



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

Francisco Geraldo de Melo Pinheiro

Um Novo Contador de Núcleos de Condensação de Nuvens Baseado em Técnicas de Visão Computacional

FORTALEZA – CEARÁ
ABRIL 2011

FRANCISCO GERALDO DE MELO PINHEIRO

**Um Novo Contador de Núcleos de Condensação de Nuvens
Baseado em Técnicas de Visão Computacional**

*Tese de Doutorado apresentada à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia de Teleinformática**.*

Área de Concentração: Sinais e Sistemas

Orientador : Prof. Dr. Paulo César Cortez

Co-orientador : Prof. Dr. João César Moura Mota

FORTALEZA – CEARÁ

ABRIL 2011

Dedico este trabalho a minha tão querida e muito amada esposa Diana Célia que,
com muita sabedoria, me ensinou como tornar sonhos em realidade.
A minha filha Ana Débora e ao meu filho João Francisco que iluminam e alegram
os caminhos minha vida.

Ao meu pai Geraldo (em memória) que mostrou, com exemplos, como ser filho, pai e amigo. À minha mãe Filomena e à minha irmã Roseangela pela alegria contagiantes. Aos meus irmãos Paulo Roberto e Simone Geraldine que mesmo distantes me incentivaram na realização deste trabalho.

Agradecimentos

Quero expressar meus sinceros agradecimentos ao Professor Paulo César Cortez pela sua inestimável orientação, amizade, exemplo de dedicação à ciência e que com sua experiência e paciência tornou possível a realização deste trabalho.

Ao Professor João César Moura Mota, por seu constante incentivo, amizade, orientação e que sempre apostou no meu desenvolvimento científico.

Ao Professor Carlos Jacinto de Oliveira que não economizou esforços no apoio ao desenvolvimento deste trabalho principalmente nas horas mais críticas, em especial no meu afastamento das atividades docentes na Universidade Estadual do Ceará bem como em meu estágio no Max-Planck-Institute for Chemistry da Universidade de Mainz-Alemanha.

Ao Professor Stephan Borrmann, diretor do Departamento de Química de Partículas do Max-Planck-Institute for Chemistry, por sua amizade e apoio decisivo para a realização dos experimentos.

Não posso deixar de agradecer aos meus novos amigos Johannes Schneider, Julia Schmale, Paul Reitz, Friederike Freutel, Miklos Szakall, Frank Drewnick, Stéphane Gallavardin, Johannes Fachinger, Katja Dzepina, Karin Sulsky, Rosemarie Gross, pelo valioso apoio técnico, e que com amizade tornaram menos difíceis os quatro meses que passei longe de minha casa.

Ao Professor Humberto Carmona, por sua amizade, incentivo e valiosas críticas e sugestões na composição deste trabalho.

Aos companheiros de doutorado do Laboratório de Teleinformática, John Hebert da Silva Felix, Auzuir Ripardo Alexandria e Rodrigo Carvalho Sousa Costa, pelas sugestões e ideias ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Gerson Paiva Almeida pelo apoio e sugestões.

Ao amigo Manuel Pereira pelo incentivo, pelas suas ideias que demonstram toda

a sua criatividade.

Aos professores do Colegiado do Curso de Física da Universidade Estadual do Ceará que, com sacrifício próprio, apoiaram este trabalho substituindo-me nas minhas tarefas docentes.

Ao Max-Planck-Institute for Chemistry pela oportunidade de desenvolver parte essencial do meu trabalho em seus laboratórios.

À Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME e à Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP pelo apoio financeiro no desenvolvimento do protótipo do CCNC-SDCC, objeto deste trabalho.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP pela bolsa concedida que possibilitou minha temporada no Max-Planck-Institute for Chemistry.

Aos meus pais, Geraldo Pinheiro e Filomena, que não mediram esforços na educação de seus filhos.

À minha avó, Geralda (em memória), pelo carinho e amor a mim dedicados.

A Deus por tudo.

"Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, e não tivesse amor, seria
como o metal que soa ou como o sino que tine.

