje e que regulamenta os Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. A Norma Brasileira 16401 em sua 3 parte (NBR16401-3), especifica os parâmetros básicos e requisitos mínimos para obtenção de qualidade aceitável de ar interior para conforto em ambientes climatizados. No entanto, esta parte da norma só se aplica a sistemas centrais, de qualquer capacidade, e a sistemas com equipamentos unitários cuja capacidade nominal somada seja igual ou superior a 10kw. Sendo assim, ambientes com potencial instalado abaixo de 10kw não são alcançados pela norma, e por isso instalações comerciais e escritórios de pequeno porte por exemplo, tem sua qualidade do ar deixada a margem da NBR. Por este motivo, o controle e análise dos níveis de CO₂ nestes ambientes pode gerar maiores esclarecimentos e incentivar a revisão e atualização da NBR 16401.

1.2 Motivação – Justificativa

A proposta aqui apresentada tem como objeto dar à sociedade uma alternativa para obtenção de água a partir da coleta de condensado gerado por aparelhos de ar condicionado tipo *split* e, por meio da análise da concentração de CO₂, chamar a atenção para a necessidade de atualização da NBR 16401. Pela experiência profissional obtida, pelo próprio pesquisador, ao longo de mais de 5 anos trabalhando no setor de refrigeração, também motiva esta pesquisa, por perceber que, no Brasil, o condensado proveniente do ar condicionado, seja a instalação de pequeno ou grande porte, é simplesmente descartado na maioria dos locais, sejam indústrias, prédios comerciais ou residenciais.

Segundo dados da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (Abrava), no final dos anos 90 no mercado brasileiro de ar condicionado os aparelhos de janela (ACJ) dominavam a preferência dos consumidores, sendo responsáveis por 94% das instalações existentes. Com o passar dos anos os aparelhos tipo *split* alcançaram a supremacia neste quesito e atualmente, cerca de 72% das residências e empreendimentos que utilizam ar condicionado no Brasil utilizam *split*. Em um momento de crescente demanda de energia e água, o projeto de sistemas cada vez mais integrados e com eficiente conservação dos recursos naturais, gerando baixo impacto ao meio ambiente e aos usuários, faz-se necessário.

O tema desenvolvido neste trabalho é relativamente pouco explorado no Brasil, e por isso sua importância na fomentação de pesquisas e projetos futuros, visando um melhor aproveitamento em ambientes industriais, comerciais, educacionais e residenciais, deste recurso tão importante que é a água. Ao final, será possível ampliar o conhecimento sobre os fatores que influem no volume de condensado, e avaliar os níveis de CO₂ em ambientes climatizados sem renovação de ar. A bibliografia consultada amplia a visualização das inúmeras possibilidades para o reaproveitamento do condensado e destaca a relevância das preocupações com a qualidade do ar em ambientes climatizados, reafirmando a importância do trabalho desenvolvido e apresentado nesta dissertação.

1.3 Objetivos

Neste tópico serão revelados os objetivos do trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência dos parâmetros temperatura e umidade relativa no volume de condensado produzido num aparelho de condicionamento de ar por compressão mecânica de vapor do tipo expansão direta. Em conjunto, discutir a qualidade do ar em ambientes climatizados por meio da análise dos níveis de CO₂ aferidos experimentalmente, procurando contribuir para o desenvolvimento de projetos de condicionamento de ar para ambientes internos cada vez mais eficientes, sustentáveis e preocupados com o conforto e desempenho dos ocupantes.

1.3.2 Objetivos específicos

- *Revisão da literatura referente ao reaproveitamento de condensado produzido em sistemas de condicionamento de ar e qualidade do ar em ambientes internos climatizados;*
- *Compreender o funcionamento dos equipamentos de refrigeração por compressão mecânica de vapor do tipo expansão direta, bem como as Normas Brasileiras e internacionais que regem as instalações destes equipamentos;*
- *Levantamento e montagem de uma bancada experimental para medir os principais parâmetros influentes no conforto térmico, como temperatura e umidade relativa, visando o estudo do volume condensado produzido por um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor tipo expansão direta;*
- *Revisar as Normas Brasileiras e internacionais referentes à qualidade do ar no interior dos ambientes, através da análise das taxas de CO₂ no ambiente estudado.*

1.4 Metodologia Empregada

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida considerando uma abordagem experimental. A metodologia proposta foi desenvolvida pelo autor e resultou de uma fase pré-experimental onde foram definidos o volume do recipiente de coleta, sua calibração, os intervalos para medição de temperatura, umidade relativa e níveis CO₂, além dos materiais e instrumentação a serem utilizados. As incertezas no processo de medição foram consideradas em todos os dados coletados de acordo com Apêndice 1.

1.5 Estrutura da Dissertação

O trabalho apresenta-se dividido em 6 capítulos distribuídos de forma a permitir o melhor entendimento do tema abordado.

O Capítulo 1 é o capítulo introdutório que contempla uma breve apresentação do problema, as justificativas e motivações do estudo, como também os objetivos e estrutura da dissertação.

Na sequência o Capítulo 2 situa o trabalho no âmbito das pesquisas e projetos desenvolvidos, relativos a coleta e reaproveitamento de condensado, além dos estudos sobre qualidade do ar no interior de ambientes climatizados.

Para dar maior fluidez durante a leitura e análise da dissertação, o Capítulo 03 traz a fundamentação teórica. São encontrados, de forma resumida, uma introdução à refrigeração e ao sistema de refrigeração e aos sistemas de compressão de vapor, seguida de uma pequena revisão sobre psicrometria e por último, pontos relevantes sobre qualidade do ar interior em ambientes climatizados.

O Capítulo 4 apresenta a análise experimental, discorrendo sobre todo o processo de desenvolvimento da metodologia utilizada, materiais e instrumentos de medição.

Os resultados do experimento realizado são discutidos e analisados no Capítulo 5. Nele são apresentados os volumes de condensado coletados, e gráficos que mostram o comportamento da temperatura, umidade relativa e concentração de CO₂.

O Capítulo 6 se dedica as conclusões finais, perspectivas e sugestões para pesquisas futuras.

Por fim, é exposta a bibliografia utilizada no trabalho e o apêndice 1 que contempla a análise da propagação de erros nos dados experimentais deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para situar o trabalho desta dissertação no âmbito dos estudos e pesquisas desenvolvidas, é apresentado neste capítulo uma revisão das publicações referentes a reaproveitamento de condensado, aspectos sustentáveis e diversos usos para água coletada, além de pesquisas sobre qualidade do ar em ambientes condicionados.

As preocupações e estudos sobre otimização de processos, reaproveitamento de recursos e redução de gastos energéticos abriu caminho para novas diretrizes de pesquisa voltada a sustentabilidade. Guz (2005) apresenta um estudo de caso na cidade de San Antonio no estado americano do Texas. Foi mostrado que devido ao aumento nas taxas de água e esgoto da cidade, alternativas para redução de custos começaram a ser estudadas. A água produzida nos sistemas de ar condicionado, vista até então como resíduo e destinada ao esgoto, ganhou papel de destaque a partir do momento que se percebeu que seu reaproveitamento seria viável e vantajoso. Projetos de captura de água foram iniciados e geraram surpresa no volume de condensado, por exemplo: um shopping da cidade conseguiu coletar 946 L de água por dia e a Livraria Central, 163.500 L por mês. O autor aponta que os resultados obtidos são atribuídos as condições climáticas da região, altas temperaturas e umidades, ou seja, locais tipicamente quentes e úmidos são mais favoráveis à coleta de condensado, mas ressalta que regiões tipicamente frias, mas com verões intensos, podem ser beneficiadas com o reaproveitamento de condensado nesta estação do ano. Guz (2005) também relata o potencial de prédios industriais que trabalham com umidade e temperaturas controladas o ano todo, indústrias farmacêuticas e de tecnologia são grandes candidatos para o reaproveitamento de condensado.

A região do Oriente Médio também apresenta potencial de coleta expressivo e é uma região com grande produção de pesquisas sobre coleta de condensado gerado por sistemas de tratamento e condicionamento de ar. Bryant e Ahmed (2009) investigaram parâmetros sustentáveis relacionados à coleta de condensado numa instituição de ensino em Doha, no Catar. Foram avaliados os meios para aproveitamento de condensado, sistemas de drenagem e armazenamento. Um prédio de dois andares e uma área de 32500 m² abrigando salas de aula, laboratórios e salas de leitura foi escolhido, e das 25 Unidades de Tratamento de Ar (UTA), uma de 18TR foi utilizada na pesquisa. A vazão de ar externo é controlada por dampers e representa aproximadamente 20%

da vazão de ar total, os valores de condensado são calculados por uma balança digital que envia os dados a um *data logger*. Os volumes coletados chegaram a 145 galões/dia, além disso os autores concluem que a água resultante da coleta, após tratamento microbiológico estaria dentro dos padrões de consumo.

Na mesma época, Habeebullah (2009) chamou a atenção para o grave problema de escassez de água no Reino da Arábia Saudita, amplamente dependente dos processos de dessalinização. Por este motivo, foi realizado um estudo sobre o rendimento da água produzida por um evaporador aletado e investigado os parâmetros que afetam o desempenho neste fim. A condição do ar após passagem pela serpentina depende da capacidade de refrigeração da serpentina, temperatura do refrigerante, velocidade do fluxo e em particular da umidade absoluta. Assim, por meio das equações de conservação de calor e massa, e dos conceitos da mecânica dos fluidos, para estimar a interação do ar com a serpentina, o autor desenvolveu um algoritmo para investigar os fatores limitantes na produção de condensado em um processo de desumidificação. As propriedades termodinâmicas são avaliadas por meio do *Engineering Equations Solver* (EES). O trabalho conclui que, em termos de velocidade do ar, a coleta de condensado apresenta os melhores resultados a 1,0 m/s, se comparado com as outras velocidades analisadas: de 2,25 m/s (especificada pelo fabricante da serpentina utilizada como parâmetro para os cálculos), com 4,5 m/s e 0,5 m/s. A pesquisa revela que a 4,5 m/s não ocorre satisfatória troca térmica e o volume de condensado gerado na face da serpentina seria menor, já com a velocidade de 0,5 m/s, a redução na produção de água explica-se pela formação de gelo na serpentina. O valor estimado de geração de água para a velocidade de 1,0 m/s é de 24,8 kg/m².dia, e para 2,25 m/s seria de 17,8 kg/m².dia.

Trazendo um novo olhar para o reaproveitamento de água, Licina e Sekhar (2012) investigam analiticamente o potencial de sustentabilidade energética e hídrica em climas quentes e úmidos a partir da captação de condensado de seis unidades de tratamento de ar (AHUs) com 100% de renovação de ar externo. O reaproveitamento da água segue duas vertentes: pré-resfriamento do ar de entrada da AHU e reposição de água nas torres de resfriamento. Os cálculos consideram as AHUs funcionando 24h durante os sete dias da semana, e as condições de temperatura e umidade relativa consideram dados da cidade de Singapura. Os resultados mostram que as seis

AHUs produzem 0,19 L/s na serpentina de pré-resfriamento e 4,03 L/s na serpentina de resfriamento, além disso, uma redução de 9,3% no consumo de energia e chega a suprir 50% do consumo de água para as torres.

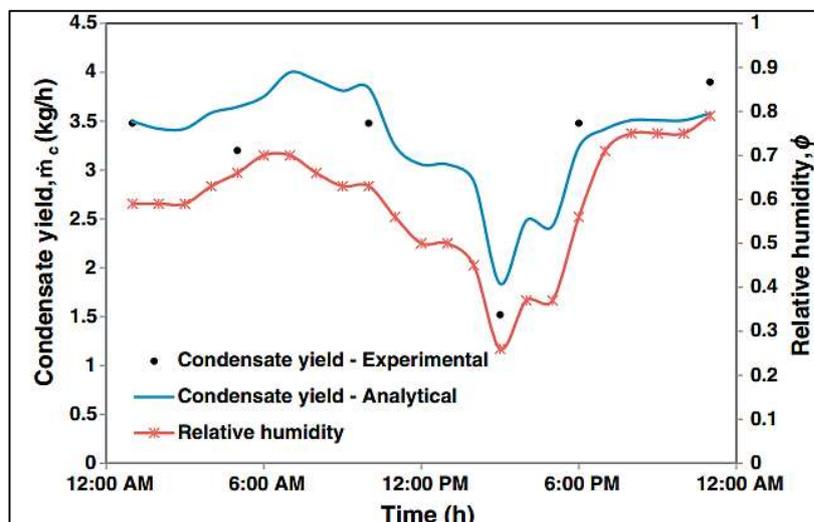
Loveless et al. (2013) analisam o potencial de geração de condensado através do acompanhamento do clima em diversas regiões do planeta, com foco nas que historicamente sofrem com escassez de água. O trabalho analisa não apenas o potencial de coleta, mas o uso da água coletada para consumo humano, podendo ser uma alternativa para a dessalinização que é um processo caro e que favorece a poluição pois depende amplamente de combustíveis fósseis. Para identificar regiões com potencial de coleta de condensado é utilizado um modelo de reanálise climática, o ERA-INT. Com o modelo climático é possível obter os dados de temperatura e umidade, considerando o período de 2000 a 2010. Os dados de umidade fornecidos pelo modelo climático eram tratados por rotina em Matlab desenvolvida pelos autores e que fornecia o potencial de coleta de diversos locais espalhados pelo mundo. O chamado potencial de coleta, é a diferença entre a umidade específica do ar externo e a do ar interno climatizado, pois só é possível coleta de condensado se a umidade específica externa for maior que a interna. Para os cálculos, a rotina considerou que o ambiente condicionado estaria a 22,2°C e 50% de umidade relativa, ou seja, com umidade absoluta de 0,0078kg de água/kg de ar. Foi possível observar que as regiões mais próximas a linha do Equador têm alto potencial de coleta, no entanto é preciso atentar que para regiões onde o índice de chuvas é alto, o impacto da coleta de condensado é baixo, mas em regiões que sofrem com escassez de água seriam beneficiadas.

Chamando a atenção para o potencial de coleta em aparelhos residenciais, geralmente tipo *split* ou janela, a pesquisa de Mahvi et al. (2013) avaliou a quantidade e qualidade da água coletada em aparelhos de ar condicionado residenciais na cidade de Bandar Abbas, Iran. O estudo dividiu o território em quatro áreas por suas características de proximidade com o oceano e densidade demográfica, e considerou que em média, as famílias são compostas por cinco pessoas e nas residências existem de 01 a 02 condicionadores de ar. A média de água extraída por dia foi de 36 L, mas os autores ressaltam que existem diferenças significativas de coleta entre os equipamentos tipo *split* e janela, basicamente explicada pela forma de drenagem e maior eficiência do primeiro. Concluem propondo a utilização do

condensado gerado em irrigação, combate a incêndio, lavagem de carros e em processos industriais. Mesmo com as análises químicas realizadas, de sólidos totais, dureza, alcalinidade e turbidez, o estudo não foca na utilização do condensado para consumo humano.

Al-Farayedhi et al. (2014) destacam o alto potencial de coleta da Arábia Saudita e os benefícios da utilização do condensado uma vez que o país enfrenta escassez de água e utiliza em larga escala o processo de dessalinização, uma tecnologia cara e com alto índice de poluição. Foram realizados estudos analíticos e experimentais sobre coleta de condensado em um equipamento tipo *split*, com capacidade de 1,5TR na cidade de Dhahran, Arábia Saudita. Os cálculos analíticos foram realizados com auxílio do software EES considerando a psicrometria e os modelos de conservação de massa padrões. O aparato experimental além de contar com o aparelho de ar condicionado e reservatório de coleta, possui um aparato experimental para simular as condições climáticas, a câmara de clima. Os resultados experimentais mostram que a coleta é maior no mês de agosto quando a umidade atinge os maiores índices, chegando a coletar um máximo de 99,1 kg de água no vigésimo oitavo dia do mês. Comparando os resultados experimentais com os analíticos foi possível observar uma boa concordância entre valores, a máxima variação observada foi de 11,6%. Os resultados também apontam que tanto analítica como experimentalmente, os maiores valores de condensado ocorrem à noite, período onde umidade é maior, Figura 1.

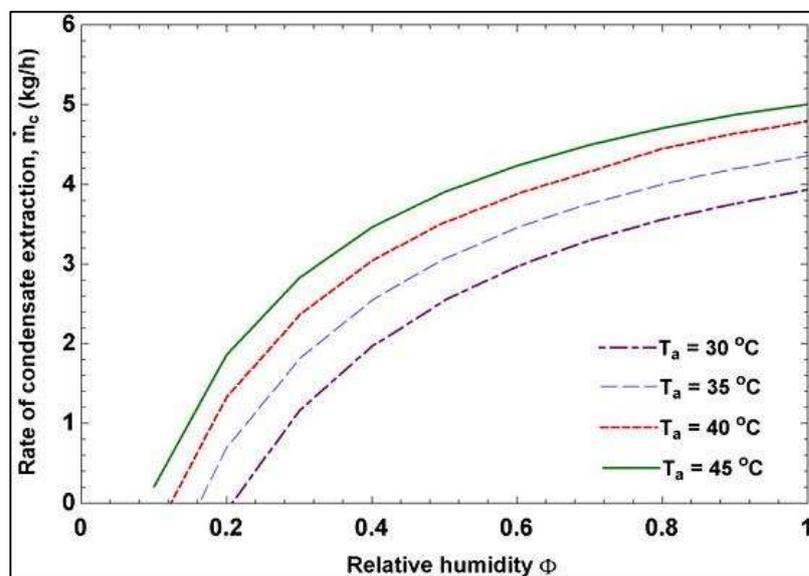
Figura 1 - Produção de condensado em função da umidade para um dia típico de Agosto em Dhahran.



Fonte: Al-Farayedhi et al. (2014).

Também foi possível concluir que quanto maior a temperatura externa, maior a extração de condensado, o condensado aumenta aproximadamente 0,5 kg / h para cada aumento de 5 °C na temperatura, Figura 2. A pesquisa de Al-Farayedhi et al. (2014) contou ainda com a análise química da água coletada. Seus resultados revelam que, tomando como base os máximos valores aceitáveis pela Organização Mundial de Saúde (OMS), a água coletada pode ser consumida após passar por processos de tratamento microbiológico.

Figura 2 -Taxa de extração de condensado versus umidade relativa para diferentes temperaturas de bulbo seco.



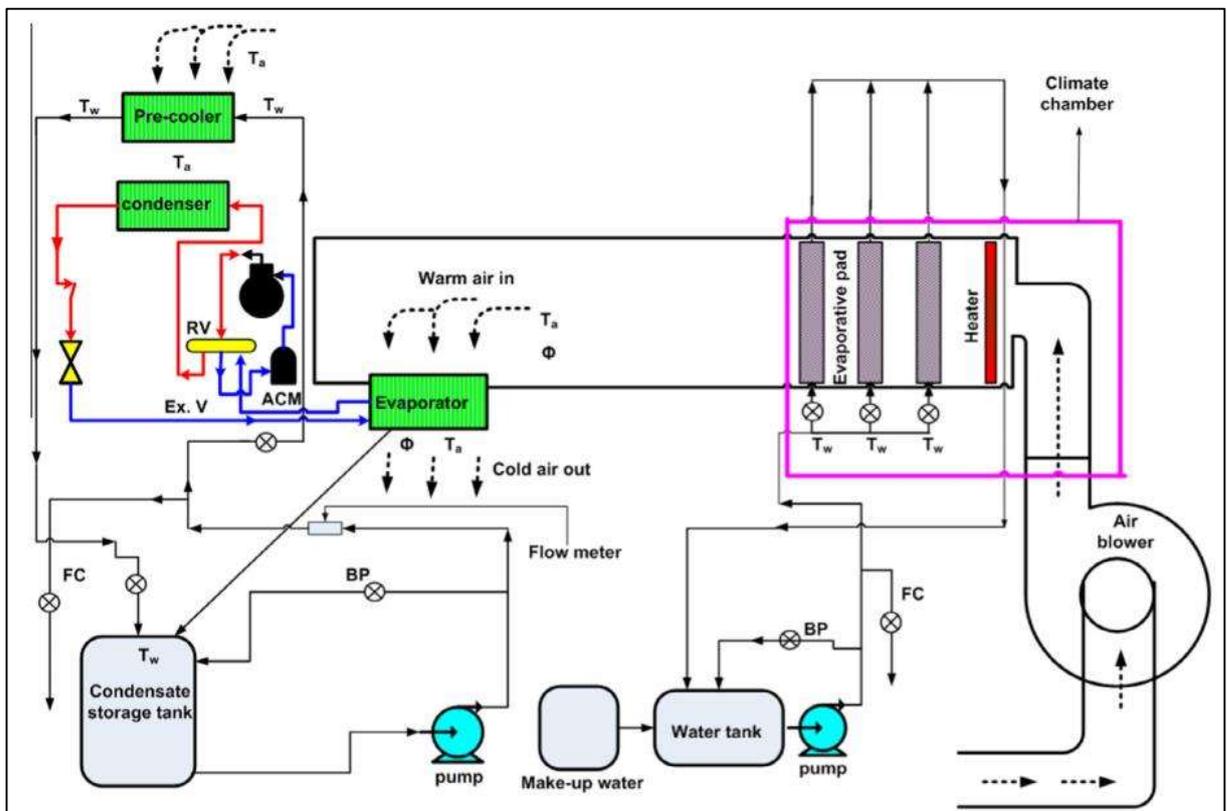
Fonte: Al-Farayedhi et al. (2014).

Magrini et al. (2015a e 2015b) fazem um estudo de caso considerando a capacidade de refrigeração e reaproveitamento de água de um sistema HVAC instalado em um hotel em local de clima árido subtropical, como Abu Dhabi nos Emirados Árabes Unidos. O estudo é feito por comparação de sistemas tradicionais, sem reaproveitamento de água, e sistemas integrados, ou seja, aqueles que são otimizados para produção de água, a fim de destacar as vantagens e capacidades do segundo. O ponto de partida para análise de vantagens e desvantagens é o cálculo do volume de condensado produzido e consumo de energia. Os cálculos consideram 35°C e 60%, para temperatura e umidade relativa externa e 20°C e 60% para interna, além disso o ar de entrada do *fancoil* é composto por 50% de ar de renovação e 50% de ar de recirculação. Os resultados mostraram que o sistema integrado representa 56,4% da demanda diária do hotel idealizado no estudo, somado a isso o custo total da água é

reduzido em 19% e se for considerado um tratamento para deixar a água em condições de potabilidade, ainda assim haveria redução de 7% no custo de água potável.

Ibrahim et al. (2017) apontam em seus estudos que os sistemas de ar condicionado são responsáveis pela maior parte de consumo de energia em prédios e empreendimentos industriais e comerciais, e com o objetivo de melhorar o rendimento de sistemas de condicionamento de ar por compressão de vapor, sugere a utilização da água proveniente da coleta de condensado para pré-resfriamento do ar de entrada do condensador. Sua pesquisa relata que na Arábia Saudita, no verão, 52% da energia total é consumida por sistemas de condicionamento de ar, que em sua maioria são por compressão de vapor e expansão direta, no entanto estes sistemas, sob condições de calor intenso, sofrem com o superaquecimento gerando em consequência degradação do desempenho e aumento do consumo. A utilização de pré-resfriadores para o ar de resfriamento dos condensadores visa ganhos de eficiência e redução de energia.

Figura 3 – Esquema do experimento montado por Ibrahim et al. (2017).