E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a
ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes,
e não tivesse amor, nada seria.

E ainda que distribuísse toda a minha fortuna para sustento dos pobres, e ainda
que entregasse o meu corpo para ser queimado, e não tivesse amor, nada disso me
aproveitaria.

O amor é sofredor, é benigno; o amor não é invejoso; o amor não trata com
leviandade, não se ensoberbece.

Não se porta com indecência, não busca os seus interesses, não se irrita, não
suspeita mal;

Não folga com a injustiça, mas folga com a verdade;

Tudo sofre, tudo crê, tudo espera, tudo suporta.

O amor nunca falha; mas havendo profecias, serão aniquiladas; havendo línguas,
cessarão; havendo ciência, desaparecerá;

Porque, em parte, conhecemos, e em parte profetizamos;

Mas, quando vier o que é perfeito, então o que o é em parte será aniquilado.

Quando eu era menino, falava como menino, sentia como menino, discorria como
menino, mas, logo que cheguei a ser homem, acabei com as coisas de menino.

Porque agora vemos por espelho em enigma, mas então veremos face a face; agora
conheço em parte, mas então conhecerei como também sou conhecido.

Agora, pois, permanecem a fé, a esperança e o amor, estes três, mas o maior destes
é o amor."

Coríntios I, cap. 13; vers. 1 a 13 .

Resumo

Esta Tese propõe um novo contador estático de núcleos de condensação de nuvens baseado em técnicas de visão computacional. O processo concebido nesse novo contador consiste na captura de uma amostra do ar atmosférico dentro de uma câmara de nuvens estática supersaturada de vapor de água, produzindo gotículas de água. Essas gotículas, ao caírem por gravidade, cruzam um feixe de LASER que define um volume de amostragem, tornando-as visíveis. Uma série de imagens deste processo é digitalizada e processada para permitir a contagem das gotículas presentes nesse volume de amostragem. Tais gotículas são automaticamente contadas por um sistema de visão computacional composto por técnicas de binarização por limiar, transformada de distância e transformada watershed. Esse volume de amostragem é calculado através de uma nova metodologia proposta nesta tese. Essa metodologia torna desnecessária a realização de complexos procedimentos de calibração do contador desenvolvido bem como de outros similares. Um protótipo foi montado e experimentos baseados na comparação entre instrumentos foram realizados. Os resultados indicam que os procedimentos aplicados são adequados na determinação da concentração dos núcleos de condensação de nuvens e que o equipamento desenvolvido pode ser usado em altas concentrações, situação em que outros equipamentos equivalentes não são confiáveis, devido ao efeito da sobreposição de gotículas nas imagens analisadas. Além disso, a resolução temporal foi significativamente melhorada e a intensa utilização da eletrônica digital também permitiu a redução de volume, de peso e de consumo de energia deste protótipo.

Palavras-chaves: transformada *watershed*; transformada de distância; processamento de imagens digitais; aerossol atmosférico; instrumentação meteorológica.

Abstract

This Thesis proposes a new static cloud condensation nuclei counter based on computer vision techniques. This process involves capturing a sample of atmospheric air inside a static cloud chamber supersaturated of water vapor, producing water droplets. These water droplets fall by gravity and cross a laser beam, which define a sampling volume, making them visible. A serie of images of this process is digitalized and processed to determine the number of the droplets present in the sampling volume. These droplets are counted automatically by a computer vision system which uses three techniques: binarization by threshold, distance transform and watershed transform. The sampling volume is calculated using a new methodology, proposed in this thesis. This new methodology makes it unnecessary the use of sophisticated procedures to calibrate the developed counter. A prototype was assembled and experiments based on a comparison of those instruments were performed. The results indicate that the procedures developed are appropriate to determine the concentration of cloud condensation nuclei and that the developed device can be used in high concentrations, where equivalent products are unreliable due to the effect of overlapping droplets in the images analyzed. Moreover, the temporal resolution has been significantly improved and the intense use of digital electronics also allowed the reduction of volume, weight and power consumption of this prototype.

Keywords: watershed transform; distance transform; digital image processing; atmospheric aerosol; meteorological instrumentation.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Organização da Tese	5
2 Contadores de Núcleos de Condensação de Nuvens	6
2.1 CCNC-WYO	7
2.2 CCNC-CFDC	11
2.3 CCNC-FUKUTA/SAXENA	13
2.4 CCNC-Chuang	14
2.5 CCNC-Peter	16
2.6 O CCNC-MPI-Chemie	17
3 Novo Contador de Núcleos de Condensação de Nuvens - CCNC-SDCC	19
3.1 Descrição do Hardware	20
3.2 Controle da Supersaturação	22
3.2.1 Unidade de controle	26
3.2.2 Software CCNC-SDCC ver1.0	27
3.3 Descrição dos algoritmos usados no CCNC-SDCC proposto	29
3.3.1 Conceitos básicos de processamento digital de imagens	30
3.3.2 Técnica proposta	33
3.4 Determinação do volume de amostragem da câmara de nuvens	35
4 Resultados	39
4.1 Resultados do Sistema de Visão Computacional	39
4.2 Metodologia para avaliação de desempenho do CCNC-SDCC em bancada	42
4.2.1 Aspectos práticos do processo de comparação	45

4.3	Resultados da comparação entre o CCNC-SDCC e o CPC	47
4.4	Aspectos mecânicos e elétricos	50
5	Conclusões, contribuições e trabalhos futuros	54
Apêndice A	Aerossóis	57
A.1	Núcleos de Condensação de Nuvens	58
A.2	Medidas Aerotransportadas	59
A.3	Relação entre CCN e Gotículas de Nuvens	60
Apêndice B	Bancada geradora de Aerossóis	63
B.0.1	Prevenindo perda de partículas por deposição eletrostática . .	64
Apêndice C	Incertezas	69
Apêndice D	Diagrama elétrico do CCNC-SDCC	73
Referências Bibliográficas		75

Lista de Figuras

2.1	perfil vertical de temperatura, (a) pressão; (b) de supersaturação; (c) dentro da câmara de nuvens.	9
2.2	diagrama esquemático do CCNC-WYO, (a) vista superior da câmara de nuvens; (b) vista lateral.	12
2.3	diagrama esquemático da câmara do CCNC-CFDC.	13
2.4	diagrama esquemático do CCNC proposto por Fukuta e Saxena. . . .	14
2.5	diagrama esquemático da câmara de difusão de Chuang.	15
2.6	diagrama esquemático da CCNC-Peter.	17
2.7	diagrama esquemático do CCNC do Max Plank Institute.	18
3.1	desenho da nova câmara de nuvens.	21
3.2	diagrama esquemático do novo CCNC.	22
3.3	detalhes da câmara do CCNC-SDCC.	23
3.4	diagrama de blocos do hardware de controle das pastilhas termo-elétricas.	26
3.5	tela principal do CCNC-SDCC.	28
3.6	tela de serviço.	28
3.7	tela de configuração operacional.	29
3.8	exemplos de vizinhança tipo 4(a), tipo 8(b) e elemento conectado(c). .	31
3.9	(a) objeto branco, (b) resultado da transformação de distância. . . .	32
3.10	transformada <i>Watershed</i> - inundação em andamento.	34
3.11	diagrama de blocos da técnica proposta e as saídas correspondentes a cada processo.	34
3.12	imagens do processo de calibração, (a) papel milimetrado no centro da câmara de nuvens; (b) gotículas dentro da câmara de nuvens; (c) resultado de 2000 imagens sobrepostas.	37
3.13	gráfico de distribuição de <i>pixels</i> brancos (valor 1) ao longo da altura da imagem.	37
4.1	15 gotas (528 gotas/cm ³).	40
4.2	48 gotas (1616 gotas/cm ³).	40
4.3	83 gotas (2774 gotas/cm ³).	41
4.4	124 gotas (4129 gotas/cm ³).	41