Fonte: Ibrahim et al. (2017).

O pré-resfriamento proposto é a seco, por meio de um trocador de calor de fluxo cruzado. O sistema construído para o experimento, Figura 3, consiste num equipamento de condicionamento de ar por compressão de vapor de 1,5TR, o pré-resfriamento montado antes do condensador e reservatório para coleta de condensado, além da câmara climática que controla o ar de entrada no evaporador. Os resultados do experimento atestam uma baixa de cerca de 4°C na temperatura do ar de entrada no condensador e com isso redução de 6,1% no consumo de energia do compressor, o COP aumentou 21,4% e a eficiência da segunda lei em 20,5%.

Com foco na sustentabilidade por meio não só de coleta, mas também reaproveitamento energético do condensado proveniente de equipamentos de condicionamento e tratamento de ar, Magrini et al. (2017) desenvolveu uma análise de um sistema integrado de captação e recuperação de calor, considerando para o estudo de caso um hotel com configuração simplificada. Aproveitando resultados dos estudos realizados em 2015, os autores procuraram mostrar que os sistemas de condicionamento e tratamento de ar atuais, permitem obter maior eficiência e serem economicamente sustentáveis ao mesmo tempo. O trabalho segue as etapas:

- análise do clima na costa dos Emirados Árabes, a fim de encontrar um clima representativo;
- nova definição dos principais parâmetros físicos do hotel;
- cargas de energia e cálculo de demanda de água;
- configuração preliminar do sistema para o estudo de caso;
- otimização do sistema para produzir o máximo fluxo de água;
- extração calculada de água do ar, que pode ser obtida com o sistema integrado, e a taxa de água precisa coberta.

O sistema integrado proposto é formado por um sistema de recuperação de calor (WPU) e um de tratamento de ar (AHU), sendo o primeiro, focado na coleta de condensado. Os cálculos foram realizados para todos os meses do ano e os resultados mostram maior coleta em setembro quando a produção atinge 10,2 m³/dia. Considerando ainda que o hotel esteja ocupado o ano inteiro, seria possível suprir em

média 24% da demanda de água, vale ressaltar que nos meses de julho a setembro o suprimento de água seria maior que 38%.

O clima é fator determinante, mas não é o único que influencia na coleta de condensado. Eades (2018) resalta a enorme capacidade de reaproveitamento de água em unidades de tratamento de ar (AHU) com 100% de renovação, comuns em laboratórios. O autor examina caminho para reduzir energia consumida por sistemas de HVAC em laboratórios explorando o reaproveitamento de condensado e o potencial de recuperação de energia. São apresentados e explicados os tipos de equipamentos comumente utilizados em laboratórios e as diversas possibilidades de arranjos e, dependendo deste arranjo, as alternativas de recuperação de energia e reaproveitamento de água. Dentre as possibilidades consideradas a mais completa é um sistema com pré-resfriamento do ar antes da entrada na serpentina da AHU, coleta de condensado produzido na serpentina e reaproveitamento da água também para as torres de resfriamento, como água de reposição, e lavadores de gases. Ou seja, a condensado teria seu potencial explorado de forma completa, primeiramente é explorado seu potencial energético no trocador de calor da serpentina de pré-resfriamento e posteriormente o condensado é aproveitado como fonte complementar de água para outros sistemas. O trabalho se apresenta como uma ferramenta de triagem simplificada para determinar a viabilidade de implementação de vários cenários de reaproveitamento de condensado de AHU's.

Tendo em vista a importância da conservação de água e seu alinhamento com conceitos como sustentabilidade, conservação de energia, eficiência energética e rentabilidade, Algarni et al. (2018) fazem uma revisão de artigos publicados sobre coleta e reaproveitamento de condensado. O artigo apresenta um panorama geral e sobre aplicações e desafios da recuperação de condensado, e apresenta a revisão dos trabalhos de forma dividida: estudos teóricos de previsão de condensado, previsões experimentais e por fim, estudos com foco na qualidade da água coletada. As aplicações para o condensado coletado também recebem destaque e são divididas entre aplicações sustentáveis e de recuperação de energia. Vale ressaltar a pontuação sobre problemas e desafios, com enfoque na contaminação da água no contato com serpentina e tubulações de coleta, além dos desafios de estocagem, volume dos reservatórios e proliferação de microrganismos.

O desenvolvimento das sociedades e o número cada vez maior de pessoas nos grandes centros industriais, aumentaram a exigência das construções. Hoje, além de segurança estrutural, conforto e otimização de recursos, a qualidade do ar é fator imprescindível e está diretamente relacionada à saúde e performance dos ocupantes. Os estudos sobre qualidade do ar interior não se limitam apenas a ambientes comerciais e industriais, mas se estende também às residências e ambientes de ensino.

Z.T. Ai et al. (2016) fizeram um estudo experimental em um quarto residencial típico na cidade de Hong Kong, ocupado por duas pessoas, analisando as concentrações internas e externas de CO₂, a temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento ao ar livre. São estudadas pelos autores três tipos de estratégias: (a) ventilação natural noturna com abertura estreita de janela; (b) ventilação mecânica a curto prazo com exaustor e (c) ventilação natural a curto prazo com abertura grande da janela. Foi observado que quando o experimento é realizado com todas as janelas fechadas, ou seja, sem nenhuma fonte de renovação de ar, a concentração interna de CO₂ frequentemente excede 1000ppm durante a noite. Para as aberturas de janela estreita (5 cm) e grande (10 cm), a concentração de CO₂ atinge níveis aceitáveis, mas o ar condicionado demora mais para atingir a temperatura de conforto. Comparando a ventilação mecânica com a natural verificou-se que a primeira leva 41% do tempo da segunda para renovar completamente o ar do ambiente e mantém níveis de CO₂ 4% menores. Por sua menor eficiência a estratégia de renovação natural iria requerer um número maior de trocas de ar por hora para atingir um mesmo alvo de concentração, além disso a ventilação natural é muito instável e de difícil controle. Portanto o trabalho recomenda a ventilação mecânica como estratégia ideal para a renovação de ar em edifícios residenciais com ar condicionado. O estudo aponta também que curtos períodos de funcionamento do exaustor são suficientes para manter os níveis de CO₂ abaixo do limite de 1000 ppm, por exemplo se o ventilador funcionar por 5,8 min a concentração de CO₂ decresce cerca de 59% e é necessário um período de 6h e 22 min para a taxa alcançar os níveis iniciais. Além disso os curtos períodos de renovação não influem de forma considerável na temperatura interna mas prolongam o tempo de funcionamento do compressor e por isso os autores propõem um aprofundamento na influência da renovação e o gasto de energia associado.

Ahmed et al. (2017) apresentam estudo sobre os efeitos da temperatura interna e níveis de CO₂ na performance cognitiva das alunas de uma universidade feminina localizada em Jeddah, na Arábia Saudita. As mulheres, 499 no total, foram testadas em 9 diferentes condições de exposição resultado da combinação entre três temperaturas ambientes (20°C, 23°C e 25°C) e três níveis de CO₂ (600ppm, 1000ppm e 1800ppm). Os participantes dos testes realizavam testes cognitivos e em paralelo avaliavam o conforto térmico do ambiente. Os resultados dos experimentos realizados apontam que exposições aos níveis de CO₂ de 1000 ppm e 1800 ppm deterioram significativamente a precisão no desempenho de todas as tarefas se compararmos com os resultados a um nível de 600ppm. A pesquisa revela que a temperatura que gera melhor performance é de 23°C principalmente se associada ao nível de 600ppm, somado a isto constatou-se que sensações de frio ou calor podem afetar negativamente o desempenho mental, enquanto a sensação de resfriamento pode melhorar o estado mental de alerta.

Asif et al. (2018) investigaram e compararam a qualidade do ar interior e o conforto térmico em salas de aula de quatro edifícios de um instituto educacional semigovernamental na cidade de Islamabad, Paquistão, com diferentes tipos de ventilação e ar condicionado: edifício A, com ventilação natural e sem ar condicionado; edifício B, com ventilação natural e sistema de climatização local tipo *split unit*; edifícios C e D com sistemas centrais de condicionamento de ar e ventilação. Os dados foram monitorados para horas de expediente e fora de expediente. Os resultados relativos aos níveis de CO₂ mostram que o desempenho dos edifícios C e D são melhores, ou seja, os edifícios A e B mostraram níveis mais altos de CO₂ e, portanto, a ventilação natural nestes edifícios não apresenta desempenho suficiente para manter níveis aceitáveis de CO₂ no ambiente interno. Os valores de temperatura e umidade relativa foram mais afetados por fatores externos como: temperatura e umidade externa, e orientação dos edifícios. A temperatura interna dos ambientes controlados ultrapassou os 25,5°C indicados pela ASHRAE em todas as salas em quase todos os horários, em dias de semana e fim de semana, deixando claro a ineficiência do isolamento térmico dos edifícios e de seus projetos de HVAC.

2.1 Contribuição científica do trabalho

O presente trabalho está alinhado com as referências citadas e traz o estudo da coleta de condensado para construções de menor porte, avaliando equipamentos tipo *split* cujo comportamento em termos de produção de condensado não é alvo de muitos estudos. A metodologia desenvolvida e detalhada nesta dissertação, vai auxiliar o desenvolvimento de novas pesquisas e aperfeiçoamentos da própria metodologia. Além disso, a reprodução do comportamento de temperatura e umidade no interior do ambiente climatizado pode servir de referência para desenvolvimento de rotinas e como valores de entrada para simulações numéricas. Os resultados obtidos para o volume de condensado também podem ser utilizados como parâmetro comparativo para estudos analíticos e numéricos, e vão auxiliar em pesquisas sobre a viabilidade financeira do reaproveitamento. Os estudos relativos aos níveis de CO₂ pretendem aguçar o interesse e preocupação com a renovação de ar e contribuir para o desenvolvimento de projetos de climatização mais sustentáveis, eficientes e atentos à qualidade do ar interior.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

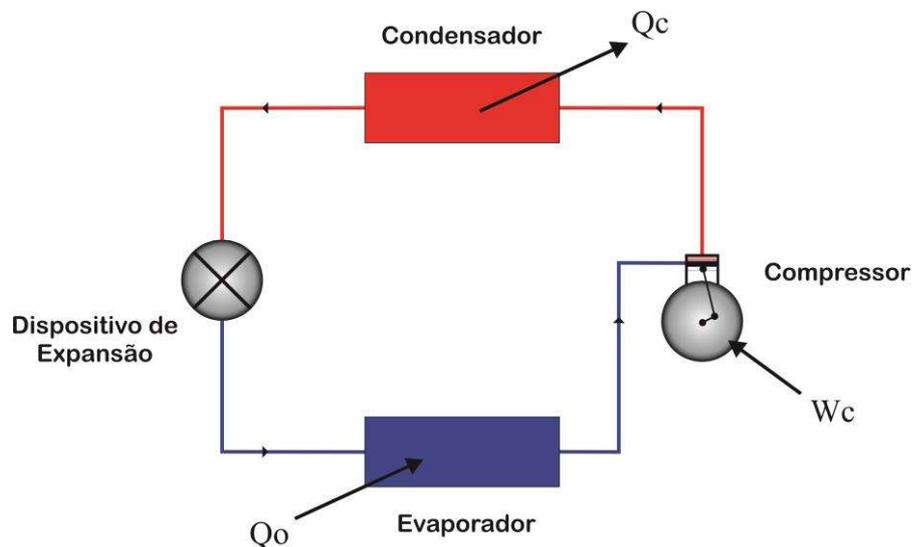
Com o objetivo de facilitar o entendimento sobre a temática abordada, se apresenta neste capítulo uma revisão sucinta sobre assuntos relevantes para compreensão deste texto.

3.1 Introdução à refrigeração

O processo de refrigeração envolve diminuição e manutenção da temperatura de um corpo ou substância abaixo da temperatura de sua vizinhança.

É possível saber que o calor flui de um corpo de temperatura mais elevada para um corpo de temperatura menos elevada. Portanto o sentido do fluxo de calor tem sentido inverso ao gradiente de temperatura. Sendo assim, para transferir calor de um meio a baixa temperatura para um a alta temperatura são necessários dispositivos conhecidos como refrigeradores. Semelhante a máquinas térmicas esses dispositivos são cíclicos e o fluido de trabalho é conhecido como refrigerante. O mais comum ciclo de refrigeração é o chamado ciclo de refrigeração por compressão de vapor. Os principais componentes deste ciclo são: compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador, Figura 4.

Figura 4 - Sistema de refrigeração por compressão de vapor.



Fonte: Autora (2018).

Este é o ciclo utilizado pelo aparelho de ar condicionado utilizado nos experimentos desenvolvidos neste trabalho. No entanto, existem outros tipos de processo de refrigeração como descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Processos de refrigeração, princípios de funcionamento e aplicações típicas.

Processos	Princípio de funcionamento	Aplicações típicas
Compressão mecânica de vapor	Um fluido volátil (refrigerante primário) recebe calor e evapora em baixa pressão e temperatura.	Aparelhos de ar condicionado de janela, refrigeradores domésticos, sistemas comerciais e industriais de grande porte.
Absorção de vapor	O vapor de um fluido volátil, absorvido por outro fluido em baixa pressão e temperatura, é destilado da solução sob alta pressão.	Em pequenos refrigeradores doméstico e em instalações de refrigeração e ar condicionado de grande porte.
Efeito termoelétrico	Uma corrente elétrica atravessa um junção de dois metais diferentes (efeito Peltier) e produz resfriamento	Pequenos instrumentos de medição, como os existentes para medir o ponto de orvalho do ar, equipamentos eletrônicos.
Expansão de ar	O ar em alta pressão, sofre expansão adiabática e realiza trabalho sobre um pistão, tem sua temperatura reduzida.	Resfriamento de aeronaves.
Ejeção de vapor	A passagem de vapor em alta pressão através de um difusor, provoca evaporação da água dentro de um tanque, e reduz sua temperatura.	Sistemas de ar condicionado navios.

Fonte: Corrêa, Jorge E. (2009).

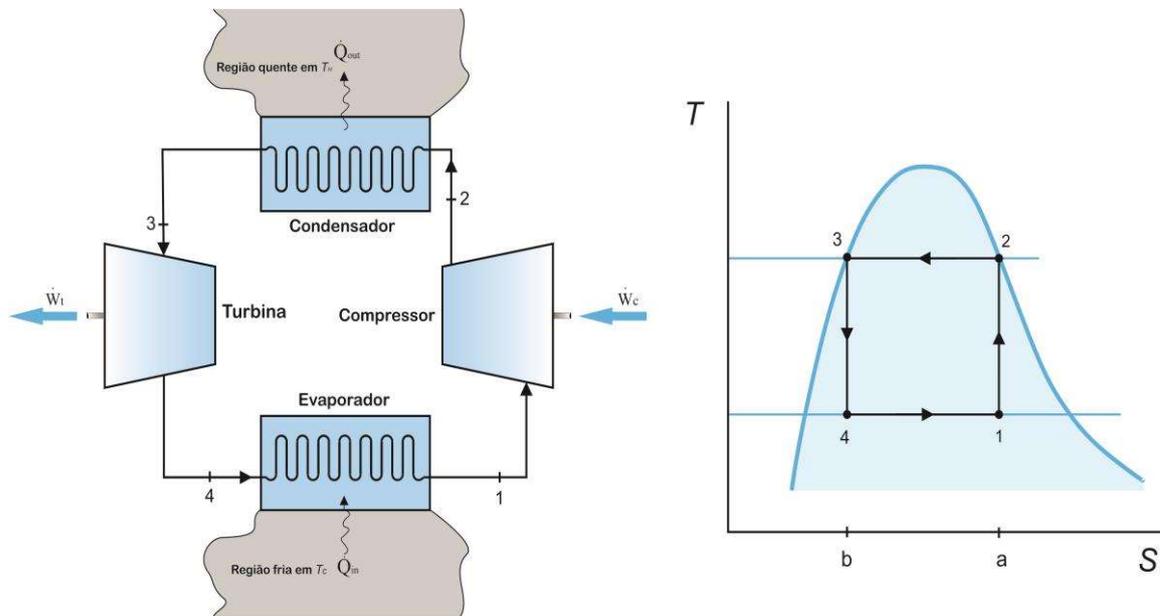
3.2 Refrigeração por compressão mecânica de vapor

Para iniciarmos a compreensão sobre o ciclo de refrigeração por compressão de vapor abordaremos neste tópico o ciclo ideal.

3.2.1 Ciclo de refrigeração de Carnot

Para entender os fenômenos envolvidos num ciclo de refrigeração será apresentado primeiramente o ciclo ideal, ou ciclo de Carnot. O ciclo de refrigeração de Carnot nada mais é que o inverso do ciclo de potência de vapor de Carnot. Neste ciclo todos os processos são reversíveis e não existem irreversibilidades externas, uma vez que a transferência de calor entre o refrigerante e as regiões quente e fria ocorre a temperatura constante, ver diagrama T-s na Figura 5.

Figura 5 - Ciclo de refrigeração de Carnot e sua representação em diagrama T-s.



Fonte: Autora (2018).

Neste ciclo o refrigerante entra no evaporador em forma de mistura líquido-vapor (estado 4), no evaporador ocorre a transferência de calor entre o fluido refrigerante e o meio interno, ou região fria, ocasiona a mudança de uma parcela de líquido (da mistura líquido – vapor) para vapor. Por se tratar de uma mudança de fase em ambiente fechado, o processo do estado 4 para o estado 1 ocorre a temperatura e pressão constantes. Em sequência, a mistura de líquido-vapor é comprimida em processo adiabático e torna-se vapor saturado (estado 2) e sua temperatura aumenta para T_H e a pressão também aumenta. Ao passar pelo condensador o vapor saturado troca calor com meio externo ou região quente e muda de fase, passando a condição de líquido saturado (estado 3) com temperatura e pressão idênticas ao estado 2. Para alcançar a condição de entrada no evaporador e virar uma mistura líquido-vapor o fluido passa por um dispositivo de expansão que permite a queda da temperatura e pressão.

3.3 Ciclo de compressão de vapor

Uma vez entendido o ciclo ideal, será apresentado agora o ciclo de compressão de vapor e os desvios com relação ao ciclo de Carnot.

Em primeiro lugar as transferências de calor não são reversíveis nos processos de 4-1 e 2-3. Assim, para conseguir uma transferência de calor satisfatória e ao

mesmo tempo balancear isto com a dimensão do evaporador, para que possua tamanho dentro da realidade, a temperatura da mistura, T'_c , deve estar alguns graus abaixo da temperatura do ambiente interno, T_c . De modo análogo, a temperatura T'_h do condensador deve ser superior a temperatura do ambiente externo, T_h .

Não é o foco desta dissertação mas vale a pena ressaltar neste ponto que as alterações das temperaturas no condensador e evaporador reduzem o coeficiente de desempenho do ciclo. As equações 1 e 2 mostram o coeficiente para o ciclo de Carnot e para o ciclo teórico respectivamente.

$$\beta_{m\acute{a}x} = \frac{T_c}{T_H - T_c} \quad (1)$$

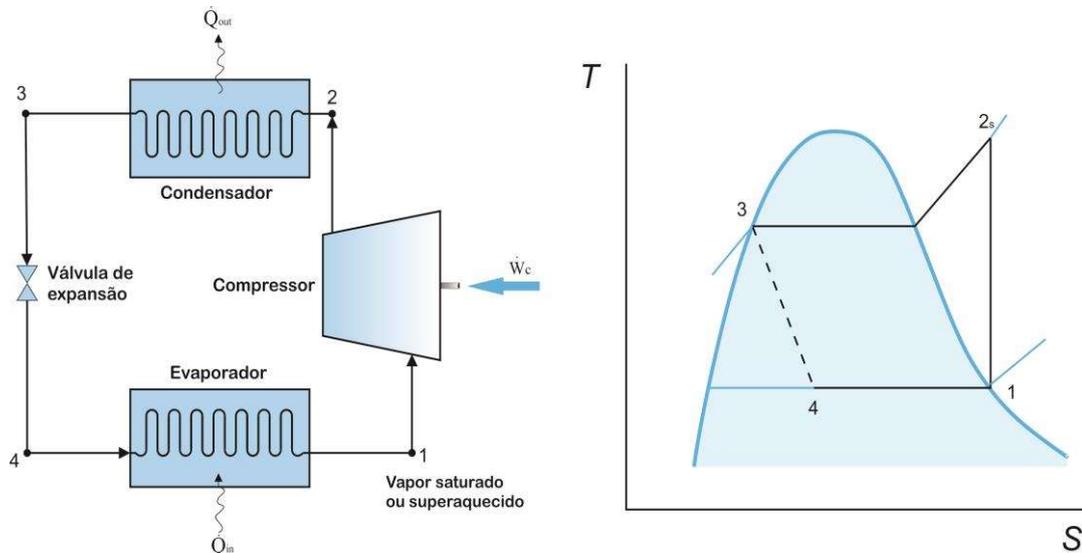
$$\beta_{m\acute{a}x} = \frac{T'_c}{T'_H - T'_c} \quad (2)$$

Outra limitação com relação ao ciclo ideal é o processo de compressão. No ciclo ideal uma mistura líquido-vapor é comprimida, mas em termos práticos evita-se a inserção de líquido em compressores pelos danos causados ao equipamento. Por este motivo, antes de entrar no compressor o fluido deve estar no mínimo na condição de vapor saturador, sendo mais usual considerar a condição de vapor superaquecido para o estado 1.

O terceiro ponto que distancia o ciclo de compressão de vapor do ciclo de refrigeração de Carnot é o processo de expansão. No ciclo ideal esse processo é realizado por uma turbina, mas a insignificância do trabalho gerado pela turbina frente ao trabalho consumido pelo compressor inviabiliza o investimento e costuma-se realizar a expansão por meio de uma válvula de expansão. Neste ponto se reduz o custo inicial e de manutenção, além de otimizar o espaço necessário para o equipamento. O processo de 3 para 4 deixa de ser isentrópico e passa a ser um processo irreversível.

O ciclo apresentado na Figura 6, é conhecido como ciclo de refrigeração por compressão de vapor.

Figura 6 - Ciclo de refrigeração ideal e sua representação em diagrama T-s.

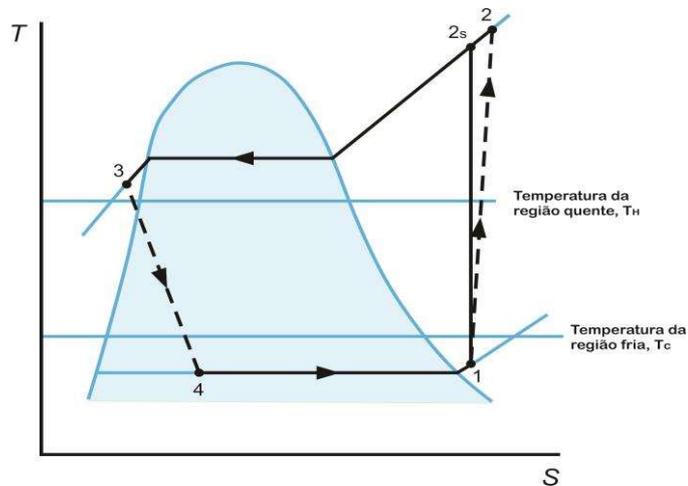


Fonte: Autora (2018).