4.5	191 gotas (6342 gotas/cm ³).	41
4.6	resultado do CCNC-SDCC com gotas sobrepostas. (a) Imagem resultante do processo de segmentação com expansão de uma região. (b) Representação da região expandida com a identificação da gotas. .	43
4.7	bancada geradora de aerossóis.	44
4.8	variação da concentração da bancada geradora de aerossóis.	46
4.9	concentração medida pelo CPC, destacando-se as regiões usadas na medição (a) e descartadas (b).	47
4.10	correlação entre CPC e CCNC-SDCC utilizando aerossóis monodispersivo de sulfato de amônia com diâmetro de 300 nm (297 pontos medidos).	48
4.11	correlação entre CPC e CCNC-SDCC utilizando aerossol monodispersivo de sulfato de amônia com diâmetro de 100 nm (55 pontos medidos).	49
4.12	comparação da dispersão dos dados entre CPC e o CCNC-SDCC utilizando aerossóis monodispersivo de sulfato de amônia com diâmetro de 100 nm.	49
4.13	dispersão dos dados do CPC (a) e do CCNC (b) em relação às suas linhas de tendência.	50
4.14	protótipo do CCNC-SDCC.	52
4.15	vista frontal dos dois CCNCs.	52
4.16	vista superior dos dois CCNCs.	53
A.1	concentração média, por mg de ar (1 cm ³ a 20°C e 840mb), de CCNs ativados na supersaturação de 0,35% em relação a altitude.	60
A.2	Crescimento de núcleos de cloreto sódio de massas diferentes em função do raio do núcleo e da supersaturação.	62
B.1	filtro para remoção de gotas de óleo, água e particulados (TSI3074B). .	64
B.2	diagrama esquemático do atomizador (TSI3076).	65
B.3	secador (TSI3062).	66
B.4	contador de partículas condensáveis CPC (TSI 3025A).	66
B.5	classificador eletrostático (TSI 3080).	67
B.6	vista geral da bancada (TSI 3080).	67
B.7	perdas em função do tipo de duto.	68
C.1	papel milimetrado posicionado dentro da câmara de nuvens.	70
C.2	fotografia do papel milimetrado tirada pela câmera do CCNC-SDCC para calibração considerando o erro da relação <i>pixel</i> /milímetro devido ao erro de posicionamento dentro da câmara de nuvens.	70
D.1	diagrama elétrico da unidade de controle do CCNC-SDCC.	74

Lista de Tabelas

3.1	resultados estatísticos para os dois sensores de temperatura DS18B20-PAR.	25
4.1	comparação entre CCNC-SDCC e o CCNC-WYO.	51
B.1	comparação entre concentrações medidas realizadas por dutos de aço e plástico	65
C.1	parâmetros e suas incertezas	72

Capítulo 1

Introdução

O homem, desde os primórdios de sua existência, sempre buscou compreender o comportamento do clima da Terra. Estudos geológicos, em diversas regiões do planeta, mostram, com muita segurança, que o clima não é estável. Grandes regiões que atualmente são desertos já foram, em tempos remotos, regiões tropicais e vice-versa. Pode-se afirmar, portanto, que o clima da Terra tem um comportamento dinâmico.

Na atmosfera da Terra são encontradas partículas e componentes químicos de origem natural e antropogênica. Estes elementos, suspensos na atmosfera, chamados de aerossóis atmosféricos, juntamente com a energia solar, a energia geotérmica e com as condições dos oceanos criam um conjunto de fatores que modulam o clima da Terra (????).

Estudos recentes indicam que uma mudança climática em escala global está ocorrendo em um ritmo jamais observado (??). Suas conseqüências já são sentidas em diversas partes do planeta. As razões para tal mudança são diagnosticadas e apresentadas no documento “Climate Change 2007: The Physical Science Basis” (??). A forte presença de aerossóis de origem antropogênica na atmosfera da Terra é apontada como uma das causas. Entretanto, outros pesquisadores concluem que a alteração climática que se observa atualmente é natural e não está relacionada com fatores antropogênicos (????).

Nos últimos anos, com o avanço da fronteira agrícola no Brasil em especial nas regiões Norte e Centro Oeste, vem sendo praticadas queimadas indiscriminadas que lançam na atmosfera uma quantidade brutal de aerossóis provocando uma redução

no tamanho das gotas de nuvens o que por sua vez potencializa uma mudança no ciclo hidrológico da região (????).

Diante deste quadro, diversas instituições voltadas a pesquisas atmosféricas vêm ampliando seus laboratórios e estão investindo em ferramentas computacionais e equipamentos para melhorar a compreensão dos fenômenos atmosféricos. Podem-se apontar três importantes objetivos nestes estudos: o primeiro é prever, com uma boa antecedência e com uma alta resolução espacial, eventos atmosféricos severos como chuvas intensas, furacões e tornados tornando mais efetivas e precisas as ações emergenciais; o segundo, trata-se de determinar como deve ser o clima em cada região do planeta nas próximas décadas ou séculos norteando dessa forma, ações governamentais de longo prazo; o terceiro, mas não menos importante, é determinar se existe um fator antropogênico nesse fenômeno.

O aprofundamento do conhecimento na área das ciências atmosféricas, tem recebido, portanto, muita atenção não só de governos mas também da iniciativa privada por causa dos fortes impactos sócio-econômicos para as regiões do globo fortemente afetadas pela rápida mudança climática global.

Para entender melhor os processos físico-químicos, relacionados à atmosfera, medidas de campo vêm sendo sistematicamente realizadas e modelos matemáticos de funcionamento da atmosfera são desenvolvidos e aperfeiçoados. Assim, para dar suporte a estes modelos, instrumentos tais como sondas espectrométricas, espectrômetros de massa, contadores de água líquida, medidores de concentração de aerossóis, entre outros, também vêm sendo desenvolvidos e aperfeiçoados para medidas diretas. Não se pode deixar de mencionar outros instrumentos, sendo que estes, para medidas indiretas, a partir das mais variadas técnicas de sensoriamento remoto como os radares instalados, tanto na superfície da terra quanto aqueles embarcados em satélites.

Dentro desse contexto, um instrumento está ganhando destaque, devido a importância que é dada ao parâmetro medido. Trata-se do Contador de Núcleos de Condensação de Nuvens (CCNC, sigla em inglês para *Cloud Condensation Nuclei Counter*). Esse é um instrumento especialmente desenvolvido para medir a concentração de uma classe especial de aerossóis chamados de núcleos de condensação de nuvens (CCN - *Cloud Condensation Nuclei*). O CCN presente na atmosfera, seja por motivos naturais e/ou antropogênicos, participa de forma decisiva na gênese, evolução e precipitação, ou não, de uma nuvem e nas

propriedades radiativas, tanto das nuvens quanto da atmosfera na sua totalidade. Assim sendo, a medida da concentração dos CCN é fundamental para compreensão do comportamento das nuvens e consequentemente do clima da Terra (????????).

O princípio de funcionamento do CCNC, baseado na Câmara de Wilson, consiste em tornar o núcleo de condensação opticamente detectável e contar sua quantidade dentro de um volume determinado. Isto é conseguido expondo o aerossol, ou seja o CCN, a uma atmosfera supersaturada de vapor de água dentro de uma câmara. Nessa condição, o vapor condensa sobre a superfície do aerossol, gerando uma gotícula de água (??). Nesse processo, parte-se do princípio que uma gotícula de água é formada por um único aerossol.

Diversos contadores de CCN (CCNC) já foram desenvolvidos, sendo eles divididos entre os de fluxo contínuo e os estáticos, dependendo da cinética da parcela da atmosfera dentro do instrumento. Nenes et al. estudaram teoricamente o comportamento de quatro tipos destes instrumentos (??). No caso do presente trabalho, o CCNC é do tipo estático sendo baseado na câmara de nuvens estática por difusão (SDCC - *Static Diffusion Cloud Chamber*).