O ciclo apresentado ainda é um ciclo teórico. Em equipamentos reais temos que considerar a perda de carga nas linhas e também no evaporador e condensador. Além disso, para garantir a liquefação do refrigerante, é comum que após a passagem pelo condensador o refrigerante saia na condição de líquido sub-resfriado, e antes da entrada no compressor o refrigerante alcance a condição de vapor superaquecido para evitar a entrada de líquido no compressor, Figura 7.

Vale ressaltar também que o processo de compressão não é isentrópico, $s_1 \neq s_2$, e isto somado ao superaquecimento gera altas temperaturas na descarga do compressor. Geralmente os projetos de equipamentos de condicionamento de ar trabalham com temperaturas de saída do compressor inferiores a 130°C para evitar a deterioração dos óleos lubrificantes dos compressores. As diferenças podem ser ainda maiores dependendo do sistema adotado e sua aplicação. As linhas pontilhadas mostram os desvios em relação ao ciclo teórico durante a passagem pelo compressor e dispositivo de expansão. O processo de 1 para $2s$ seria isentrópico, mas o real é o que ocorre de 1 para 2.

Figura 7 - Diagrama T-s para um ciclo de refrigeração por compressão de vapor real, as linhas pontilhadas representam os desvios do ciclo teórico.



Fonte: Autora (2018).

3.4 Psicrometria

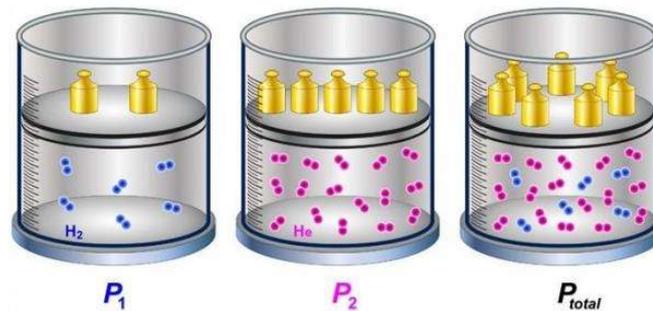
Para compreender e quantificar o volume de condensado gerado, é preciso entender alguns conceitos da psicrometria, que é o estudo das misturas de ar e vapor de água, ou seja, está relacionado com a medida ou determinação das condições do ar atmosférico e, de certa forma, intimamente preocupada com as propriedades termodinâmicas do ar úmido, necessidades ambientais, humanas e tecnológicas. Para facilitar a compreensão alguns conceitos e definições são necessários:

- Ar: o ar atmosférico nada mais é que uma mistura de gases associados a vapor d'água e impurezas (fumaças, poeira e poluentes);
- Ar seco: é o ar quando removido todo vapor d'água e impurezas;
- Ar úmido: mistura de ar seco e vapor d'água;
- Ar saturado: mistura de ar seco e vapor d'água saturado.

3.4.1 Lei de Dalton

O modelo de Dalton para mistura de gases considera que cada componente se comporta como gás ideal e como se estivesse sozinho a temperatura, T , e volume, V , da mistura. Cada componente então aplicaria uma pressão própria, também chamada de pressão parcial, e a soma dessas pressões compões a pressão total, Figura 8.

Figura 8 - Representação esquemática da Lei de Dalton.



Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/pressao-parcial-dos-gases.htm>

As pressões parciais podem ser determinadas pela lei fundamental dos gases, que na base molar é dada pela Eq. 3.

$$P_i = \frac{n_i \cdot \bar{R} \cdot T}{V} \quad (3)$$

Onde:

P_i = pressão parcial do componente i da mistura;

n_i = número de mols do componente i da mistura;

\bar{R} = Constante dos gases ideais para 1 mol na CNTP.

Seguindo o mesmo princípio a pressão total da mistura, P , é descrita por meio da Eq.4.

$$P = \frac{n \cdot \bar{R} \cdot T}{V} \quad (4)$$

Onde:

n = número de mols da mistura;

Como o termo $(\frac{\bar{R} \cdot T}{V})$ é comum nas duas equações, se isolarmos seu valor em uma e inserimos na outra encontraremos P_i em função de P , Eq. 5.

$$P_i = \frac{n_i}{n} \cdot P \quad (5)$$

A razão $\frac{n_i}{n}$ é conhecida como fração molar do elemento i , e é representada por y_i .

3.4.2 Umidade absoluta, umidade relativa e temperatura de orvalho

O ar úmido pode ser resultado de 'y' variações entre massa de ar seco e vapor d'água. Uma forma de identificar esta mistura é através da razão entre a massa de vapor d'água, m_v , e massa de ar seco, m_{ar} , Eq.6.

$$\omega = \frac{m_v}{m_{ar}} \quad (6)$$

O valor, ω , encontrado por meio da Eq.6 é conhecido como umidade específica ou absoluta. Através de algumas manipulações matemáticas utilizando a lei geral dos gases, para uma mistura de ar e vapor d'água, chegamos a Eq.7.

$$\omega = 0,622 \frac{P_v}{P_{ar}} \quad (7)$$

Onde:

P_v = pressão do vapor d'água;

P_{ar} = pressão do ar seco;

O ar úmido também pode ser caracterizado por meio da umidade relativa, F , que é a razão entre as frações molares de vapor d'água em uma amostra de ar úmido e a fração molar de ar úmido saturado à mesma temperatura e pressão da amostra, Eq.8.

$$\Phi = \left(\frac{y_v}{y_{v,sat}} \right)_{T,P} \quad (8)$$

Se utilizarmos a Eq.8 considerando a fração molar em função das pressões parcial e total, encontraremos a expressão da umidade relativa em função das pressões parciais de vapor e vapor saturado, Eq.9.

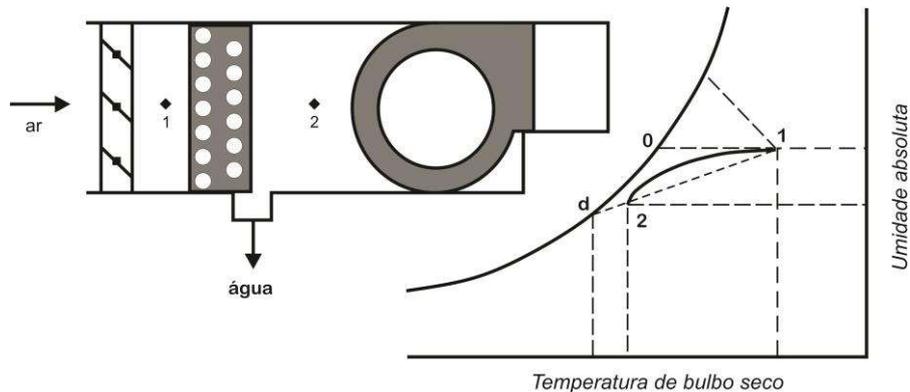
$$\Phi = \left(\frac{P_v}{P_{v,sat}} \right)_{T,P} \quad (9)$$

Outra definição importante no entendimento do processo de condensação é a temperatura de orvalho, T_o . Ela é a temperatura na qual o vapor d'água condensa, quando resfriado a pressão e umidade relativa constante.

3.4.3 Resfriamento e desumidificação

De forma simples se pode considerar que o processo ocorrido num aparelho de ar condicionado nada mais é que um resfriamento seguido por desumidificação. Neste processo a temperatura de bulbo seco e umidade absoluta reduzem, Figura 9.

Figura 9 - Representação esquemática do processo de resfriamento e desumidificação.



Fonte: Autora (2018).

A condensação da água existente no ar só ocorre se o ar for resfriado a uma temperatura inferior à sua temperatura de orvalho. No entanto, em um processo real, a interação entre o ar e a serpentina não é completa pois nem toda massa de ar entra em contato com a serpentina. Ou seja, nem toda massa de ar que entra no equipamento atinge a temperatura de orvalho e, portanto, nem todo vapor d'água presente no volume de ar de entrada é removido por meio de condensação.

Em teoria, o volume de água produzido é dado pela Eq.10, mas para obter valores mais próximos da realidade utiliza-se o fator de *by-pass* da serpentina. Ou seja, considera-se que somente uma parcela de ar entra em contato direto e uniforme com a superfície de resfriamento, a outra parcela não sofre resfriamento e é chamada de ar de *by-pass*.

$$\dot{m}_{\text{água}} = \dot{m}_{\text{ar}} \cdot (\omega_1 - \omega_2) \quad (10)$$

O fator de *by-pass* depende das características da serpentina e das condições de operação. A diminuição da superfície de contato, ou seja, redução da serpentina, produz aumento no fator de *by-pass*. Já a diminuição da velocidade do ar aumenta o tempo de contato entre o ar e a superfície da serpentina, reduzindo consequentemente o fator de *by-pass*.

3.5 Qualidade do ar interior em ambientes climatizados

Ar interior é o ar contido em ambiente fechado ocupado (ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2007). Segundo a Norma Brasileira 16401-3, um ar interior de qualidade aceitável é aquele que não contém poluentes em concentração prejudicial à saúde ou ao bem-estar e é percebido como satisfatório por 80% ou mais dos ocupantes.

Alguns parâmetros influenciam na qualidade do ar interior, podendo afetar diretamente a saúde, o conforto e a produtividade dos seres humanos que ocupam o ambiente interno:

- Biológicos, como fungos e bactérias;
- Físicos, como temperatura, umidade e velocidade do ar;
- Químicos, como concentração de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e aerodispersóides.

Ambientes climatizados, por questões de economia energética devem possuir boa vedação. No entanto, a falta de renovação de ar gera acúmulo de contaminantes e pode acarretar nos ocupantes de um determinado ambiente problemas de saúde como irritações nas mucosas, efeitos neurotóxicos, alergias respiratórias e cutâneas e até alteração nos sentidos. Assim os sistemas de condicionamento de ar em ambientes comumente fechados, precisam inserir no recinto uma parcela de ar exterior para garantir a renovação do ar.

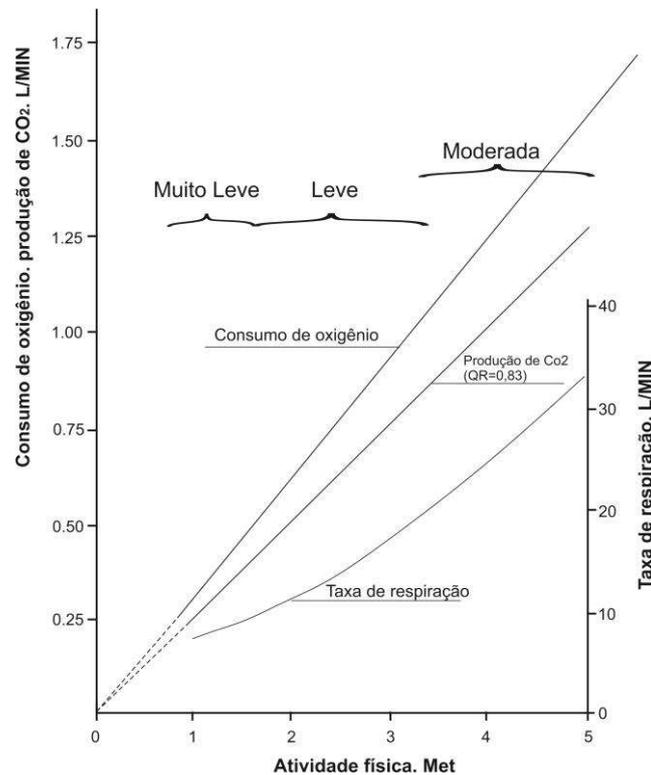
Contudo, apenas renovação não garante a qualidade do ar. Segundo a Recomendação Normativa ABRAVA (RENABRAVA II), os contaminantes dos ambientes climatizados podem ser trazidos pelo ar exterior, originados no próprio recinto e no próprio sistema de condicionamento de ar. Provenientes do ar exterior, poeira, fuligem, esporos de fungos, vapores e gases podem adentrar ao ambiente climatizado se este não possuir sistema de filtragem adequada. Muitas vezes porém, a poluição é causada por agentes internos, o CO₂ produto da respiração, poeira, fibras naturais, ozônio produzido por impressoras e copiadoras a laser e produtos de limpeza, são exemplos. Bandejas de coleta de condensado podem acumular água e caracterizar ambiente favorável a proliferação de fungos e bactérias, as paredes dos equipamentos também

podem ter acúmulo de poeira e poluir o ambiente, por isso a importância de um plano de manutenção operação e controle (PMOC).

3.5.1 CO₂ e qualidade do ar interior

Para sustentar o metabolismo do corpo, o organismo consome oxigênio e produz dióxido de carbono e água em forma de vapor que são liberados por meio da respiração. A relação entre o O₂ consumido e o CO₂ produzido é conhecido como coeficiente respiratório (QR), para uma dieta normal e equilibrada este coeficiente é aproximadamente, 0,83, mas pode variar de acordo com a atividade física, conforme mostra o gráfico da Figura 10.

Figura 10 - Taxa de respiração, consumo de oxigênio e produção de CO₂ em função do metabolismo.



Fonte: NBR 16.401 – Instalações de ar condicionado – Sistemas Centrais e Unitários – Parte 3: Qualidade do ar interior (2008).

De acordo com o Anexo C da NBR-16.401-3, estudos em laboratório indicam que num recinto ocupado por pessoas sedentárias ou em atividade leve, a taxa de renovação de ar de 27 m³/h (7,5 L/s) é suficiente para que mais de 80% das pessoas que adentrem no recinto se sintam confortáveis. Por meio dos cálculos demonstrados

na norma, considerando a situação citada anteriormente, a diferença entre a concentração de CO₂ entre ar exterior e interior é 700 ppm. Sendo a concentração de CO₂ no ar externo variável entre 400 e 600 ppm, a concentração interna deve variar entre 1100 e 1300 ppm para que se mantenha a diferença de 700 ppm.

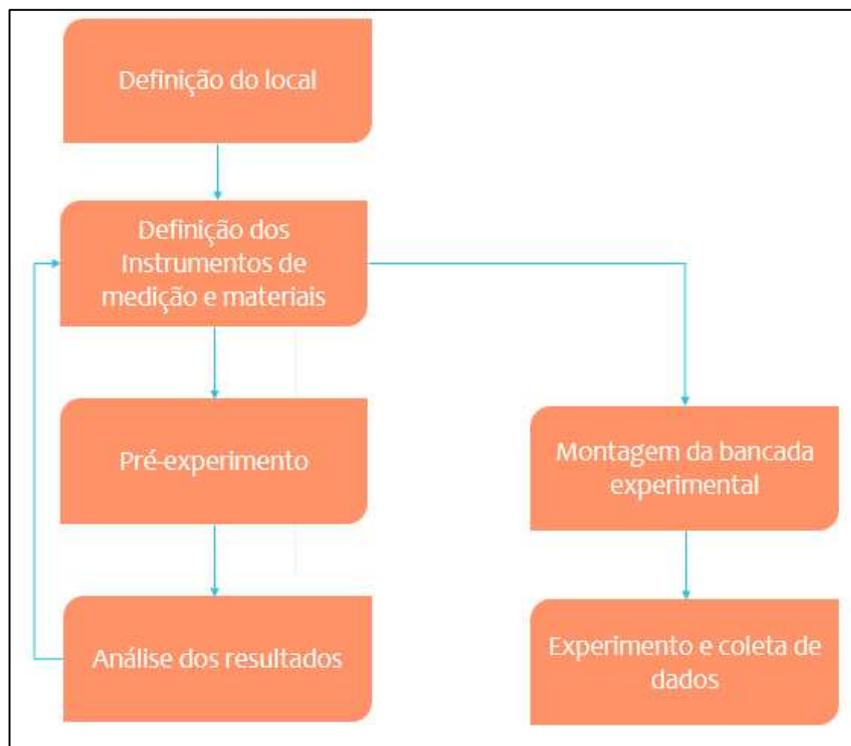
Pode-se observar que o CO₂ está diretamente relacionado com a taxa de renovação de ar e por isso é utilizado como indicador para atentar uma renovação de ar eficiente. A Resolução - RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003 da ANVISA recomenda que a taxa de CO₂ num ambiente interno, deve estar abaixo dos 1000 ppm. A NBR 16401-3, no entanto, alerta para interpretações distorcidas pois o valor de 1000 ppm na concentração interna indica uma concentração externa de 300 ppm para que a diferença entre elas seja 700ppm, de acordo com as explicações fornecidas no parágrafo anterior. Todavia, o valor da concentração de CO₂ no ar exterior normalmente oscila entre 400 e 600ppm, ou seja, uma medição acima de 1000 ppm não indica necessariamente que o descumprimento do critério, desde que a medição não ultrapasse em mais de 700 ppm a concentração do ar exterior.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se a metodologia para análise do volume de condensado produzido por um sistema de condicionamento de ar tipo expansão direta, *split*, e a influência de parâmetros como temperatura e vazão de ar insuflado. De forma a complementar o estudo realizado, também é analisada a variação da concentração de CO₂ no ambiente em estudo, uma vez que se trata de um ambiente climatizado por equipamento com capacidade inferior a 10kw e que, segundo a NBR 16401-3, não precisaria de renovação de ar.

Tendo em vista a escassez de metodologias voltadas a este tipo de análise, também é relatado neste capítulo todo processo pré-experimental que auxiliou a estruturação da metodologia final aplicada. O fluxograma da Figura 11, apresenta um resumo de toda metodologia. Primeiramente foi definido o local do experimento e em seguida os instrumentos de medição, neste ponto se inicia a fase pré-experimental. As análises dos resultados obtidos no pré-experimento apontaram a necessidade de um refino na instrumentação utilizada. Após isso se iniciou a montagem da bancada experimental e, por fim, foram realizados os experimentos e a coleta definitiva de dados.

Figura 11- Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: Autora (2018).

4.1 Caracterização do Local do experimento

O experimento foi realizado nas instalações da Avantec - Tecnologia do Brasil Ltda., empresa encubada no Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP), localizado em Recife/PE. O ambiente estudado pode ser visualizado na Figura 12, e suas características encontram-se relacionadas na Tabela 2.

Figura 12 - Sala da Avantec.



Fonte: Autora (2018).

Tabela 2 - Características físicas do ambiente.

Altura (m)	Área (m²)	Volume (m³)
2,71	32,83	88,97

O condicionamento de ar da sala é feito por meio de um *Split hi-wall*, 6,45 KW (22.000 Btu/h), Figura 13, fabricado pela Consul, modelo CBY22BBNA, sendo o fluido refrigerante utilizado pelo sistema o R-22 (Monoclorofluormetano). O aparelho possui 4 programações de velocidade para o ar insuflado: automática, alta, média e baixa; e a temperatura mínima de resfriamento é 18°C. Possui também, além da função de resfriamento, as funções de desumidificação e ventilação.

Figura 13 - Equipamento utilizados no experimento.



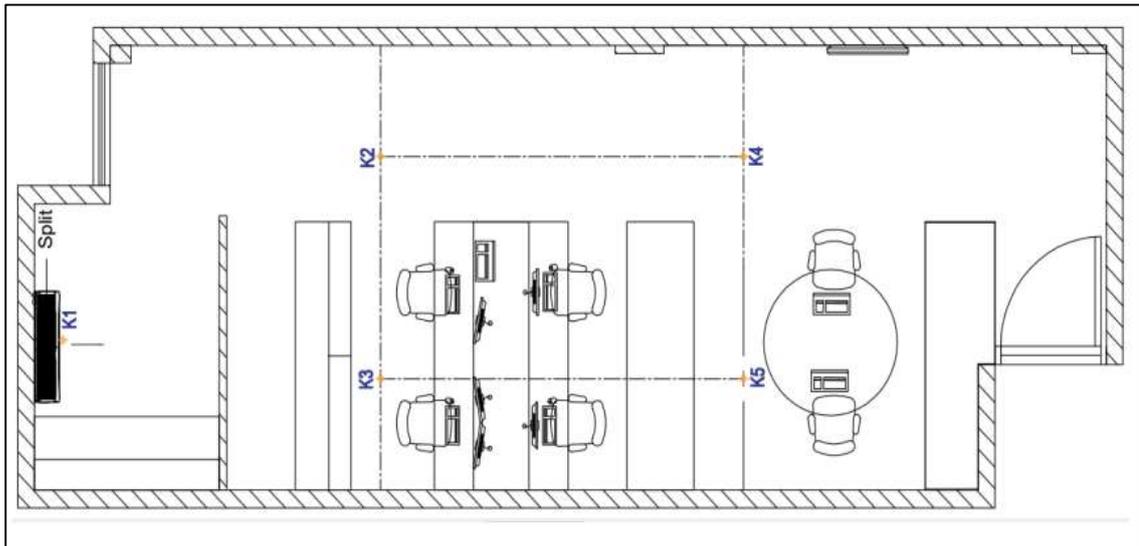
Fonte: Autora (2018).

4.2 Parâmetros de medição e instrumentos

Tendo em vista o aparelho de refrigeração em estudo, foram definidos os parâmetros que seriam mais relevantes para serem avaliados ao longo do trabalho experimental, tais como: velocidade de ventilação e *set point* de temperatura. A velocidade de ventilação foi variada segundo configuração do equipamento, isto é: alta, média e baixa, sendo descartada a opção de velocidade automática por apresentar variações de velocidade no decorrer do funcionamento do aparelho, sendo, portanto, de difícil controle. Quanto ao *set point* de temperatura, foram escolhidos os seguintes valores: 21°C, 23°C e 25°C, estes definidos com base nas faixas de conforto térmico, tanto para verão quanto para inverno, indicadas na ISO 7730 e NBR 16401.

As temperaturas no interior da sala foram aferidas por meio de termopares do tipo K (Níquel - Cromo (+) / Níquel-Alumínio (-)), com faixa de temperatura de 0 a 1260°C (www.ecil.com.br/upload/produto/pdf/termopares.pdf). Para uma varredura mais precisa da temperatura no interior da sala as medições foram realizadas em cinco pontos distintos, sendo quatro distribuídos pelo ambiente e 1 na saída de ar do evaporador, conforme Figura 14.

Figura 14 - Esquema de distribuição dos termopares no interior da sala.



Fonte: Autora (2018).

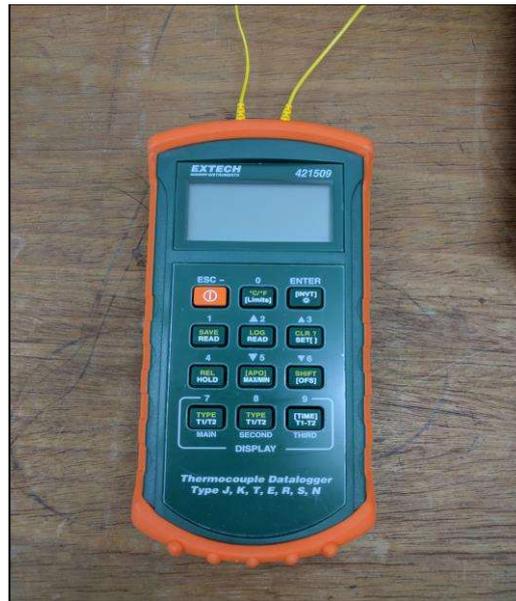
As alturas dos termopares foram definidas de acordo com recomendações para medição de temperatura, considerando conforto térmico, presentes na Resolução nº 09, de 16 de janeiro de 2003, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e NBR 16401. As recomendações aplicadas seguem o seguinte enunciado:

- A primeira recomenda que as medições de temperatura devam ocorrer a 1,5m do piso, no centro do ambiente ou em zona ocupada;
- A segunda diz que para trabalhos majoritariamente realizados por pessoas sentadas, a altura de medição deve ser 1,1m do piso, no centro da zona ocupada e em locais onde os valores mais desfavoráveis dos parâmetros são susceptíveis a ocorrer, como próximo as saídas de ar, janelas e portas.