1.1 Justificativa

Nos primeiros CCNC-SDCC que foram desenvolvidos a concentração de gotículas é obtida através da contagem visual direta usando técnicas fotográficas mas, posteriormente, técnicas para medir o espalhamento de luz foram inseridas, permitindo a automatização do processo (????). A técnica fotográfica de análise visual direta tem limitações claras, como a de se analisar milhares de fotos manualmente. As técnicas de espalhamento são baseadas na existência de uma relação entre a concentração de partículas e a intensidade da luz espalhada quando essas são iluminadas por um feixe de LASER. Essa relação, entretanto, é bastante complexa, tornando-se necessário a utilização de equações empíricas com coeficientes a serem determinados experimentalmente. Além disso, essa técnica introduz incertezas intrínsecas associadas ao fato de que o espalhamento de luz depende não somente da concentração das partículas, mas também das "seções de choques" e, portanto, da geometria de cada partícula no caminho do feixe (??). Outra questão importante é o ruído intrínseco ao sistema eletrônico de fotodetecção que deteriora a relação sinal ruído, principalmente em situações de baixa concentração (??).

Os equipamentos mais modernos incorporam análise fotográfica associada a

processamento digital de imagens. Nesse contexto, técnicas de visão computacional, como por exemplo binarização, podem realizar essa tarefa. Entretanto, este processo de contagem individual impõe limites em casos de alta concentração de aerossóis (gotículas). Isso é devido a taxa de sobreposição de gotículas em uma imagem que normalmente ocorre em concentrações elevadas de aerossóis. Para evitar este problema, a concentração máxima de partículas que se sugere é de $3000/\text{cm}^3$ (??). Entretanto, alguns trabalhos práticos mostram claramente que as medidas são acuradas somente até concentrações de $600/\text{cm}^3$ (??), que são muito baixas em comparação com as concentrações encontradas em muitas situações que atualmente são de interesse (??).

A técnica de diluição de amostras em ar limpo é uma opção a ser considerada nos casos de alta concentração, mas exige a utilização de equipamentos específicos e torna a medida mais lenta.

Técnicas de visão computacional mais elaboradas podem ser adicionadas a binarização para permitir a detecção de gotas sobrepostas, podendo aumentar consideravelmente o limite máximo da concentração de partículas que pode ser medida.

Na presente tese propõe-se um sistema de visão computacional que envolve, principalmente, binarização, transformada de distância e transformada *watershed* na determinação do número de CCN em um CCNC de câmara de nuvens estática por difusão (CCNC-SDCC). Além disto, também é proposta uma nova metodologia de calibração para o CCNC-SDCC.

1.2 Objetivos

Esta tese objetiva desenvolver um novo contador de núcleos de condensação de nuvens baseado na câmara de difusão estática utilizando técnicas de visão computacional para contagem individual das gotas.

Durante o desenvolvimento desta tese, outros objetivos específicos são atingidos, destacando-se:

- ▶ aumento do limite máximo de concentração de núcleos de condensação de nuvens que pode ser medido pelo CCNC-SDCC;
- ▶ desenvolvimento de um protótipo com reduzido consumo de energia, baixo

peso e de dimensões pequenas quando comparado com outros equipamentos equivalentes;

- ▶ proposição de uma nova metodologia de calibração para o CCNC;
- ▶ caracterização do funcionamento do CCNC-SDCC através de testes de bancada.

1.3 Organização da Tese

Esta Tese encontra-se organizada numa estrutura de 5 capítulos e 4 apêndices.

No Capítulo 1, de introdução, é contextualizada a importância do contador de núcleos de condensação de nuvens dentro das ciências atmosféricas na atualidade. A justificativa e os objetivos da Tese também são colocados neste capítulo.

No Capítulo 2 são apresentados seis contadores de núcleos de condensação de nuvens que foram desenvolvidos e/ou aperfeiçoados ao longo dos anos por diversos pesquisadores.

No Capítulo 3 é descrito o CCNC-SDCC proposto tanto no aspecto do *hardware* quanto do *software*. A metodologia de calibração do volume de amostragem do CCNC-SDCC também é mostrada.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da segmentação de gotículas dentro da câmara de nuvens, a metodologia empregada para avaliação global do CCNC-SDCC e os resultados dessa avaliação.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões, as contribuições e são propostos trabalhos futuros.

No apêndice A são descritos os aerossóis atmosféricos, bem como apresenta sua relação com as gotículas de nuvens. No apêndice B, a bancada de testes e seus equipamentos são apresentados. No apêndice C, as incertezas associadas a medida do volume de amostragem e que interferem diretamente no desempenho do CCNC-SDCC são identificadas e calculadas. Por fim, o diagrama elétrico do CCNC-SDCC é apresentado no apêndice D.

Capítulo 2

Contadores de Núcleos de Condensação de Nuvens

Os CCNs, por serem muito pequenos, com uma ordem de grandeza de 10^{-9} m exigem métodos indiretos de detecção, sendo que a técnica mais utilizada ainda é a mesma que foi desenvolvida por Wilson em 1911 para rastrear partículas ionizadas. Essa técnica, essencialmente, consiste em tornar as partículas opticamente detectáveis (????).

Os núcleos de condensação de nuvens, quando são expostos a uma atmosfera supersaturada de vapor de água (umidade relativa maior do que 100%), experimentam a condensação desse vapor na sua superfície transformando-se em gotículas de água que, por sua vez, são facilmente detectáveis por sensores ópticos.

Diversos contadores de CCNs (CCNC) já foram desenvolvidos, podendo ser divididos entre os de fluxo contínuo e os de fluxo estático, dependendo da cinética da parcela da atmosfera dentro do instrumento, destacando-se os CCNCs que são descritos a seguir: CCNC-WYO, CCNC-CFDC, CCNC-Fukuta/Saxena, CCNC-Chuang, CCNC-Peter e CCNC-MPI-Chemie.

2.1 CCNC-WYO

O CCNC-WYO foi desenvolvido no Departamento de Ciências da Atmosfera da Universidade do Wyoming - EUA. Estruturado na câmara de nuvens de difusão térmica estática de placas paralelas, este equipamento é utilizado há décadas.

Langsdorf, em 1939 (??) apresentou à comunidade científica uma versão dessa tecnologia de câmara com a finalidade de detectar partículas ionizadas e esta tecnologia obedece ao mesmo princípio da Câmara de Wilson. Entretanto, é Twomey (??) que adapta essa câmara para a medida da concentração dos CCNs.

O princípio de funcionamento desse equipamento consiste em criar uma região de pressão parcial de vapor P_v maior do que a pressão de saturação de vapor d'água P_{sv} , na região central da câmara de nuvens, ou seja, uma umidade relativa, $UR = (P_v/P_{sv}) \cdot 100\%$, maior do que 100% nessa região. A pressão de saturação de vapor d'água é a pressão em que o vapor se liquefaz em condições ideais, sendo uma propriedade que depende da temperatura de forma não linear (??). Nessa condição de supersaturação positiva, $S = UR - 100\%$, gotículas se originam a partir da condensação do vapor de água na superfície dos CCNs presentes na câmara. Esse processo ocorre naturalmente na natureza e é chamado de nucleação heterogênea. Nessa situação se diz que os CCNs estão ativados.

O valor da supersaturação, dentro da câmara de nuvens, não é a mesma ao longo da sua altura z . A condição de supersaturação máxima, ocorre aproximadamente a meia altura da câmara e é obtida através da difusão de umidade, a partir das duas placas mantidas em diferentes temperaturas.