Desta forma, decidiu-se utilizar as duas recomendações na escolha do posicionamento dos termopares e adaptá-las ao ambiente em estudo. Assim, foi estabelecido que os termopares T2 e T5 estariam a 1,1m do piso e T3 e T4 a 1,5m.

A leitura e armazenamento dos dados foi realizada por 03 *Dataloggers Extech 421509*, cada um com entrada para 02 termopares, segundo Figura 15.

Figura 15 - Data logger.



Fonte: Autora (2018).

Os pares Termopar/Datalogger foram calibrados no Laboratório de Sistemas Térmicos (LABTERMO) da Universidade Federal de Pernambuco utilizando como padrão o Forno ECIL BAT (www.ecil.com.br/upload/produto/pdf/1300292534.pdf), Figura 16.

Figura 16 - Calibração dos termopares.



(Fonte: Autor)

Para controle das condições internas, também se fez necessário medir a umidade relativa do ambiente. Esta grandeza, assim como as concentrações de CO₂, foram medidas por meio de um medidor portátil de CO₂, Instrutemp ITMCO2 – 600, modelo 775977, que mede além de níveis de CO₂ e CO, temperatura do ar, ponto de orvalho, temperatura de bulbo seco e umidade relativa. A precisão do instrumento,

para umidade relativa, é de $\pm 3\%$ (a 25°C e 10 a 90% UR) e $\pm 5\%$ para as demais condições, e para a medição da concentração de CO_2 é de $\pm 30 \text{ ppm} \pm 5\%$ da leitura (0-5000 ppm). Seguindo indicações da Resolução nº 09, da ANVISA e NBR-16401, o medidor foi posicionado, por meio de um suporte, a 1,5 m do piso e na região central do ambiente, Figura 17.

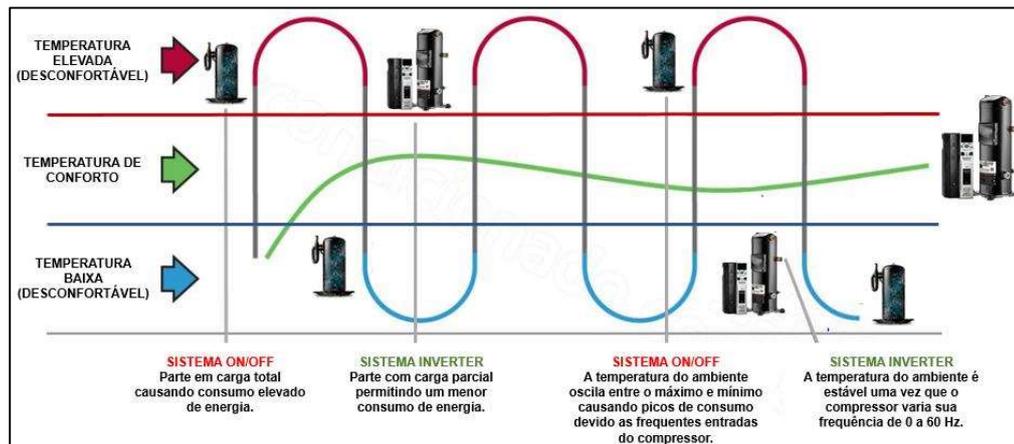
Figura 17 - Medidor de CO_2 posicionado no ambiente.



Fonte: Autora (2018).

Para a realização das medições, ainda foi necessário definir os intervalos de medição de cada grandeza, para que o ambiente fosse caracterizado da forma mais próxima à realidade. A preocupação com os intervalos de medição se devia, acima de tudo, ao fato do aparelho *split* em estudo não possuir compressor inverter. Nos sistemas *split* convencionais, os compressores trabalham em regime *on/off*, ou seja, o compressor é controlado pelo termostato que está situado no retorno de ar: quando a temperatura do ar no ambiente climatizado está acima da temperatura de *set point*, o compressor é ligado; no entanto, quando a temperatura do ar de retorno do ambiente climatizado está abaixo da temperatura de *set point*, o compressor desliga e o aparelho entra em regime de ventilação, já que o fluido refrigerante não mais circula. O ciclo se repete cada vez que a temperatura do ambiente climatizado ultrapassa a temperatura de *set point*, ver Figura 18. Temos então um regime intermitente, e por este motivo, para definir os intervalos de medição de temperatura e umidade, considerando a escassez de metodologia disponível na literatura, foi necessária a realização de experimentos preliminares.

Figura 18 – Representação gráfica do funcionamento de um compressor inverter e on/off.



Fonte: www.webarcondicionado.com.br/ar-condicionado-inverter-para-ambientes-coletivos-e-vantajoso.

4.2.1 Pré-experimento

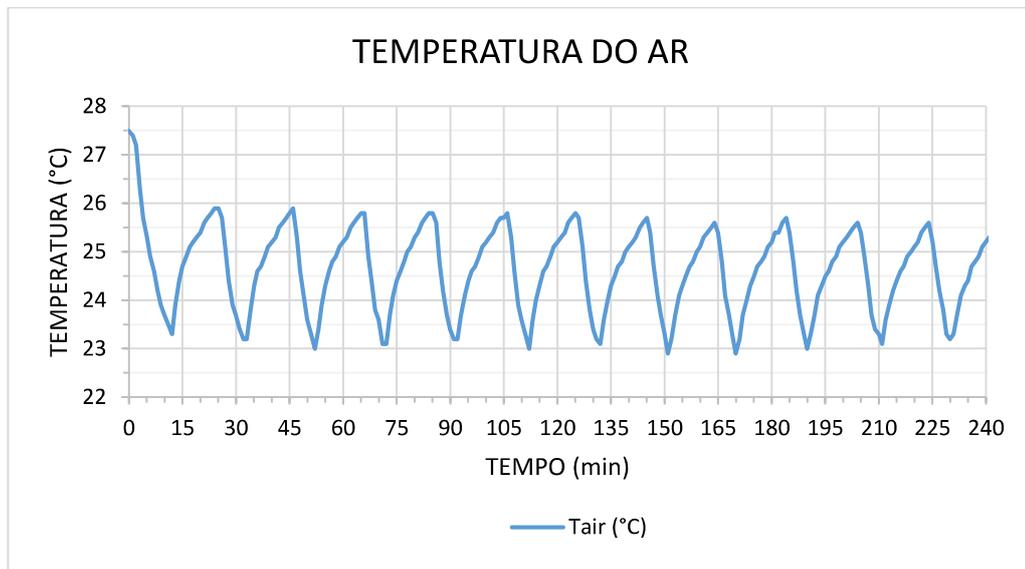
A função principal da fase pré- experimental foi ter um primeiro contato com os elementos do experimento e com isso definir aspectos como:

- *Intervalos de medição das grandezas em estudo, balanceando a qualidade da representação do comportamento das grandezas em estudo e a capacidade de armazenagem dos equipamentos de medição disponíveis para o experimento;*
- *Volume do reservatório para coleta de água e calibração adequada;*
- *Validar os equipamentos de medição disponíveis;*
- *Compreender o comportamento das grandezas avaliadas para otimizar a metodologia experimental a ser desenvolvida.*

Para definição do intervalo de medição de temperatura e umidade relativa foram realizadas medições na temperatura de 25°C e velocidade máxima do ventilador, pois entende-se que seria a situação mais crítica já que a variação de temperatura ocorre de forma mais rápida, ou seja, os intervalos de funcionamento do compressor possuem menor intervalo. As grandezas foram aferidas por 4h com intervalo de 15 s entre medições, com o termopar K5. Com os valores obtidos foi possível obter gráficos considerando intervalos maiores, múltiplos de 15 s, como 30 s, 60 s, 120 s e 300 s. Da mesma forma foram aferidos os valores da umidade relativa. Foi possível observar claramente a influência dos períodos de funcionamento do compressor tanto na temperatura quanto na umidade relativa, independente do intervalo adotado. No entanto,

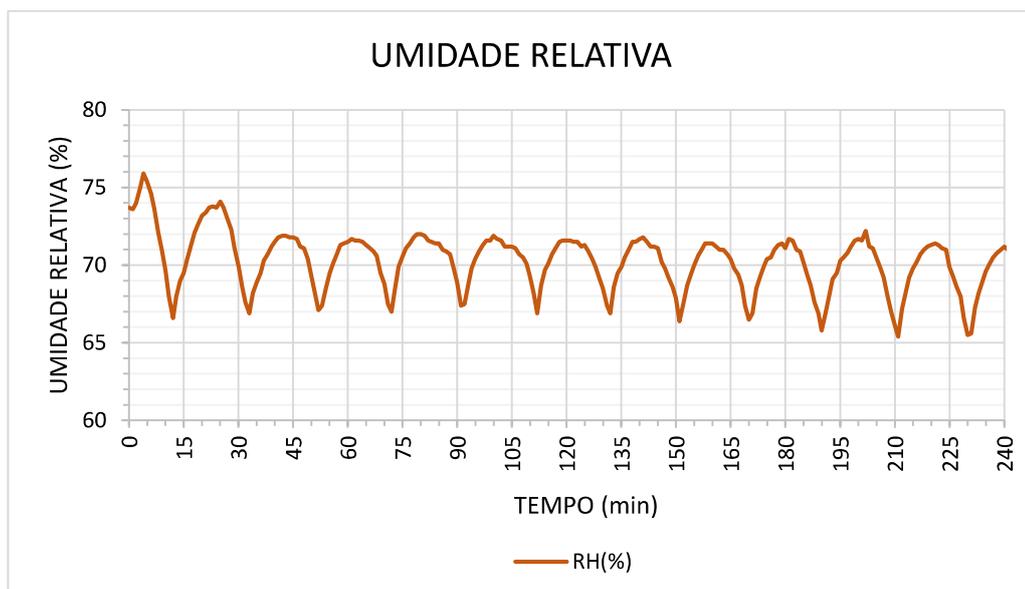
o intervalo de 300 s apresenta as maiores distorções nos comportamentos da temperatura e principalmente da umidade relativa, chegando a comprometer a análise dos limites superior e inferior atingidos por cada grandeza. Os intervalos de 120 s a 15 s conseguem representar de forma muito semelhante as variações de temperatura e umidade relativa observadas no ambiente. Em busca de uma análise detalhada, mas considerando o volume de dados a serem armazenados, o intervalo escolhido para a metodologia experimental foi de 60 s, Figuras 19 e 20.

Figura 19 - Temperatura do ar no interior da sala para um set point de 25°C e velocidade máxima do ventilador, como medições a cada 60 s.



Fonte: Autora (2018).

Figura 20 - Umidade relativa no interior da sala para um set point de 25°C e velocidade máxima do ventilador, como medições a cada 60 s.



Fonte: Autora (2018).

Os pré-experimentos foram importantes, além de tudo, na definição do reservatório de coleta e de sua escala de medição. Durante três dias foram realizadas medições com o *set point* em 21°C, 23°C e 25°C e velocidade baixa. O volume coletado no recipiente era medido uma vez a cada hora. O recipiente de coleta utilizado, Figura 21, foi calibrado com o auxílio de balões volumétricos e possuía uma escala cujo menor valor era 0,5 L, o que significa que os valores aferidos teriam incerteza igual a metade deste valor, $\pm 0,25$ L.

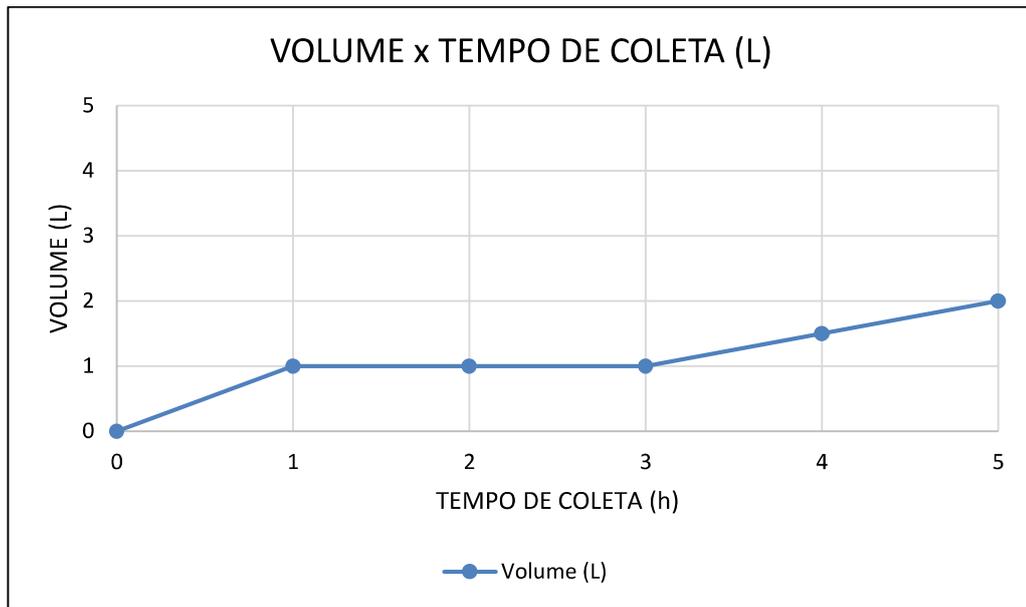
Figura 21 - Recipiente calibrado utilizado para coleta de condensado.



Fonte: Autora (2018).

As primeiras medições, no entanto, levaram à conclusão de que a escala adotada não estava adequada, isto porque, em determinadas temperaturas, o valor coletado não superava 0,5 L e acabavam ocorrendo repetições nos valores medidos, Figura 22.

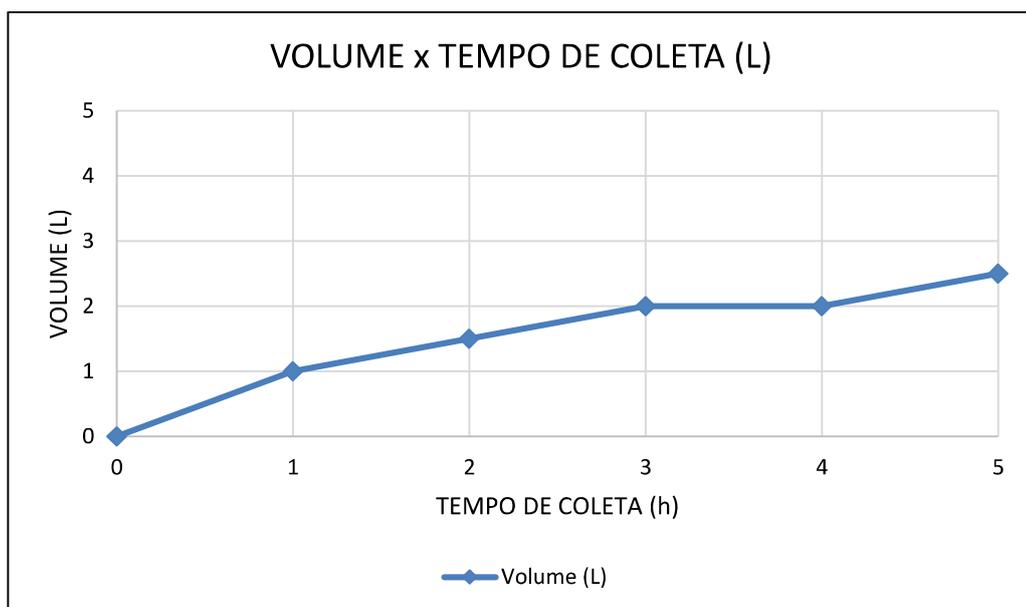
Figura 22- Volume coletado por hora na temperatura de 25°C, velocidade mínima do ar.



Fonte: Autora (2018).

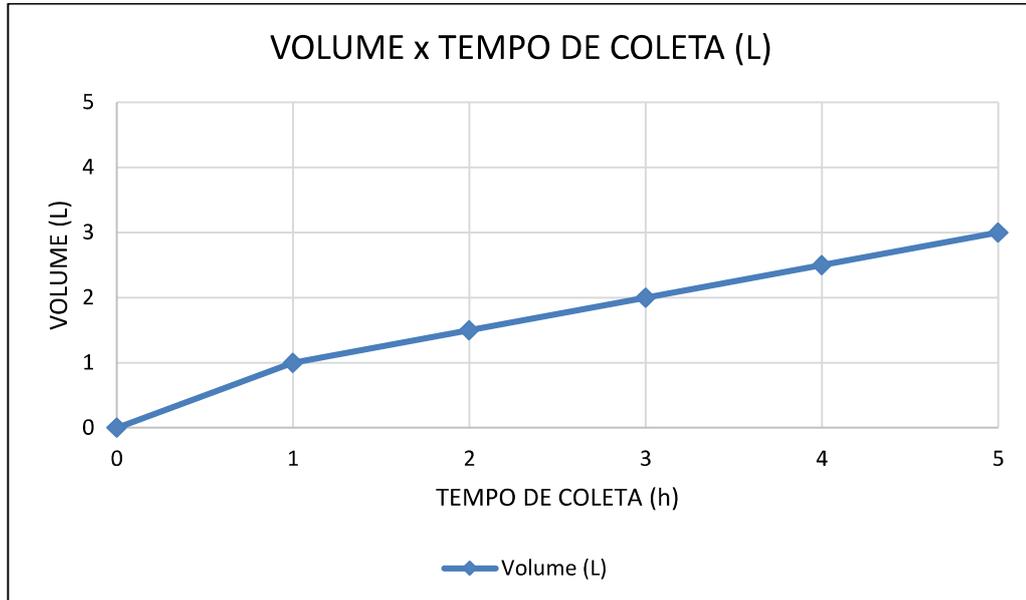
É possível observar que nas três primeiras horas de experimento não há variação na aferição do volume coletado, o que transmite uma leitura errada sobre a evolução do experimento, pois houveram mudanças, no entanto a escala não foi sensível o suficiente para representá-las. De forma semelhante ocorreu para a temperatura de 23°C, Figura 23, a temperatura de 21°C foi não foi afetada pela escala neste primeiro momento, Figura 24.

Figura 23- Volume coletado por hora na temperatura de 23°C, velocidade mínima do ar.



Fonte: Autora (2018).

Figura 24- Volume coletado por hora na temperatura de 21°C, velocidade mínima do ar.

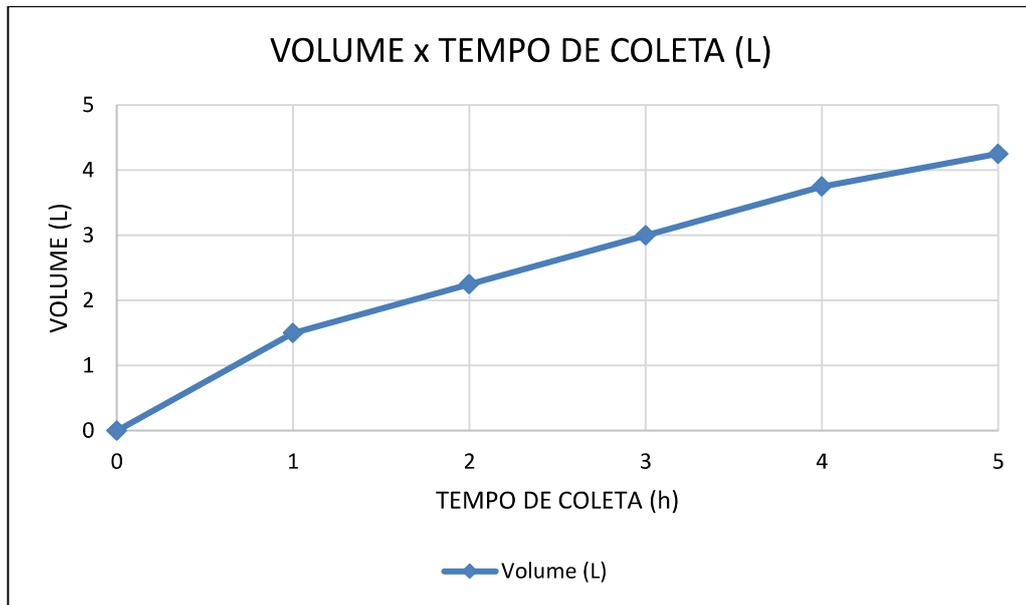


Fonte: Autora (2018).

Assim, para aumentar a sensibilidade da medição do volume coletado no experimento, procedeu-se a uma nova calibração e à adequação da escala do recipiente, passando-se a realizar aferições mínimas de 0,25 L com incerteza de $\pm 0,125$ L. Para avaliar a nova escala foram repetidos os experimentos a 21°C, 23°C e 25°C. O refino da escala, além de permitir medições mais precisas, indicou uma tendência: excetuando-se a primeira hora, quando os maiores volumes de água eram gerados, nas demais horas o volume de condensado produzido não apresentava valores com variação significativa entre si. Ou seja, em média, um mesmo valor 'x' de litros era produzido a cada hora, Figuras 25, 26 e 27.

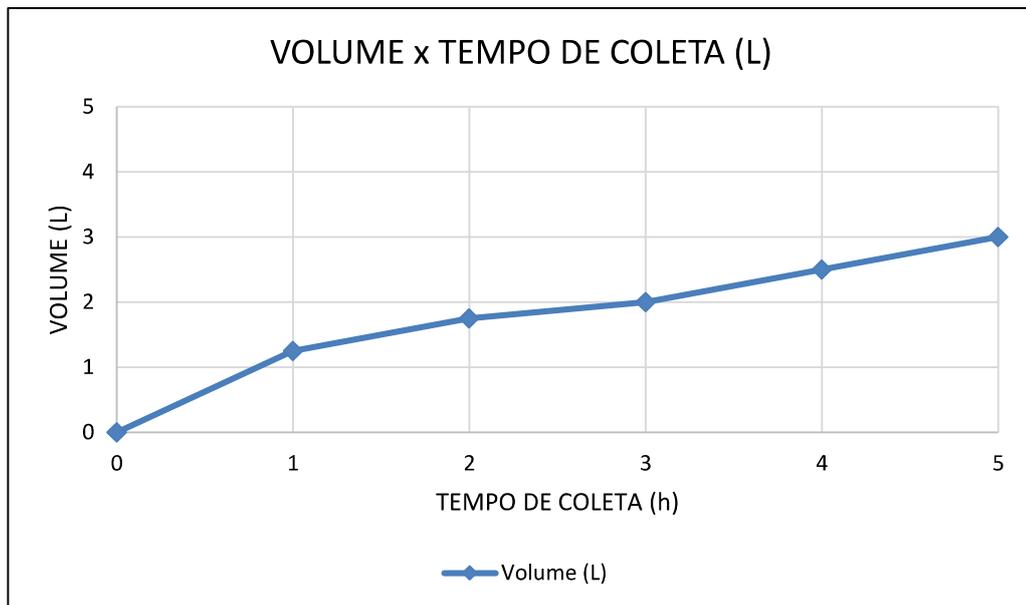
O fato de haver um padrão no volume de água coletado foi de fundamental importância na definição da metodologia experimental adotada no experimento. Inicialmente imaginava-se que seria necessário um dia completo de medições para cada variação das condições internas (*set point* e velocidade do ventilador) possíveis. No entanto não se havia atentado ao fato que a sala após um período transitório, que levaria o sistema das condições iniciais até as condições referentes ao *set point* escolhido, alcançaria um regime permanente em termos de coleta.

Figura 25- Volume coletado por hora na temperatura de 21°C e velocidade mínima do ar para nova escala.



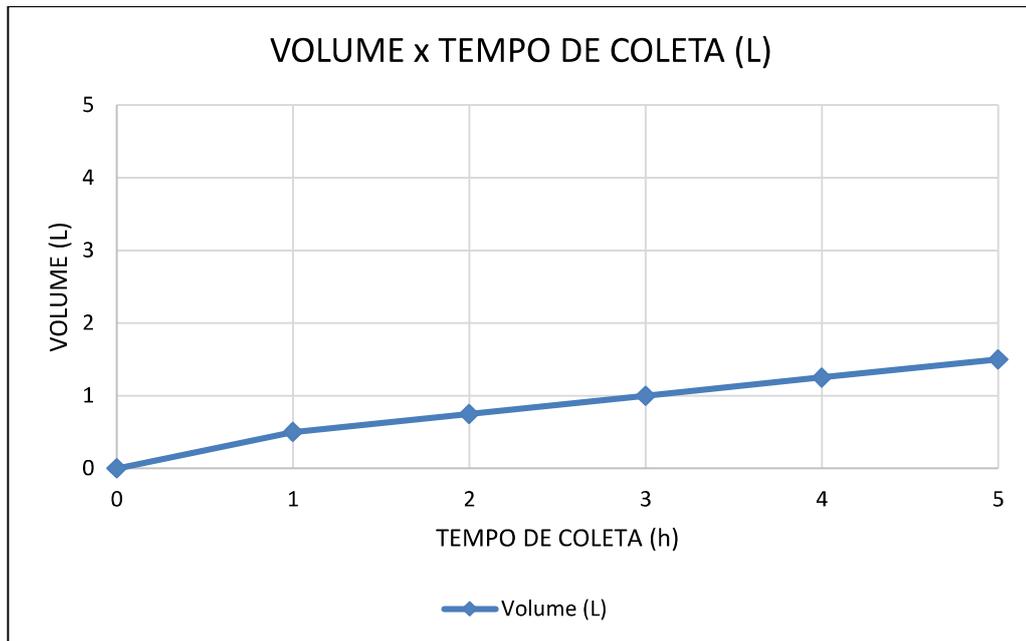
Fonte: Autora (2018).

Figura 26- Volume coletado por hora na temperatura de 23°C e velocidade mínima do ar para nova escala.



Fonte: Autora (2018).

Figura 27- Volume coletado por hora na temperatura de 25°C e velocidade mínima do ar para nova escala.



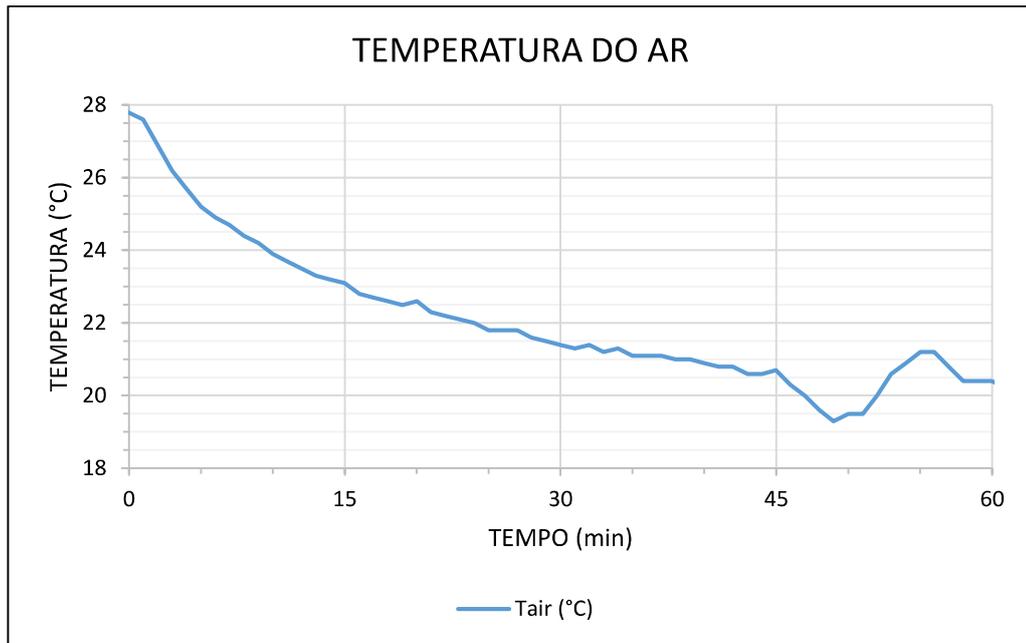
Fonte: Autora (2018).

Quanto maior a diferença entre a umidade da massa de ar que entra no aparelho de ar condicionado e a que sai, maior o volume de água produzido, pois segundo a Eq.10, a massa de água produzida por condensação no processo de resfriamento adiabático depende da massa de ar, neste caso da vazão de ar no aparelho, e das umidades absolutas na entrada e saída. Como a umidade relativa é diretamente proporcional à umidade absoluta, quanto maior a diferença entre Φ_{ent} e Φ_{sai} , maior será o valor resultante do termo $(w_{sai} - w_{ent})$ e maior será o valor da massa de água, $m_{\acute{a}gua}$, produzida no processo.

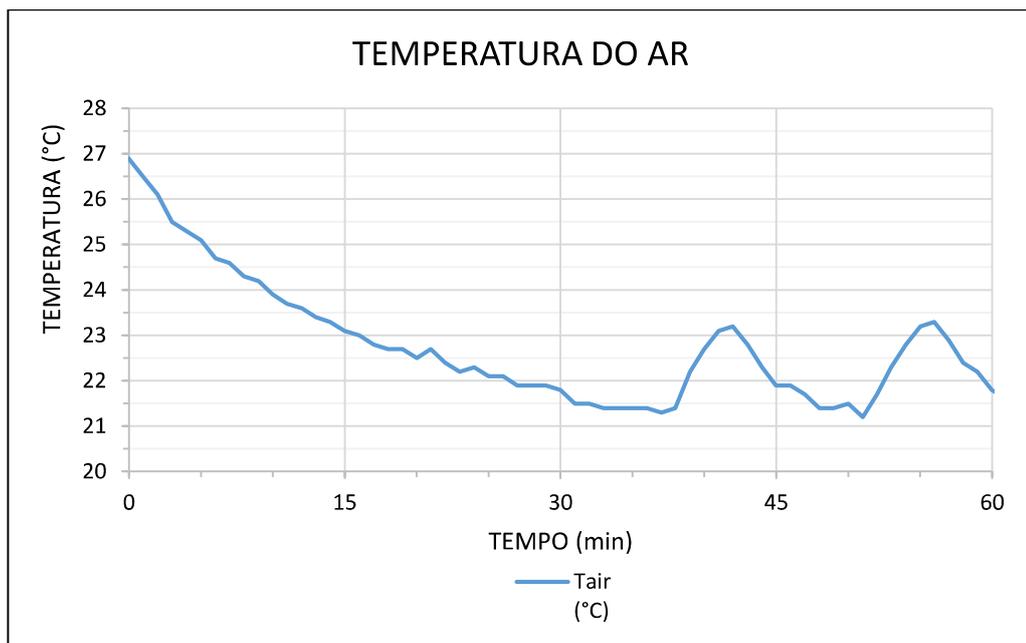
Então, se no início do experimento a sala apresenta os maiores valores de umidade relativa, é neste período que serão produzidos os maiores volumes de água por unidade de tempo. Após o ar da sala atingir o valor de *set point* não haverá mais variações significativas das condições de umidade do ar no interior da sala pois o ambiente foi todo controlado, sem aberturas de portas e sem renovação de ar, o ar do interior da sala é também o ar que retorna para o equipamento. Assim, foi percebido que a condição de entrada se mantém próxima da condição constante e por este motivo o volume de condensado produzido por intervalo de tempo também. Nas Figura 28 e 29 pode-se identificar a tendência decrescente dos valores de temperatura e umidade relativa no intervalo de 0 a 1 hora de experimento, e neste mesmo intervalo,

o início da definição do padrão oscilatório adotado pela temperatura e umidade, o que altera com as diferentes temperaturas de set point é apenas o tempo de estabilização. Por exemplo, a uma temperatura de 25°C este intervalo é menor, já que a temperatura do ambiente alcança mais rápido o valor de 25°C do que 23°C e 21°C.

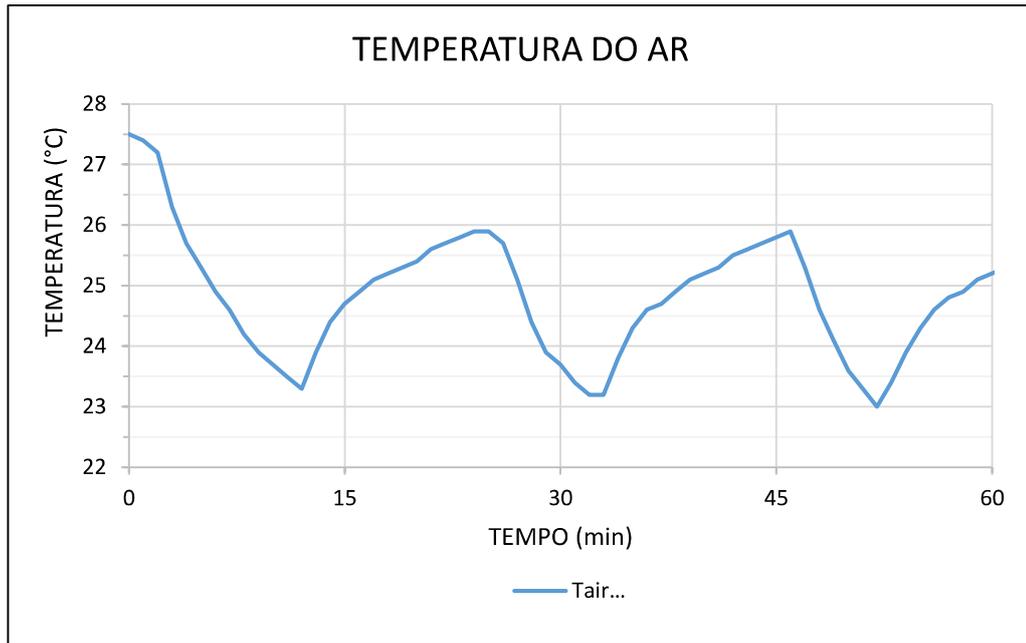
Figura 28 - Temperatura do ar no interior da sala, na primeira hora de medição, para um set point de: (a) 21°C e velocidade máxima do ventilador; (b) 23°C e velocidade máxima do ventilador; (c) 25°C e velocidade máxima do ventilador.



(a)



(b)

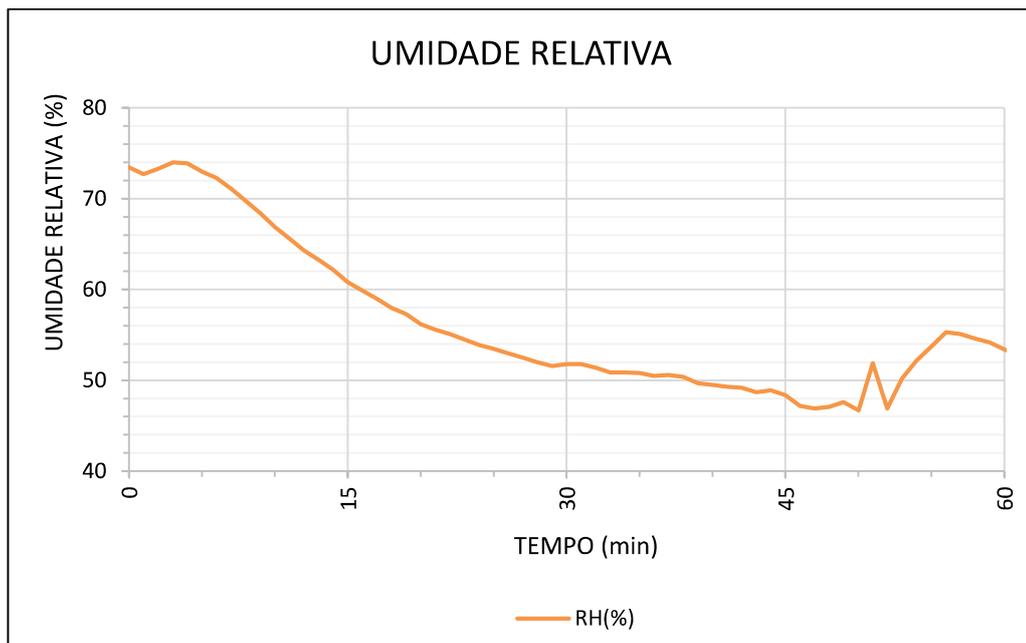


(c)

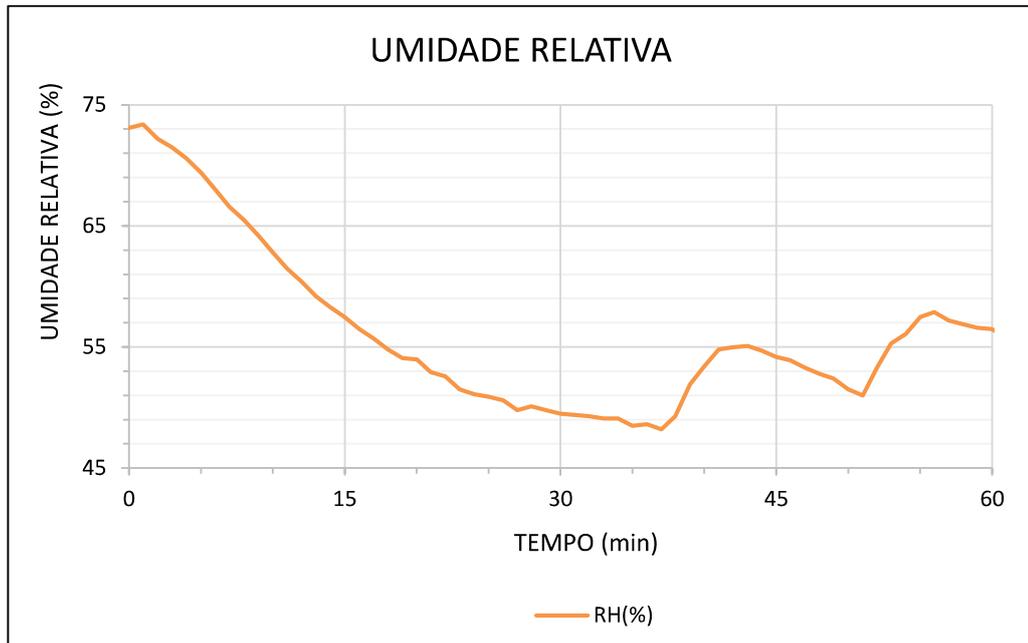
Fonte: Autora (2018).

Vale ressaltar que os resultados apresentados para temperatura e posteriormente para umidade relativa, reproduzem exclusivamente a bancada experimental montada, e são influenciadas pelas condições de temperatura e umidade relativa do ambiente escolhido para pesquisa. Para reprodução desta bancada em locais com condições climáticas diferentes das encontradas em Recife, podemos encontrar variações nos resultados.

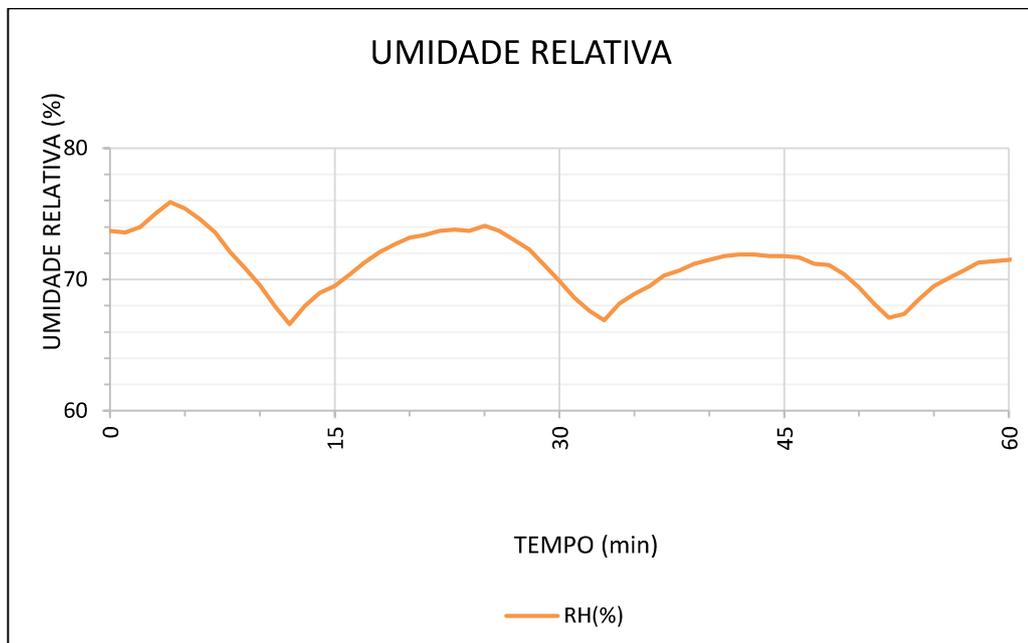
Figura 29 - Umidade relativa do ar no interior da sala, na primeira hora de medição, para um set point de: (a) 21°C e velocidade máxima do ventilador; (b) 23°C e velocidade máxima do ventilador; (c) 25°C e velocidade máxima do ventilador.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autora (2018).

4.3 Metodologia Experimental

Com base nos dados pré-experimentais, a metodologia experimental pôde ser definida. Os parâmetros aferidos foram:

- Temperatura de bulbo seco do ambiente (°C);
- Temperatura de bulbo seco na saída do equipamento (*split*) (°C);
- Umidade relativa;
- Concentração de CO₂ (ppm);
- Volume de condensado produzido (L).

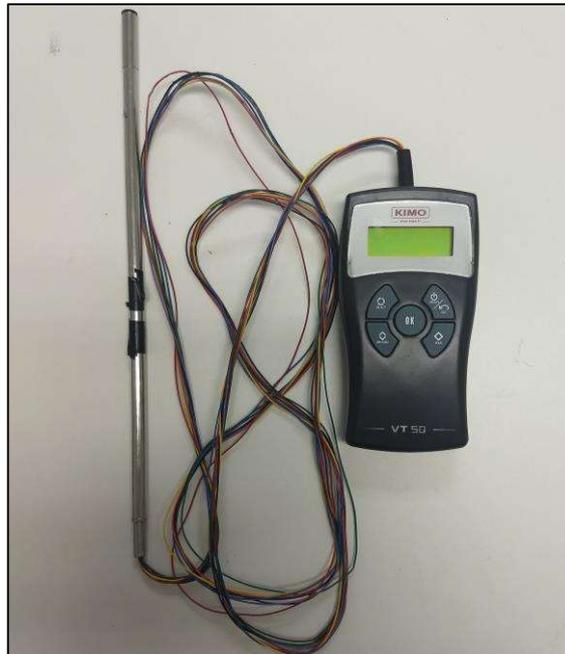
Assim como no descrito no item 4.2, as medições foram realizadas nas temperaturas de 21°C, 23°C e 25°C, variando-se a velocidade do ventilador entre alta, média e baixa, ou seja, para cada temperatura eram realizadas coletas para 3 vazões distintas, Tabela 3. Como já relatado, a velocidade automática foi descartada pois, era de difícil controle por permitir variações de velocidade durante o funcionamento do aparelho. As medições ocorreram no período de outubro de 2017 e janeiro de 2018, período de primavera e verão no hemisfério sul. A temperatura externa neste período variou entre 25°C e 31°C, e umidade alcançou valores médios de 76% de acordo com dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Tabela 3- Combinações entre temperatura e intensidade da velocidade do ventilador utilizadas no experimento.

COMBINAÇÃO	NÍVEL DE VELOCIDADE	TEMPERATURA (C°)
CA21	ALTA	21
CA23	ALTA	23
CA25	ALTA	25
CM21	MÉDIA	21
CM23	MÉDIA	23
CM25	MÉDIA	25
CB21	BAIXA	21
CB23	BAIXA	23
CB25	BAIXA	25

As vazões relativas a cada um dos estágios de velocidade, alto, médio e baixo, foram determinadas com o auxílio de um anemômetro de fio quente KIMO VT50, Figura 30, com exatidão para medições de velocidade de $\pm 3\%$ da leitura $\pm 0,05$ m/s para valores de 0,15 a 3 m/s, e $\pm 3\%$ da leitura $\pm 0,02$ m/s para valores de 3,1 a 30 m/s (www.kimo-instruments.com/sites/kimo.fr/files/2017-11/FTang_portable-VT50_10-11-17.pdf).

Figura 30 - Anemômetro de fio quente KIMO VT50.



Fonte: Autora (2018).

Os valores obtidos para cada estágio de velocidade são apresentados na Tabela 4. O procedimento realizado para obter tais resultados, e o cálculo das incertezas associadas, podem ser encontrados no Apêndice 1.

Tabela 4 - Vazões de ar calculadas para cada nível de velocidade de aparelho.

Nível de Velocidade	Vazão (m³/h)
Baixa	887,317
Média	1129,313
Alta	1237,975

Para realizar medições de forma padronizada e minimizar os erros e consequentes retrabalhos, as atividades ocorriam numa sequência definida. Os experimentos iniciavam pontualmente às oito horas da manhã, e antes de iniciar o experimento, eram conferidas as seguintes configurações:

- O acoplamento entre mangueira e balde coletor para evitar perdas por vazamento;
- As posições dos sensores de temperatura.
- Aferição das temperatura e umidade relativa no interior da sala, por meio do medidor de CO₂ Instrutemp ITMCO2 – 600.

Uma vez caracterizado o ambiente interno inicial e atingido o horário definido para início das medições, o aparelho de ar condicionado era ligado juntamente com todos os instrumentos de medição.

Em função da variação da condição inicial de temperatura e umidade a cada dia, e sabendo-se que ao iniciar o experimento haveria um período transitório que duraria até o ambiente atingir a temperatura do *set point* escolhido, ficou estabelecido que a primeira hora do experimento seria utilizada apenas para estabilizar o ambiente interno na temperatura escolhida, sendo considerada uma fase de transição. Desta forma, os experimentos iniciariam sempre com o ambiente nas condições pretendidas, independente das condições iniciais.

Pelo fato dos pré-experimentos apontarem uma constância no volume coletado por hora, ficou definido que o intervalo de coleta para cada combinação de temperatura de *set point* e velocidade do ventilador, seria de uma hora. E o valor coletado caracterizaria os volumes de condensado produzido por hora em um ambiente climatizado por um aparelho *split hi-wall* de 6,45 KW para aquela determinada combinação entre *set point* e velocidade do ventilador. Para cada dia de experimento se escolhia uma temperatura de *set point* única e variava-se apenas a vazão, assim não eram necessários novos períodos de estabilização do ambiente, pois se fosse alterado a temperatura seria necessário aguardar a sala atingir o novo *set point* para continuar as medições. A mesma linha de raciocínio poderia ser utilizada para os efeitos da alteração de vazão, e por este motivo as vazões foram alteradas de forma aleatória. Ou seja, em um dia de medições com *set point* de 23°C, as combinações poderiam seguir a ordem de velocidade alta, média e baixa, mas em outro dia de medição também a 23°C a ordem adotada poderia ser baixa, alta e média, por exemplo, ver Figura 31. Uma vez passada a fase transitória, o volume de condensado era aferido e, como a temperatura do dia já havia sido definida escolhia-se a primeira velocidade a ser monitorada. A cada hora que passava o volume de condensado acumulado era aferido

e outra vazão era escolhida, de forma aleatória como já discutido, para dar seguimento ao experimento.

Figura 31- Sequência de passos para exemplificar o experimento.



Fonte: Autora (2018).

A medição da concentração de CO₂, foi realizada de forma contínua do início ao fim de cada dia de experimento, independente das alterações de temperatura e velocidade do ar, pois estes parâmetros não influenciam na concentração de CO₂ no ambiente. Durante os experimentos o número de pessoas no recinto foi constante e igual a um, pois o objetivo é que a partir dos valores obtidos seja possível analisar a relevância ou não da renovação de ar em ambientes condicionados por equipamentos com capacidades inferior a 10kw e que estão fora da abrangência da NBR 16401-3.

Todas as informações colhidas eram armazenadas na memória dos instrumentos de medição utilizados e ao final exportadas para o computador na forma de arquivo .xls. Para permitir o cálculo do desvio padrão e incertezas associadas às medições, os experimentos foram repetidos 3 vezes para cada condição de temperatura e velocidade. O tratamento estatístico das incertezas de medição compõe o Apêndice A.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e realizada a discussão sobre eles.

5.1 Volume de Condensado

Primeiramente foi analisado o volume de condensado produzido pelo *split* por cada combinação entre temperatura de *set point* e intensidade do ventilador. Na tabela 5 estão os valores médios encontrados para cada temperatura com suas respectivas incertezas.

Tabela 5 - Volume coletado por hora para todas as combinações testadas.

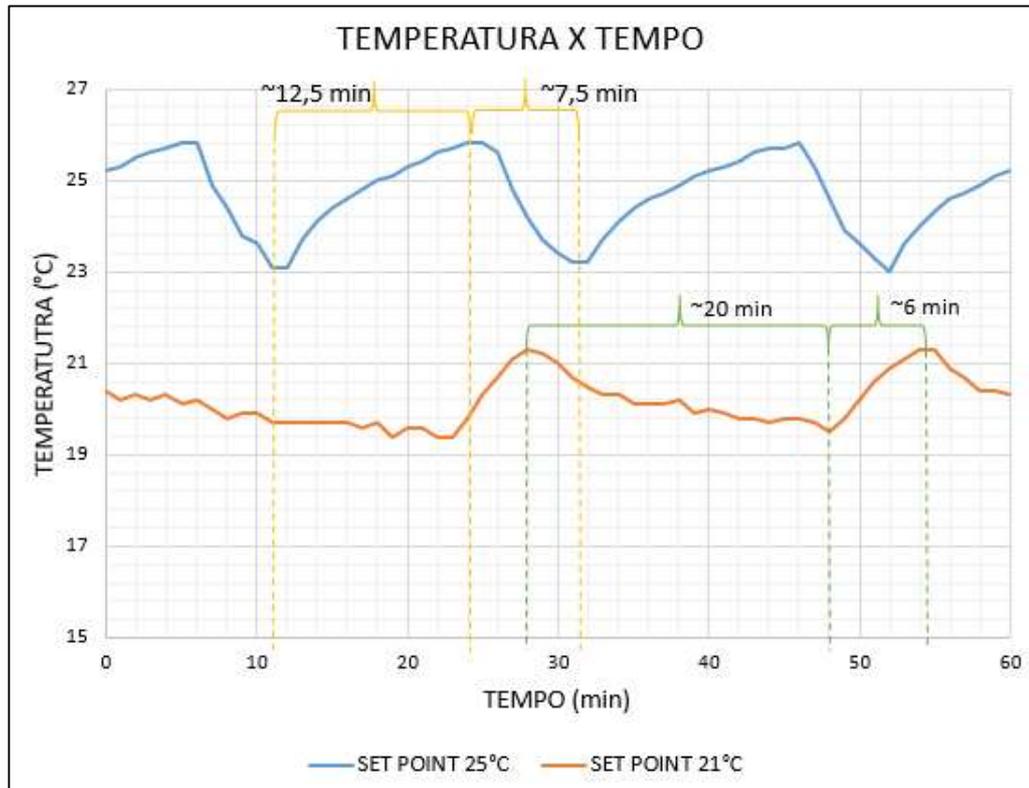
Temperatura de <i>set point</i>	Alta	Média	Baixa
21°C	0,8333 ± 0,1623	0,7500 ± 0,0625	0,8333 ± 0,1623
23°C	0,5833 ± 0,1623	0,5000 ± 0,0625	0,5000 ± 0,0625
25°C	0,2500 ± 0,0625	0,3333 ± 0,0975	0,2917 ± 0,0975

De acordo com os dados apresentados, é possível observar que, independente da combinação entre a temperatura e velocidade do ventilador, o desvio padrão dos resultados é baixo, chegando a ser quase insignificante na velocidade média. Os maiores volumes de água ocorrem para um *set point* de 21 °C e os menores para o *set point* de 25 °C. Este resultado já era esperado tendo em vista que para manter o ambiente a 21 °C o equipamento passa mais tempo em plena carga, ou seja, com o compressor em atividade e com isso um maior volume de ar é levado a temperaturas abaixo de seu ponto de orvalho e mais condensado é gerado.

É notável também que a temperatura de *set point* exerce maior influência comparado à velocidade do ventilador, no montante de condensado produzido. Isso pode estar atrelado ao fato de que as diferenças entre os valores de vazão nas diferentes intensidades, é baixo, não ultrapassando 250 m³/h. Além disso, apenas a temperatura influencia nos intervalos de funcionamento do compressor, pois como já foi dito antes, o mesmo é controlado por um termostato. Através da Figura 32, podemos ver que para temperatura de 21 °C de *set point* o compressor passa cerca de 20 min do tempo ligado (rampa onde há decréscimo de temperatura), e apenas 6 min desligado (rampa de crescimento de temperatura), ou seja, num panorama geral são aproximadamente

48 min de compressor atuando. Enquanto isso, para a temperatura de 25 °C, a situação se inverte e o compressor passa mais tempo desligado que ligado, ele atua em média intervalos de 7,5 min e permanece 12,5 min em repouso, ou seja, no intervalo de 1 h, o compressor está ativo por 22,5 min e o restante do tempo parado.

Figura 32 - Gráfico comparativo entre o tempo de funcionamento do compressor a 25°C e 21°C.



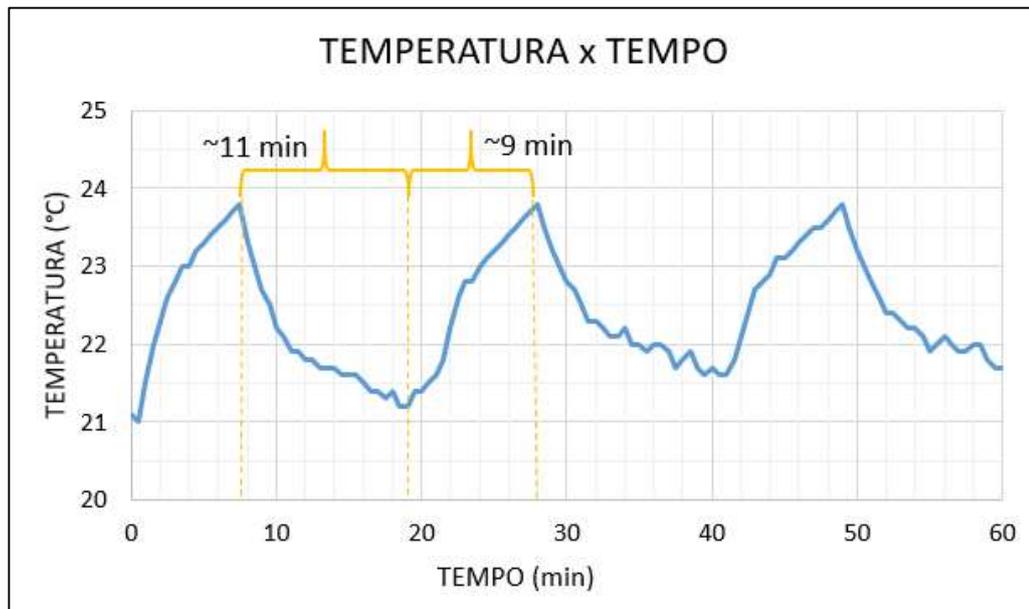
Fonte: Autora (2018).

Realizando a média de todos os resultados das 9 combinações do volume de condensado, se teria um valor base de 0,5417 L/h para um *split* 6,45 KW (22.000 Btu/h) *hi-wall*. Esse valor médio considerado representa bem os valores observados a 23°C, frequentemente, temperatura alvo em projetos de condicionamento de ar por estar no centro da faixa de conforto térmico indicada pelas normas NBR 16401 e ISO 7733. Pela formulação proposta por Guz (2005), Eq. 11, a previsão do volume de condensado pode ser encontrada através da multiplicação da capacidade do equipamento em toneladas de refrigeração, um fator de carga, que é a razão entre a demanda média e máxima registrada num intervalo de tempo, e 0,757 L (0,2 galões).

$$\text{ton.refrigeração} \times \text{fator de carga} \times 0,757 \text{ L} = \text{volume coletado} \quad (11)$$

Se considerarmos o fator de carga de 0,55, pois como se pode observar na Figura 33, em 1 h o compressor fica ligado cerca de 33 min (55% do intervalo), teremos 0,7645 L/h, mas o valor superior se justifica pois Guz (2005) contemplou renovação de ar e no presente trabalho a renovação é nula, portanto era de se esperar valor inferior. Se considerarmos os valores obtidos a 21 °C os resultados são bem semelhantes.

Figura 33 - Gráfico destacando o tempo de funcionamento do compressor para temperatura de a 23°C.



Fonte: Autora (2018).

De acordo com Queiroz (2014), em estudos realizados em campus da Universidade de Pernambuco, em Recife/PE, um *split* de 14,07 kw produz 1,28 L/h de condensado, considerando que o equipamento analisado neste trabalho é de 6,45 kw, menos da metade da capacidade, o valor de 0,5417 L/h obtido neste trabalho faz todo sentido.

O estudo desta dissertação faz análise de um ambiente interno de escritório nas condições de menor carga térmica possível, sem renovação de ar e com apenas uma pessoa no interior do ambiente, e mesmo assim aponta que cerca de 0,5417 L/h podem ser produzidos por um *split* de 6,45 kw. Em um dia de trabalho, considerando 8h de funcionamento, seriam 4,3336 L/dia e se considerar 22 dias trabalhados no mês, seriam 95,3392 L/mês. Os resultados apresentados podem servir para previsão de

coleta de novos empreendimentos com ambientes com características similares, em climas quente e úmido como o do Brasil.

Além disso, vale ressaltar que o volume de água coletado na primeira hora de experimento, considerada como fase de transição, não foi adicionado aos resultados, mas foram medidos e a coleta média ficou em torno de 1,1430 L. O volume expressivo de condensado gerado deve-se à condição inicial da sala que era semelhante à condição externa e por isso a temperatura e a umidade assumiam volumes superiores. Este resultado indica que se houver uma renovação de ar no ambiente o volume de condensado será superior ao volume estimado neste trabalho pois a renovação de ar indica constante acréscimo de umidade no ambiente acarretando também num maior tempo de funcionamento do equipamento para que as condições programadas sejam mantidas.

5.2 Análise financeira

Como já abordado em capítulos anteriores a utilização da água proveniente dos drenos dos aparelhos de ar condicionado pode seguir duas vertentes: a de economia de água e a de melhoria da eficiência energética. Vamos neste tópico discutir a redução de custos que seria gerada a partir do reaproveitamento da água de drenagem para fins que não necessitem de tratamento prévio da água, como jardinagem (irrigar) ou nos banheiros (lavagem geral e descarga).

No prédio onde foi realizado o estudo existem mais 19 salas iguais, e se for considerado que elas são climatizadas pelo mesmo tipo de aparelhos é possível expandir os resultados. Assumindo os 0,54 L/h produzidos pelo equipamento, e 8h de trabalho por dia útil, obtém-se 4,33 L/dia, somando a este valor o volume acumulado na primeira hora, 1,14 L/h, seriam 5,48 L/dia. Multiplicando este valor por 22 dias úteis, seriam 120,56 L/mês por sala, ou seja, 2411,20 L/mês para um total de 20 salas.

A tarifa cobrada para o consumo em prédios públicos pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), considerando um consumo predial superior à 10.000 L/mês, é de R\$ 8,91 por cada 1.000L. Sendo assim, considerando que a taxa de esgoto é o mesmo valor da de água, ocorreria uma redução de no mínimo R\$ 42,96 por mês ou R\$ 515,61 por ano. Como estas 20 salas compõe apenas uma

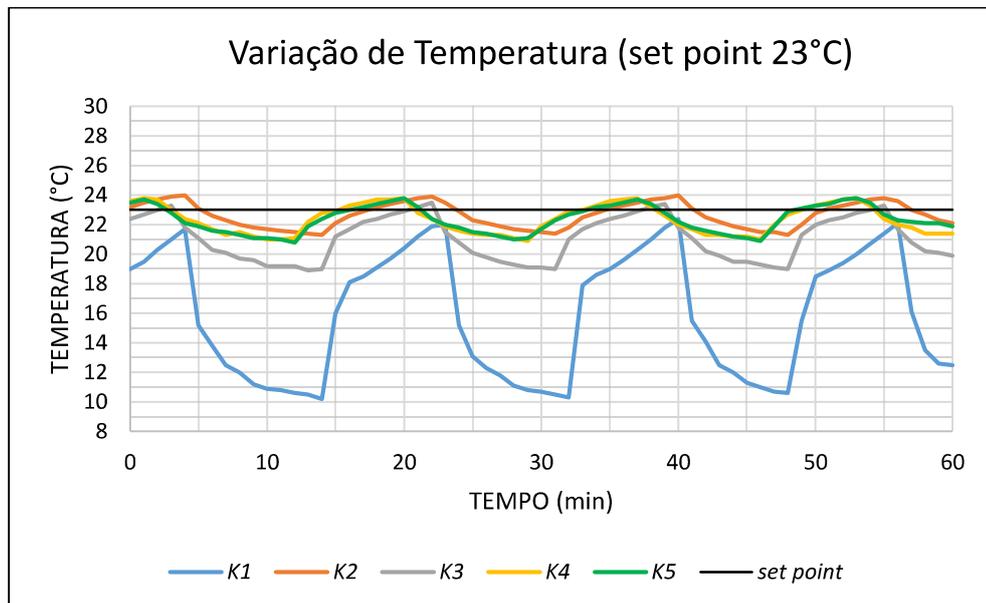
parte do bloco C do ITEP, reduções mais expressivas financeiramente podem ser obtidas se o reaproveitamento for aplicado a todos os Blocos do prédio.

5.3 Temperatura e Umidade

Como descrito no Capítulo 4, além da coleta de condensado, a temperatura e umidade foram controladas no ambiente, pois são grandezas muito influentes na geração de condensado e também bastante relevantes para o conforto térmico dos ocupantes.

Os perfis de temperatura e umidade obtidos deixam clara a correlação entre essas grandezas e como já comentado no Capítulo 4, devido à natureza do funcionamento do equipamento, temperatura e umidade comportam-se de forma cíclica variando em torno de um valor médio que não é necessariamente o valor do set point escolhido. Observa-se na Figura 34, cujos dados foram aferidos com ventilador em intensidade alta, a forma como os valores de temperatura variam em torno do *set point* de 23°C.

Figura 34 - Variação da temperatura no ambiente em comparação ao set point de 23°C.

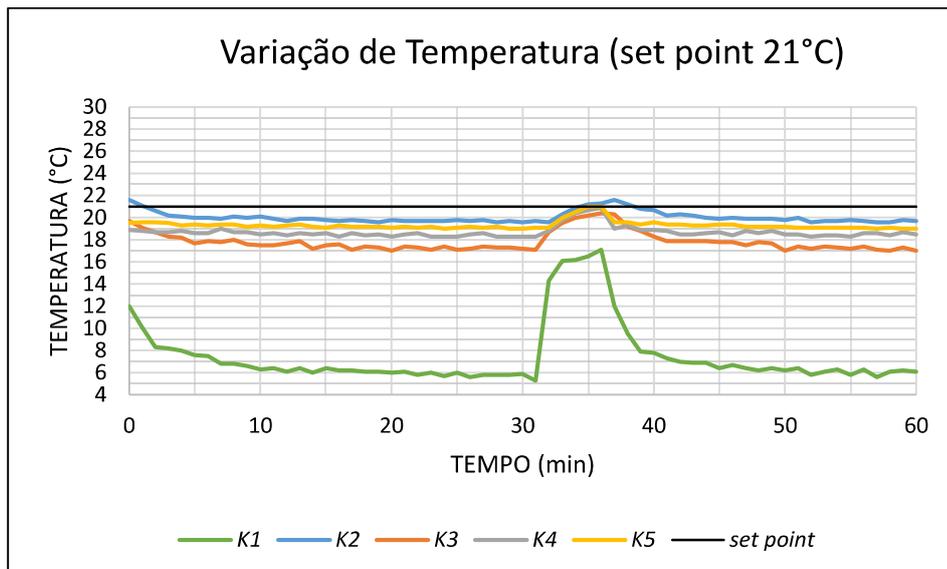


Fonte: Autora (2018).

Como pode ser visto, as temperaturas nos quatro termopares distribuídos pela sala, passam a maior parte do tempo abaixo da temperatura de *set point*, e seu valor médio é 22,1°C. O termopar K1 representa a variação de temperatura na saída do equipamento e onde são registradas as maiores amplitudes, com diferença entre má-

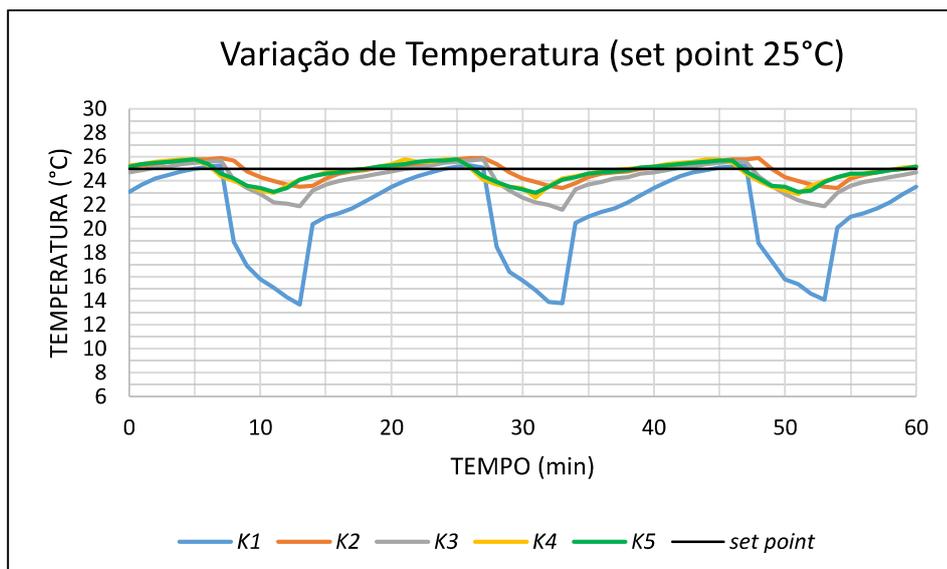
ximo e mínimo de 12,2°C e temperatura média de 15,9°C. Para as demais temperaturas, também considerando medições com ventilador em alta velocidade, o comportamento foi semelhante, como pode ser visto nas Figuras 35 e 36. Pode-se observar que na temperatura de 21 °C o compressor passa a maior parte do tempo ligado, desligando pela primeira vez após os 30 min quando se identifica um aumento de temperatura principalmente no termopar K1.

Figura 35 - Variação da temperatura no ambiente em comparação ao set point de 21°C.



Fonte: Autora (2018).

Figura 36 - Variação da temperatura no ambiente em comparação ao set point de 25°C.



Fonte: Autora (2018).

O resumo dos valores máximos, mínimos e médios de cada gráfico e para cada termopar estão presentes na Tabela 6, de onde conclui-se que os valores máximos não chegam a ultrapassar em 1°C o *set point* em nenhum dos 3 casos, os valores mínimos por sua vez têm um distanciamento de pelo menos 2°C do valor de *set point* na maior parte dos casos. De maneira geral, a temperatura na sala fica a maior parte do tempo abaixo do *set point* para todos os casos analisados.

Tabela 6 - Resumo dos valores máximos, mínimos e médios aferidos pelos termopares nos diferentes set points.

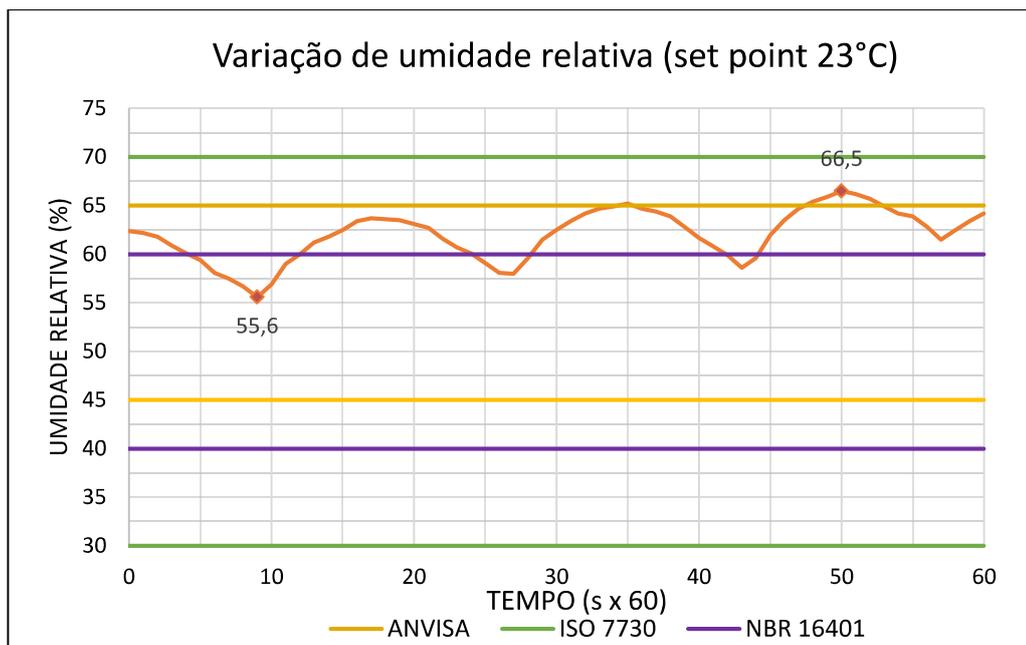
Set Point	K1 (°C)	K2 (°C)	K3 (°C)	K4 (°C)	K5 (°C)
23°C	MÁXIMO				
	22,4	24,0	23,5	23,8	23,8
	MÍNIMO				
	10,2	21,3	18,9	20,9	20,8
	MÉDIA				
	15,9	22,7	21,1	22,4	22,4
21°C	MÁXIMO				
	17,1	21,6	20,4	20,9	21,0
	MÍNIMO				
	5,3	19,6	17,0	18,3	19,0
	MÉDIA				
	7,5	20,1	17,9	18,7	19,3
25°C	MÁXIMO				
	25,3	25,9	25,8	25,8	25,8
	MÍNIMO				
	13,7	23,4	21,6	22,6	23,0
	MÉDIA				
	21,1	24,9	24,1	24,7	24,7

Os gráficos das figuras 34, 35 e 36, também indicam os períodos de compressor ligado, que coincide com os trechos de decrescimento de temperatura, principalmente do termopar K1 pois está na saída de ar do equipamento. Como já foi informado na secção 5.1, para o *set point* de 21°C o compressor passa um período de tempo maior ligado se comparado ao de 23°C e este por sua vez passa mais tempo ligado

se comparado ao *set point* de 25°C. Este trabalho não se ateve a estudos mais aprofundados sobre gasto de energia, mas os resultados gráficos apontam que a 21°C o gasto de energia é maior.

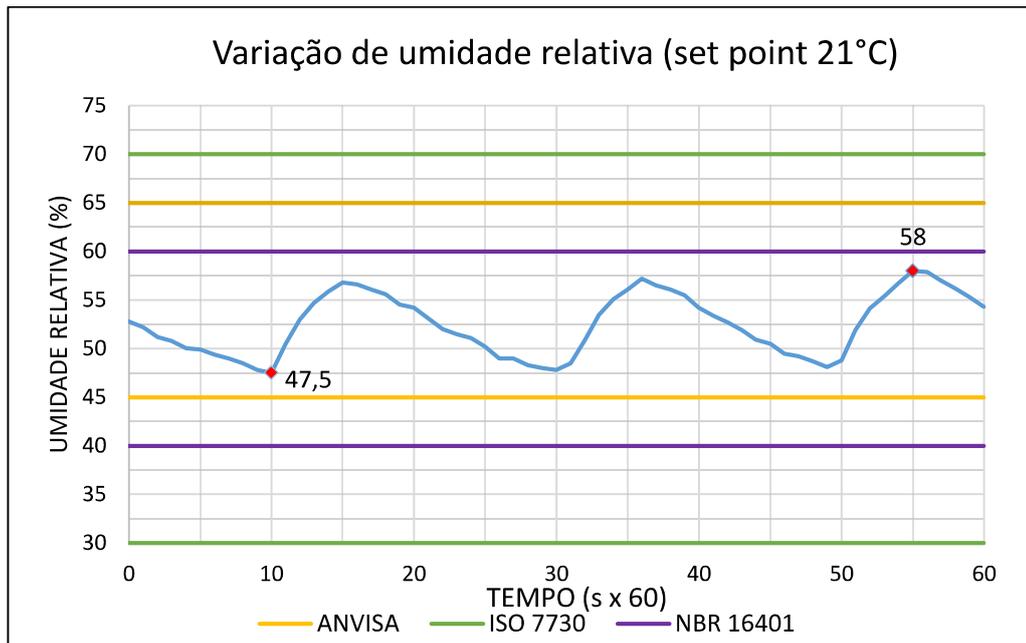
A umidade relativa varia de forma semelhante à temperatura, apresentando períodos de crescimento e decaimento. A Figura 37, mostra a umidade relativa para o *set point* de 23°C, para o mesmo intervalo de tempo e condições da Figura 34, que apresenta a variação de temperatura. Observe que a umidade varia entre 66,5% e 55,6%, ultrapassando a faixa ideal de umidade relativa indicada pela ANVISA que seria de 45% a 65% e NBR 16401, 40% a 60%, mas ainda dentro da faixa indicada pela ISO 7730, de 30% a 70%. Ou seja, para esta temperatura o equipamento de ar condicionado mantém a sala com umidades próximas e/ou superiores aos limites máximos das faixas indicadas.

Figura 37 - Variação da umidade relativa no ambiente para o set point de 23°C.



Fonte: Autora (2018).

Figura 38 - Variação da umidade relativa no ambiente para o set point de 21°C.

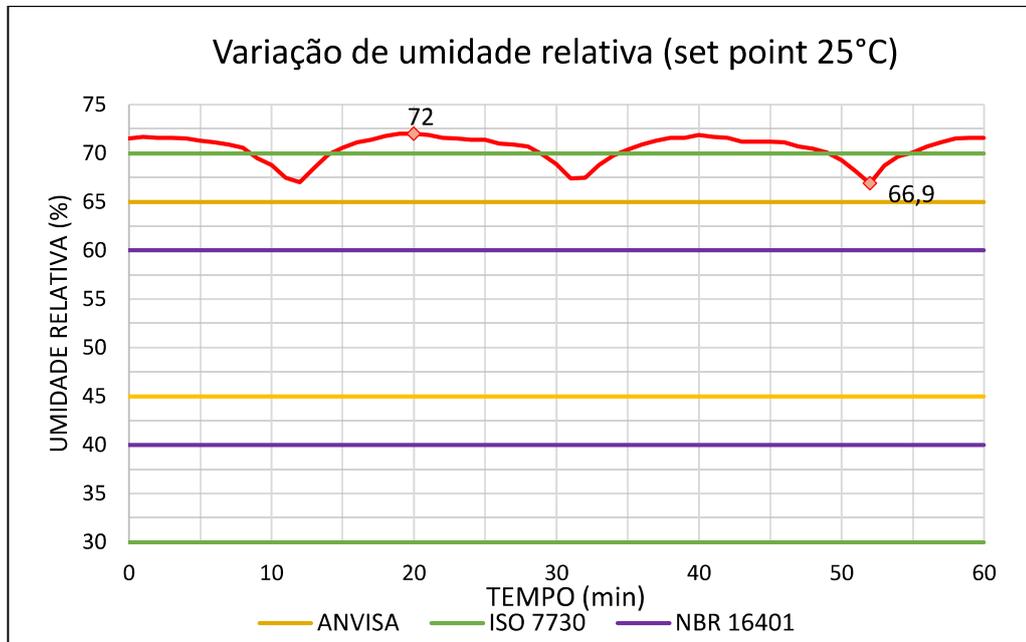


Fonte: Autora (2018).

O comportamento mostra-se semelhante para as demais temperaturas, no entanto verifica-se que a faixa de variação da umidade muda. Na Figura 38, é possível verificar que para o *set point* de 21 °C a umidade varia entre 58% e 47,8%, completamente dentro dos limites aceitáveis pelas normativas e resoluções citadas. Já quando o alvo no ambiente é uma temperatura de 25 °C, o *split* não apresenta desempenho satisfatório no tratamento de umidade relativa e o ambiente varia entre 66,9% e 72%, passando grandes períodos de tempo acima das faixas aceitáveis, Figura 39. Isso pode ser explicado pelo fato dos altos valores de umidade em Recife e principalmente porque o equipamento é controlado por um termostato, reduzindo e aumentando a temperatura ambiente apenas baseado na temperatura. Para controle de umidade geralmente se faz necessário um reaquecimento após a passagem na serpentina, controlado por um umidostato, e nenhum dos equipamentos tipo split comuns possuem este controle. Para o *set point* de 21°C, a umidade permanece dentro dos padrões pois a temperatura de saída do evaporador é mais baixa se comparada aos demais *set points* e com isso, menores valores de umidade são atingidos. Os resultados assim como já exposto anteriormente, representam bem locais com temperatura e umidade semelhantes a Recife/PE, que no período do experimento variou entre 25°C e 31°C,

e umidade alcançou valores médios de 76% de acordo com dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Figura 39 - Variação da umidade relativa no ambiente para o set point de 25°C



Fonte: Autora (2018).

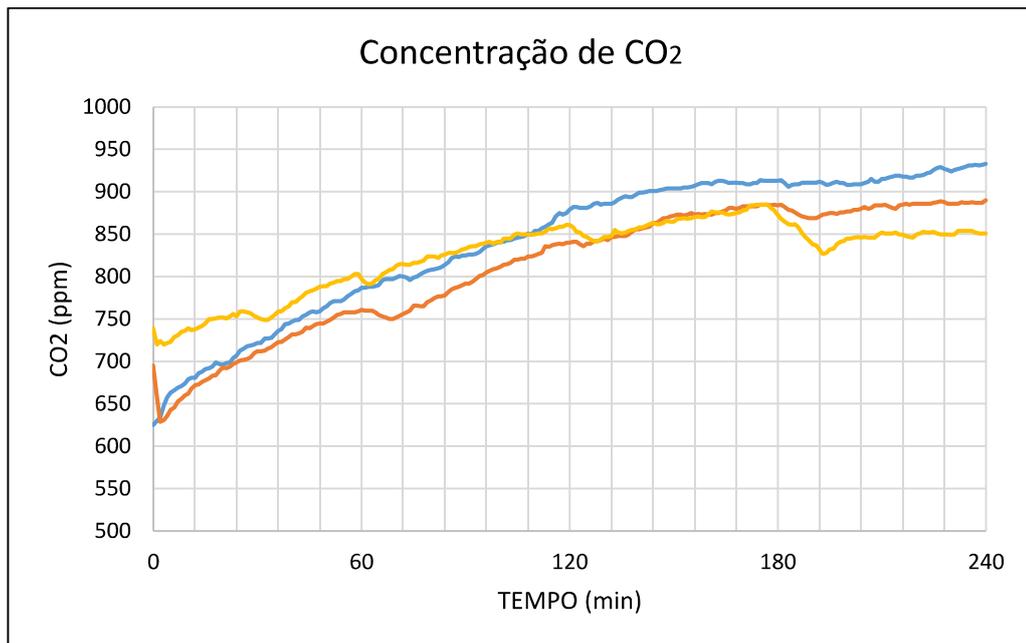
5.4 Níveis de CO₂

O experimento também contemplou a análise dos níveis de CO₂ no ambiente interno em estudo. A ideia é observar como os níveis de CO₂ variam em um ambiente ocupado por apenas uma pessoa, mas sem renovação de ar, e avaliar a necessidade ou não de renovação neste ambiente. Para ter um padrão de comparação também foram aferidos os níveis de CO₂ no ambiente externo à sala, e o seu valor médio, considerando todos os dias de medição, foi de 522,2 ppm. As medições no ambiente externo foram realizadas conforme indicações da ANVISA, longe de fontes poluidoras, de aglomerados de pessoas e em local arejado.

Considerando a NBR 16401, anexo C.2, que indica, como já visto no Capítulo 3, que a concentração máxima de CO₂ no ambiente interior não deve superar em 700 ppm a concentração no ar exterior, tem-se que para uma concentração de dióxido de carbono média de 522,2 ppm o recinto pode atingir até 1222,2 ppm.

A Figura 40 apresenta os índices de CO₂ aferidos em 3 diferentes dias de experimento, e contempla as primeiras 4h. O gráfico demonstra a tendência crescente da concentração em todos os dias medidos. Prestrelo (2017), em seu estudo em salas de aula condicionadas por *splits* e sem renovação, indica que a concentração de CO₂ está diretamente relacionada ao número de alunos, ou seja, quanto mais pessoas no ambiente maior a concentração.

Figura 40 - Variação da concentração de CO₂ no interior do ambiente para um período de 4h.



Fonte: Autora (2018).

Considerando que com apenas uma pessoa no recinto se atingiu valores de até 933 ppm, se pode esperar que com maior número de pessoas o ambiente ultrapasse os valores estabelecidos como valores de conforto. Assim, ressalta-se a importância da renovação de ar em ambientes internos, mesmo aqueles condicionados por sistemas unitários abaixo de 10kw. Esta pesquisa alerta para a necessidade de revisões no texto da NBR 16401, para que seja estabelecido que todos os ambientes necessitam de renovação de ar para manter condições ambientais internas saudáveis e que favoreçam a performance humana em diferentes atividades.

5.5 Considerações Finais dos Resultados

Neste trabalho as condições do ambiente em estudo procuram se aproximar das condições mínimas de influência de carga térmica nos resultados para justamente alcançar resultados base para comparações para pesquisas complementares e mais

abrangentes, diferente da maioria dos estudos, e talvez por este motivo apenas análises quantitativas não avaliem bem os resultados. O volume de 0,5417 L/h encontrado, é o volume mínimo produzido pelo aparelho em análise considerando oscilações de umidade proporcionadas pela existência de uma pessoa na sala e pelo funcionamento oscilatório do equipamento. Em concordância com Habeebullah (2009), Licina e Sekhar (2012), Loveless et al. (2013), Ibrahim (2014) e Magrini et al. (2017), que também em suas pesquisas destacam, baseados nas equações psicrométricas, procuram trabalhar atingir temperaturas abaixo da temperatura de orvalho na serpentina para otimizar a produção de condensado, verifica-se nos resultados deste trabalho que quando o *set point* é 21°C por um maior período de tempo a serpentina mantém o ar abaixo da temperatura de orvalho, basta observar que nesta temperatura o compressor passa mais tempo ligado.

Trazendo a atenção para o período de transição, que é o mais influenciado pelas condições exteriores de temperatura e umidade, a média produzida é mais que o dobro da média alcançada quando a sala atinge as condições programadas. Se pode estimar que em caso de renovação de ar, onde uma parcela de ar externo é inserida no ambiente, a produção seja superior aos 0,5417 L/h, é tanto que renovação de ar é presença constante em trabalhos sobre coleta e reaproveitamento de condensado, Bryant e Ahmed (2008) consideram 20%, Magrini et al (2017) o valor de 50% e Licina e Sekhar (2012) e Al-Farayedhi et al. (2014) utilizam 100% de ar externo na admissão dos equipamentos.

A renovação de ar agrega valor também na qualidade do ar interior. O gráfico da figura 40, quando próximo da estabilização, ou seja, após quase 3h e 30min, surpreende ao mostrar que com apenas uma pessoa na sala o CO₂ ultrapassa os 900 ppm. Observa-se que nas primeiras horas há uma tendência de aumento da concentração, com variação de até 250 ppm na primeira hora, mas com o passar do tempo esta variação fica cada vez menor. Isso acontece pois não há volume de ar exterior sendo inserido no ambiente a fim de manter os índices de CO₂ em níveis controlados e que não sejam nocivos aos ocupantes. Z.T. Ai et al. (2016) ao comparar diferentes formas de ventilação ambiente para renovação de ar indica inclusive que os resultados mais efetivos são alcançados com a ventilação mecânica, ou seja forçada. Isto vai de encontro a justificativa de que as aberturas de porta e os pontos de infiltração de ar

exterior no ambiente, se considerarmos ambientes pequenos como o escritório do presente trabalho, são suficientes para renovar o ar interior. Asif et al. (2018), também destaca a ineficiência da ventilação natural se comparada à forçada, reforçando o entendimento sobre a necessidade de tal recurso.

Outro ponto que também ganha relevância na questão de qualidade do ar é a diferença entre a NBR 16401 e a ANVISA. Na seção anterior, foi visto que o valor máximo de CO₂ permitido no ambiente de acordo com a NBR 16401 seria 1222,2 ppm, no entanto a Lei brasileira por meio da Resolução n°9 da ANVISA, utiliza 1000,0 ppm como valor máximo. Desta forma, para o ambiente em estudo, valores entre 1000,0 e 1222,2 ppm estariam de acordo com a norma mas descumpririam a lei. É sabido que as duas, Resolução RE n°9 da ANVISA e a NBR 16401 não possuem o mesmo objetivo, pois a ANVISA possui valores mais inflexíveis para viabilizar um controle mais fácil, já a norma nos mune de informações para a elaboração adequada de um projeto de climatização, no entanto um ponto de equilíbrio precisa ser encontrado entre norma e lei, sendo necessário para isso uma revisão de ambas principalmente em questões referentes a qualidade do ar.

5.6 Dificuldades encontradas

Todo trabalho experimental possui dificuldades intrínsecas, como a montagem da bancada, aquisição dos equipamentos de medição e padronização dos experimentos para correta aquisição de dados.

A escolha do local do experimento foi o primeiro desafio pois precisava ser um local disponível para a montagem da bancada experimental e com pouca variação das condições internas diariamente. As medições ocorreram durante o período em que os membros da empresa Avantec estavam afastados do escritório por estarem coordenando um projeto em outro estado. Mesmo assim, alguns dias havia atividade e não era possível realizar as medições, por isso foram preciso cerca de 4 meses para completa aquisição de dados.

Os instrumentos de medição foram o segundo desafio pois o experimento necessitava de instrumentos capacidade de registrar as grandezas nos intervalos adequados e armazenar os dados captados. Todos os instrumentos foram fornecidos pelo

IFPE, exceto o medidor de CO₂ que foi cedido pelo Prof. Luciano Prestrelo. Todo material adicional como suportes, reservatório de captação e cabos para transmissão de dados foram adquiridos pelo autor.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O capítulo contempla as conclusões que podem ser extraídas do trabalho realizado e propõe temas para trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

O presente trabalho apresentou um tema pouco explorado no Brasil, mostrando o volume que pode ser coletado de aparelhos de ar condicionado tipo *split* com capacidade de 6,45 KW (22.000 Btu/h) e as influências da temperatura de *set point* e velocidade do ventilador do equipamento nos resultados de coleta. Além disso, analisou o comportamento da temperatura e umidade no interior do ambiente e apresentou os resultados das concentrações de CO₂ no recinto em estudo, gerando discussão sobre a importância da renovação de ar.

A dissertação inicia com uma revisão geral sobre as bibliografias significativas para o assunto estudado e que corroboram a importância do trabalho realizado. A escassez de água em muitas regiões do mundo está provocando de muitas pesquisas voltadas ao reaproveitamento de recursos, principalmente de água, inclusive para consumo humano e otimização de processos, gerando economia de energia.

Devido à escassez de trabalhos científicos semelhantes ao desta dissertação, é avaliada e proposta uma metodologia para coleta de condensado. Os experimentos permitiram avaliar o volume de condensado produzido por hora pelo equipamento de ar condicionado nas diferentes condições impostas.

São relatadas a seguir algumas conclusões que podem ser extraídas deste trabalho.

- O *split* em estudo apresenta funcionamento intermitente já que trabalha com compressor em regime *on-off*, e isso influencia no padrão de temperatura e umidade relativa desenvolvido no ambiente. Além disso este fator é de extrema importância na escolha dos intervalos de medição das grandezas, conforme discutido na seção 4.2.1.
- O maior volume de condensado produzido foi na temperatura alvo de 21°C, chegando a ser produzido 0,833 L/h de água condensada. Os menores volumes ocorreram quando o *set point* era 25°C. Este resultado já era esperado tendo em vista que para manter o ambiente a 21°C o equipamento passa mais

tempo em plena carga, ou seja, com o compressor em atividade e com isso um maior volume de ar é levado a temperaturas abaixo de seu ponto de orvalho, e mais condensado é gerado.

- A temperatura de *set point* é mais influente no volume de condensado gerado do que a velocidade escolhida para o ventilador, no caso do equipamento em estudo.
- Considerando todos os experimentos realizados e condições impostas o valor médio de produção de condensado foi 0,5417 L/h. A coleta na primeira hora de experimento, considerada como fase de transição, ficou em torno de 1,1430 L/h e deve-se a condição inicial da sala, por apresentar temperatura e umidade semelhantes ao ambiente externo.
- Temperatura e umidade no interior da sala variam de forma diretamente proporcional. As temperaturas passam a maior parte do tempo abaixo da temperatura de *set point* e as maiores amplitudes são observadas nas aferições do termopar K1 por estar na saída do equipamento e reproduzir com maior influência os períodos de entrada e saída do compressor durante o funcionamento do equipamento.
- Para as temperaturas de 23°C e 25°C os resultados revelam a ineficiência do equipamento instalado na manutenção da umidade dentro das faixas indicadas pela ANVISA, NBR 16401 e ISO 7730. Para o *set point* de 25°C o ambiente passa a maior parte do tempo de medição, acima dos 70%.
- Os níveis de CO₂ aferidos não ultrapassaram o valor base de 1000 ppm no período de medições, no entanto considerando que o ambiente estava ocupado por apenas uma pessoa e valores acima de 900 ppm foram obtidos o trabalho deixa o alerta para revisão da NBR 16401 pelo fato de sua terceira parte se aplicar apenas a equipamentos com capacidade igual ou superior a 10kw.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões e recomendações para trabalhos futuros, podem ser citados:

- Incluir a aferição de umidade na saída do equipamento para poder ter melhores resultados na comparação entre resultados experimentais e a literatura.

- Realizar o estudo, de acordo com metodologia desenvolvida, mas variando o número de pessoas no ambiente e analisar a influência deste fator nos níveis de CO₂.
- Repetir o experimento considerando renovação de ar no ambiente e realizar análise comparativa.
- Realizar simulações computacionais utilizando como entrada os dados obtidos neste trabalho e fazer análise comparativa.
- Utilizar a água coletada pelo dreno para resfriar o condensador do split e analisar a eficiência do sistema e o consumo de energia com e sem o resfriamento proporcionado pelo condensado.
- Realizar a análise da água coletada para verificar a viabilidade desta ser utilizada como água potável.

REFERÊNCIAS

AL-FARAYEDHI, A. A.; IBRAHIM, N. I.; GANDHIDASAN, P. Condensate as a water source from vapor compression systems in hot and humid regions. **Desalination**, v. 349, p. 60–67, 2014.

ALGARNI, S.; SALEEL, C. A.; MUJEEBU, M. A. Air-conditioning condensate recovery and applications—Current developments and challenges ahead. **Sustainable Cities and Society**, v. 37, n. August 2017, p. 263–274, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-3: Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO – ABRAVA. **Economia e praticidade fazem aparelhos split dominarem o mercado de ar condicionado**. Disponível em: <<http://abrava.com.br/?p=8776>> Acesso em: 17 dez. 2018.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. **Resolução RE nº9, de 16 de janeiro de 2003. Determina a publicação de Orientação Técnica elaborada por Grupo Técnico Assessor, sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo**. Diário Oficial da União, Brasília, 2003. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/33880/2568070/RE_09_2003.pdf/f4af80d4-8516-4f9c-a745-cc8b4dc15727> Acesso em: 16 ago. 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Águas – ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual / Agência Nacional de Águas**. 88 p. Brasília, 2002.

BRASIL. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – Cemaden. **Sistema de Monitoramento de Seca para o Brasil**. 2018. Disponível em: <https://www.cemaden.gov.br/sistema-de-monitoramento-de-seca-para-o-brasil_julho2018/> Acesso em: 17 dez. 2018.

BRYANT, J. A; AHMED, T. Condensate Water Collection for an Institutional Building in Doha , Qatar : An Opportunity for Water Sustainability. **Proceedings of the Sixteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates**, 2008.

CASARIN, Ricardo. Indústria de ar-condicionado espera crescer com demanda residencial. **Diário Comercio Indústria & Serviços – DCI**, São Paulo, 2018. Disponível em: <<https://www.dci.com.br/industria/industria-de-ar-condicionado-espera-crescer-com-demanda-residencial-1.701236>> Acesso em: 17 dez. 2018.

EADES, W. G. Energy and water recovery using air-handling unit condensate from laboratory HVAC systems. **Sustainable Cities and Society**, v. 42, n. July, p. 162–175, 2018.

FAKHOURY, Nicolas Alexandre. **Estudo da qualidade do ar interior em ambientes educacionais**. São Paulo, 2017. 196 p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo, 2017.

FORTES, P. D.; JARDIM, P. W. C. F. P. M. G.; FERNANDES, J. G. Aproveitamento de água proveniente de aparelhos de ar condicionado. **XII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, v. d, p. 16, 2015.

GUZ, K. Condensate water recovery. **ASHRAE Journal**, v. 47, n. 6, p. 54–56, 2005.
IBRAHIM, N. I.; AL-FARAYEDHI, A. A.; GANDHIDASAN, P. Experimental investigation of a vapor compression system with condenser air pre-cooling by condensate. **Applied Thermal Engineering**, v. 110, p. 1255–1263, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730 - Moderate thermal environments- Determination of the PMV and PPD índice and specification of the conditions for thermal comfort**. Genebra, 1994.

LAWRENCE T, P. J. Capturing condensate. **High Performing Buildings**, v. 3, n. 4, p. 56–61, 2010.

LICINA, D.; SEKHAR, C. Energy and water conservation from air handling unit condensate in hot and humid climates. **Energy and Buildings**, v. 45, p. 257–263, 2012.

LOVELESS, K. J.; FAROOQ, A.; GHAF FOUR, N. Collection of Condensate Water: Global Potential and Water Quality Impacts. **Water Resources Management**, v. 27, n. 5, p. 1351–1361, 2013.

MAGRINI, A. et al. Integrated Systems for Air Conditioning and Production of Drinking Water-Preliminary Considerations. **Energy Procedia**, v. 75, p. 1659–1665, 2015a.

MAGRINI, A. et al. Production of water from the air: The environmental sustainability of air-conditioning systems through a more intelligent use of resources. The advantages of an integrated system. **Energy Procedia**, v. 78, p. 1153–1158, 2015b.

MAGRINI, A. et al. Water production from air conditioning systems: Some evaluations about a sustainable use of resources. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 8, 2017.

MAHVI, A. H.; ALIPOUR, V.; REZAEI, L. Atmospheric moisture condensation to water recovery by home air conditioners. **American Journal of Applied Sciences**, v. 10, n. 8, p. 917–923, 2013.

PRESTELO, Luciano Torres, **Influência dos níveis de CO2 sobre o conforto ambiental: Estudo de caso em salas de aula com climatização artificial, sem renovação de ar**. 67 p. Dissertação (Mestrado profissional em Tecnologia Ambiental). Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco, 2017.

QUEIROZ, Mirella de Moraes. **Reuso de água dos aparelhos de ar-condicionado na POLI/UPE**. Recife, 2014. 64 p. Trabalho de conclusão de curso (MBA em Tecnologia e Gestão da Construção de edifícios) Universidade de Pernambuco, 2014.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e ar condicionado**. São Paulo, McGraw-Hill, 1985.

VAN WYLEN, GORDON J.; SONNTAG, RICHARD E.; BORGNAKKE, CLAUS. **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo, Blucher, 2003.

YANG, L.; YE, M.; HE, B. J. **CFD Simulation Research on Residential Indoor Air Quality**. Science of the Total Environment, v. 472, p. 1137–1144, 2014.

Z.T.Ai, C.M.Mak, D.J.Cui, P.Xue, Ventilation of Air Conditioned Residential buildings: A case study in Hong Kong. **Energy and Buildings** (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.055>)

APÊNDICE A - ANÁLISE DE ERROS

A busca por qualidade nos processos industriais, aperfeiçoada aquisição de dados em estudos experimentais e a busca por facilidades no dia-a-dia, tem ampliado o alcance da instrumentação no mundo atual.

No âmbito científico a atividade experimental tem sua importância sendo justificada por dois motivos básicos: comparar e confirmar informações obtidas de forma teórica ou numérica; e encontrar correlações entre variáveis quando a configuração dos parâmetros impossibilita a análise teórica. No entanto, um trabalho experimental para adquirir confiabilidade, precisa de um planejamento sólido, seguindo uma série de etapas sequenciais, que envolvem a definição dos objetivos, a escolha das grandezas a serem medidas e quais instrumentos devem realizar as medições para alcance da exatidão esperada, projeto do experimento procurando minimizar os erros de medição, execução do experimento, análise dos resultados e conclusões obtidas.

- **Incerteza experimental**

Na realização de medições experimentais, por mais cuidadoso e sofisticado que seja o experimento planejado, os erros estarão sempre presentes. Como não é possível conhecer exatamente o erro associado a uma medição a incerteza representa uma estimativa do efeito de todos os erros associados ao resultado da medição.

Os erros podem ser classificados como fixos ou sistemáticos e aleatórios.

- Erros sistemáticos: são aqueles relacionados a exatidão do instrumento, em princípio podem ser causados devido a instrumentos de medida com perda de calibração, interferência de fatores externos (pressão, temperatura, campos magnéticos, vibrações, etc.), procedimento inadequado do observador (como paralaxe).

- Erros aleatórios: como próprio nome já indica, são erros de natureza aleatória e, portanto, difíceis de serem eliminados. Estes tipos de erros têm relação direta com a repetitividade do instrumento e são tratados por métodos estatísticos para determinar sua influência e propagação nos cálculos. Geralmente estes erros podem ser reduzidos quanto maior for o número de repetições da medição, mas não é uma regra.

- **Tratamento de erros aleatórios**

Por meio de análise estatística de um conjunto de dados, se pode estimar o valor verdadeiro como:

$$x' = \bar{x} + u_x$$

(Eq. A1)

Onde, \bar{x} é o valor médio das medições e u_x o erro associado.

○ Densidade de probabilidade

É a frequência com a qual uma variável medida adquire um valor ou está dentro de um intervalo de valores. A função densidade de probabilidade define a probabilidade de uma variável assumir um determinado valor em uma medida individual qualquer e fornece também a tendência central da variável.

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x - x')^2}{\sigma^2}\right]$$

(Eq. A2)

Em que x' neste caso é o valor médio real de x e σ^2 é a variância real de x .

$$x' = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

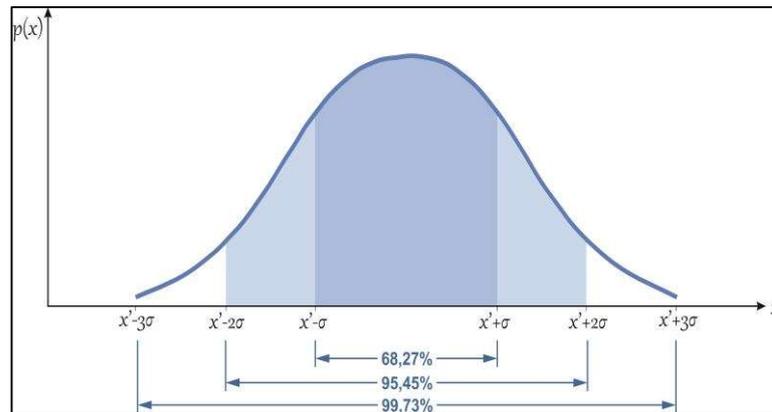
(Eq. A3)

$$\sigma^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x')^2$$

(Eq. A4)

Segundo Ismail (2003), para um número muito grande de medidas n , a distribuição normal ou de Gauss é a distribuição teórica dos valores medidos de x em torno do valor médio x . Se as medidas são realizadas com alta precisão, então, σ será pequena e a distribuição Gaussiana mostra um pico no valor médio x , figura A1. A área sob a curva da função densidade de probabilidade, $p(x)$, definida pelo intervalo $x' - z\sigma$ a $x' + z\sigma$, fornece a probabilidade de uma medição assumir um valor dentro desse intervalo. A integração direta de $p(x)$ para uma distribuição normal entre os limites $x' \pm z\sigma$ resulta que, para $z=1$, 68,27% da área sob $p(x)$ estará dentro do intervalo $\pm 1\sigma$ de x' . Ou seja, há 68,27% de uma medição estar no intervalo de integração.

Figura A1 - Curva da função densidade de probabilidade definida no intervalo de $x'-3\sigma$ a $x'+3\sigma$.



(Fonte: Autor)

○ Desvio Padrão

Ao se realizar várias medições, como já dito anteriormente, os valores estarão distribuídos em torno e um valor médio. A dispersão ao redor deste valor indica se a medida é mais ou menos exata e pode ser calculada através do desvio padrão.

$$\sigma = \Delta x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

(Eq. A5)

O desvio padrão estabelece uma probabilidade de aproximadamente 68% de que uma medida esteja num intervalo de $\pm\sigma$ em torno da média. Para probabilidades maiores a faixa de incerteza deve ser aumentada conforme tabela A1.

Tabela A1 - Valores de probabilidade em função do parâmetro z.

Incer- teza	Probabilidade (%)
0,647σ	50,00
σ	68,67
1,645σ	90,00
2σ	95,45
2,576σ	99,00
3σ	99,73

A distribuição normal representa bem, no entanto, a distribuição de probabilidade de amostras infinitas. Para amostras finitas existe outra distribuição que se adequa melhor a estimativa dos parâmetros, a *t de Student*, figura A2.

Figura A 2 - Faixa de abrangência para cada grau de liberdade na distribuição t de Student.

Graus de liberdade	Faixa de abrangência / probabilidade				
	σ 68,27%	1,96 σ 95%	2,00 σ 95,45%	2,58 σ 99,00%	3,00 σ 99,73%
1	1,837	12,706	13,968	63,656	235,811
2	1,321	4,303	4,527	9,925	19,206
3	1,197	3,182	3,307	5,841	9,219
4	1,142	2,776	2,869	4,604	6,620
5	1,111	2,571	2,649	4,032	5,507
6	1,091	2,447	2,517	3,707	4,904
7	1,077	2,365	2,429	3,499	4,530
8	1,067	2,306	2,366	3,355	4,277
9	1,059	2,262	2,320	3,250	4,094
10	1,053	2,228	2,284	3,169	3,957
11	1,048	2,201	2,255	3,106	3,850
12	1,043	2,179	2,231	3,055	3,764
13	1,040	2,160	2,212	3,012	3,694
14	1,037	2,145	2,195	2,977	3,636
15	1,034	2,131	2,181	2,947	3,586
16	1,032	2,120	2,169	2,921	3,544
17	1,030	2,110	2,158	2,898	3,507

(continua)

Graus de liberdade	Faixa de abrangência / probabilidade				
	σ 68,27%	1,96 σ 95%	2,00 σ 95,45%	2,58 σ 99,00%	3,00 σ 99,73%
18	1,029	2,101	2,149	2,878	3,475
19	1,027	2,093	2,140	2,861	3,447
20	1,026	2,086	2,133	2,845	3,422
25	1,020	2,060	2,105	2,787	3,330
30	1,017	2,042	2,087	2,750	3,270
35	1,014	2,030	2,074	2,724	3,229
40	1,013	2,021	2,064	2,704	3,199
50	1,010	2,009	2,051	2,678	3,157
60	1,008	2,000	2,043	2,660	3,130
70	1,007	1,994	2,036	2,648	3,111
80	1,006	1,990	2,032	2,639	3,097
90	1,006	1,987	2,028	2,632	3,086
100	1,005	1,984	2,025	2,626	3,077
150	1,003	1,976	2,017	2,609	3,051
200	1,003	1,972	2,013	2,601	3,038
1000	1,000	1,962	2,003	2,581	3,008
10000	1,000	1,960	2,000	2,576	3,001
100000	1,000	1,960	2,000	2,576	3,000

(*) Algumas vezes denominado de "fator de abrangência".

Fonte: Guerrero (2006).

Os valores indicados na tabela acima, coeficiente k, servem para cálculo do erro padrão da média que será visto a seguir. O número de graus de liberdade é N-1.

- **Incerteza de múltiplas medições**

A incerteza da medição considerando um conjunto de valores obtidos sobre as mesmas condições experimentais pode ser obtido através do cálculo do erro padrão da média.

$$\Delta \bar{x} = \sigma_m = \frac{Z\sigma}{\sqrt{N}}$$

(Eq. A6)

Onde Z é o fator que multiplica σ na Tabela A1.1, e pode ser substituído pelo fator k, figura A6, se for utilizado a distribuição *t de Student*.

- **Incerteza de medição única**

No caso de apenas uma medição ser possível as incertezas existem algumas formas de mensurar o erro de uma medição:

- **Incerteza de Resolução:** utilizada para grandezas físicas estáveis, é computada como a metade da menor divisão da escala.

- Incerteza de calibração: é a incerteza do instrumento de medição, calculada em laboratório e disponível nas especificações do dispositivo.
- Incerteza relativa: é a razão entre a incerteza absoluta e o valor da medida realizada.

- **Propagação de incertezas**

Muitas vezes as medidas que realizamos em um experimento não são os valores finais que desejamos encontrar, ou seja, às vezes precisamos de relações físico-matemáticas, como Lei de Fourier, Lei dos gases perfeitos, Segunda lei de Newton. Neste caso, as incertezas medidas experimentalmente se propagam através dos cálculos, resultando em uma incerteza secundária. De acordo com anotações de aula de Guerrero (2006), será apresentado um procedimento geral para cálculo da propagação de incertezas.

Sejam X_1, X_2, \dots, X_n , n grandezas físicas determinadas de forma experimental, as incertezas relativas de cada grandeza pode ser representada por: $u_{rel}(X_i)$, com $i = 1 \Rightarrow n$. Se deseja-se obter o valor de uma grandeza R onde R é função das grandezas X_i , o efeito das incertezas de medição de X_i sobre o valor de R pode ser dado pela equação A7.

$$u(R) = \frac{\partial R}{\partial X_i} u(X_i)$$

(Eq. A7)

Para obter a incerteza relativa vamos normalizar em relação a R e obter:

$$\frac{u(R)}{R} = \frac{\partial R}{\partial X_i} \frac{u(X_i)}{R}$$

(Eq. A8)

Multiplicando e dividindo o lado direito da equação A8 por X_i encontraremos a incerteza relativa de R em função da incerteza relativa de X_i , equação A9.

$$\frac{u(R)}{R} = \frac{X_i}{R} \frac{\partial R}{\partial X_i} \frac{u(X_i)}{X_i} = \frac{X_i}{R} \frac{\partial R}{\partial X_i} u_{rel}(X_i)$$

(Eq. A9)

O efeito de todas as grandezas X_i sobre R pode ser encontrado pela equação A10, que representa a incerteza absoluta ou pela equação A11 que representa a incerteza relativa.

$$u(R) = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_1} u(X_1) \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial X_2} u(X_2) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial X_n} u(X_n) \right)^2 \right]^{0,5}$$

(Eq. A10)

$$u_{rel}(R) = \left[\left(\frac{X_1}{R} \frac{\partial R}{\partial X_1} \frac{u(X_1)}{R} \right)^2 + \left(\frac{X_2}{R} \frac{\partial R}{\partial X_2} \frac{u(X_2)}{R} \right)^2 + \dots + \left(\frac{X_n}{R} \frac{\partial R}{\partial X_n} \frac{u(X_n)}{R} \right)^2 \right]^{0,5}$$

(Eq. A11).

APÊNDICE B - CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

Para medições precisas e erros controlados os instrumentos de medição de temperatura devem ser calibrados. Calibração é um procedimento experimental através do qual são estabelecidas, sob condições específicas, as relações entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões. O resultado de uma calibração permite tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações, como a determinação das correções a serem aplicadas. Uma calibração também pode determinar outras propriedades metrológicas como, por exemplo, os efeitos das grandezas de influência sobre a indicação, ou o comportamento metrológico de sistemas de medição em condições adversas de utilização.

Os termopares ou termoelementos são sensores de temperatura nos quais a forma de medição baseia-se no fato de que ao se conectar as extremidades de fios, necessariamente de materiais (ligas ou outros compostos) com propriedades termoe-létricas diferentes, e estas extremidades são mantidas a temperaturas distintas, gera-se uma força eletromotriz (diferença de potencial entre as extremidades) que induz uma corrente elétrica contínua no circuito. Este efeito que relaciona a tensão e as temperaturas T_1 e T_2 , das extremidades, é chamado de efeito Seebeck.

Tendo em vista a importância dos termopares e a precisão das temperaturas aferidas por eles neste trabalho, será descrito o experimento realizado no Laboratório de Sistemas Térmicos (LABTERMO) da Universidade Federal de Pernambuco, que consistiu na calibração de termopares tipo K (Níquel-Cromo (+) /Níquel-Alumínio (-)).

- **Métodos de calibração**

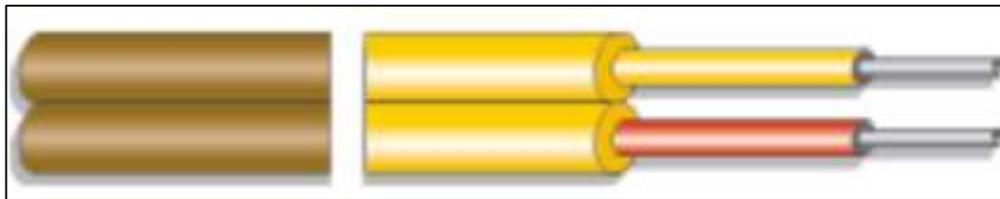
- Métodos absolutos: neste método o termopar é imerso em um meio com temperatura conhecida por meio de um fenômeno físico como, ponto de solidificação da água (formação de gelo).
- Método Comparativo: neste caso o termopar é imerso em meio uniforme juntamente com um sensor padrão ou de referência, e as medidas são comparadas.

O método comparativo foi escolhido para calibração dos termopares utilizados neste trabalho.

- **Termopares tipo K**

Conforme notas de aula de Guerrero (2006), os termopares são formados por diferentes pares termoelétricos padronizados e podem ser divididos em termopares de metal nobre (tipos R, S, B), que possuem platina na composição, e termopares de metal base (tipos K, J, E, T), que contêm níquel. Os termopares tipo K são termopares de Cromel Alumel, sendo o polo positivo composto por Níquel-Cromo e o negativo por Níquel-Alumínio. Para facilitar a identificação de cada elemento os fios são de duas cores distintas, sendo amarelo (+) e vermelho (-), figura B1. O fio positivo de Níquel-Cromo é conhecido comercialmente por Cromel e o negativo, de Cromo-Alumínio, por Alumel que é uma liga de Níquel, Alumínio, Manganês e Silício.

Figura B1- Imagem representativa do Termopar tipo K.



(Fonte: Guerrero (2006))

Estes termopares são recomendados para uso em atmosferas oxidantes ou inertes dentro de sua faixa de trabalho. Tem maior resistência a oxidação que os termopares tipo T, J e E, e por isso são largamente utilizados em temperaturas superiores a 540°C. Não é indicado para atmosferas redutoras, sulfurosas e aplicações em linha de vácuo. É o termopar mais utilizado na indústria em geral pela ampla faixa de trabalho, até 1200°C.

- **Meio de imersão**

Neste estudo utilizou-se o forno com dois blocos de calibração independentes ECIL BAT com range de temperatura de (-50°C da temperatura ambiente a 1200°C), figura B2

Figura B2 - Forno utilizado como referência na calibração dos termopares.



Fonte: Autora (2018).

O experimento foi realizado da seguinte forma: primeiramente foi definida a faixa de temperaturas na qual os termopares iriam ser calibrados (0°C a 50°C); esta foi dividida em 6 pontos, obtendo assim as temperaturas nas quais ocorreriam as medições, 0°C , 10°C , 20°C , 30°C , 40°C e 50°C ; para cada uma das temperaturas de calibração definidas, configurou-se a temperatura do forno e em seguida foi colocado o termopar conectado ao Datalogger (*Dataloggers Extech 421509*) para atingirem o estado permanente do sistema, figura B3; assim que esse regime foi alcançado foi realizada a primeira medição, então se esperou 5 minutos e foi realizada a segunda medição, depois o mesmo procedimento para realizar a terceira medição.

Figura B3 - Forno utilizado como referência na calibração dos termopares.



Fonte: Autora (2018).

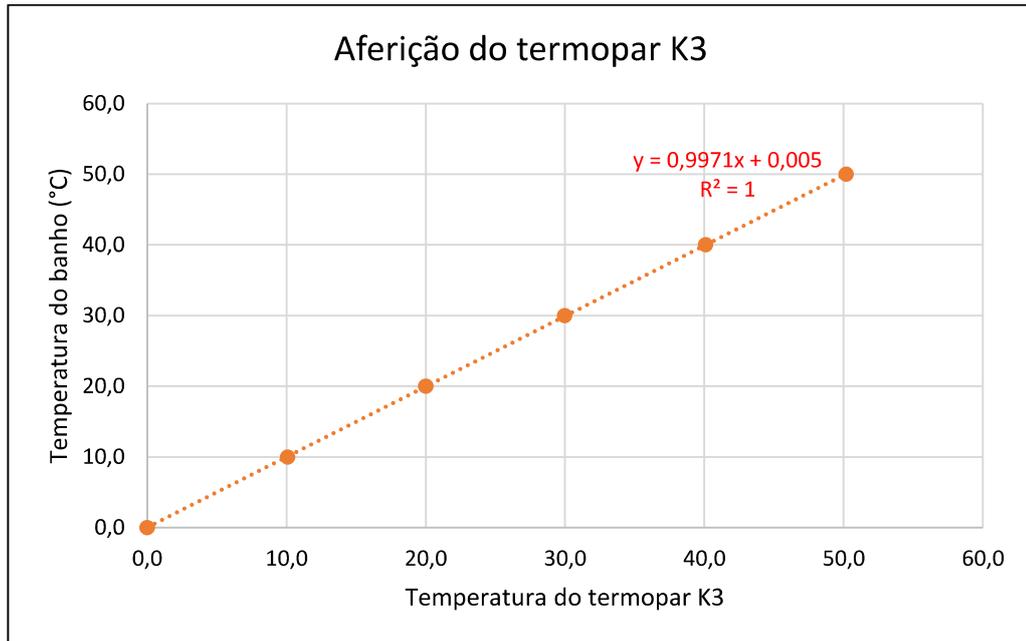
As medições realizadas durante a calibração dos 05 termopares em conjunto com os 03 Dataloggers estão disponíveis na Tabela B1.

Tabela B1 - Dados aferidos na calibração.

HORA	PADRÃO (°C)	K1 (°C)	K2(°C)	K3(°C)	K4(°C)	K5(°C)
11:22	0,0	-0,2	-0,1	0,0	-0,1	-0,1
11:27	0,0	-0,2	0,0	0,0	0,0	-0,1
11:32	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1
11:46	10,0	9,9	10,0	10,1	10,0	10,0
11:51	10,0	9,9	10,0	10,1	10,0	10,0
11:56	10,0	9,9	10,0	10,1	10,0	10,0
12:09	20,0	19,8	19,9	20,0	19,9	19,9
12:14	20,0	19,8	19,9	20,0	19,9	19,9
12:19	20,0	19,8	19,9	20,0	19,9	19,9
12:30	30,0	29,8	30	30	29,9	29,9
12:35	30,0	29,8	29,9	30	29,9	29,9
12:40	30,0	29,8	30	30	29,9	29,9
12:54	40,0	39,9	40,1	40,1	39,9	40,0
12:59	40,0	39,9	40,1	40,1	39,9	40,0
13:04	40,0	39,9	40	40,1	39,9	40,0
13:15	50,0	50,0	50,2	50,2	50,0	50,1
13:20	50,0	50,0	50,2	50,2	50,0	50,1
13:25	50,0	50,0	50,2	50,2	50,0	50,1

Os dados coletados são colocados num gráfico de dispersão com ajuste de curva no Excel, figura B4. Os valores medidos pelos termopares compõem o eixo 'x' e os valores constantes no padrão no eixo 'y'. A curva de melhor ajuste foi de caráter linear com R quadrado de 1. O mesmo procedimento é repetido para todos os 05 termopares.

Figura B4 - Forno utilizado como referência na calibração dos termopares.



Fonte: Autora (2018).