Os perfis estimados de temperatura T , pressão parcial de vapor P_v , de saturação de vapor P_{sv} e de supersaturação S na câmara de nuvens estão mostrados na Figura 2.1 e são calculados pelas seguintes expressões (????):

$$s(z) = \frac{P_v(z)}{P_{sv}} \cdot 100 - 100, \quad (2.1)$$

$$P_v(z) = \frac{P_{sv}(T_s) - P_{sv}(T_i)}{H} z + P_{sv}(T_i), \quad (2.2)$$

$$P_{sv}(T) = 0,61078 \exp \left(\frac{17,269T}{T + 237,3} \right), \quad (2.3)$$

$$T(z) = \frac{T_s - T_i}{H} z + T_i, \quad (2.4)$$

em que: $P_v(z)$ é a pressão parcial de vapor de água na altura z ; $P_{sv}(T)$ é a pressão de saturação de vapor; H é a altura da SDCC; T_s, T_i são respectivamente as temperaturas das tampas superior e inferior da câmara de nuvens e $T(z)$ é a temperatura na altura z .

Os perfis, mostrados na Figura 2.1, foram calculados considerando-se a temperatura da placa superior T_s de 22,37°C e a temperatura da placa inferior T_i de 17,51°C. Os gradientes constantes de temperatura e pressão (Figura 2.1 a e b) são presumidos a partir dos valores de temperatura medidos nas placas inferior e superior da câmara de nuvens e partem da suposição de que a pressão parcial de vapor nas regiões imediatamente próximas às placas é igual a pressão de saturação para as respectivas temperaturas.

Percebe-se na Figura 2.1 (c) que a curva de supersaturação dentro da câmara de nuvens, derivada a partir de P_v e P_{sv} , possui um perfil aproximadamente parabólico com o máximo à meia altura da câmara. Essa altura z , onde a supersaturação é máxima, é a região de interesse para análise, pois, é nessa região onde o maior número de CCNs presentes na câmara são ativados. Assim sendo, um feixe cilíndrico

Figura 2.1: perfil vertical de temperatura, (a) pressão; (b) de supersaturação; (c) dentro da câmara de nuvens.

de luz LASER ilumina as gotículas formadas nessa região, permitindo a sua detecção por sensores ópticos. No caso do CCNC-WYO, o valor da concentração de CCNs é obtido a partir da medição da intensidade da luz espalhada pelas gotículas ao atravessar a luz LASER.

As técnicas de espalhamento são largamente empregadas em medições indiretas de fenômenos atmosféricos tais como nuvens formadas por gotículas de água (??). No caso das medições dos CCNs, estas são baseadas na existência de uma relação entre a concentração de gotículas (partículas) e a intensidade da luz espalhada quando estas são iluminadas por um feixe de luz. Essa relação, entretanto, é complexa, tornando-se necessária a utilização de equações empíricas com coeficientes a serem

determinados experimentalmente (??) a partir da análise visual de fotografias. Além disso, essa metodologia introduz incertezas intrínsecas associadas ao fato de que o espalhamento de luz depende não somente da concentração das partículas, mas também das "seções de choque" e, portanto, da geometria de cada partícula no caminho do feixe (??). A distribuição angular do espalhamento da luz pode ser rigorosamente determinada em condições controladas (??). Entretanto, este não é o caso das medições dos CCNs na atmosfera, onde as características físicas e químicas das partículas são imprevisíveis. Outra questão importante é o ruído intrínseco ao sistema eletrônico de fotodetecção, nas suas mais diversas formas (térmico e/ou induzido), que deteriora a relação sinal ruído, principalmente em situações de baixa concentração (??).

O CCNC-WYO é constituído por um cilindro de 10,0 cm de diâmetro e 1,0 cm de altura, de parede lateral feita de material isolante térmico e impermeável. O gradiente de temperatura, necessário para se obter uma determinada supersaturação, é obtido a partir do controle da diferença de temperatura entre placas de alumínio que fecham as extremidades inferior e superior da cavidade cilíndrica. A placa inferior é acoplada a dois resfriadores estáticos (pastilhas Peltier) e o gradiente desejado é mantido através de um controlador de temperatura do tipo proporcional, integral e diferencial (PID). Papéis absorventes, aderidos nas placas de alumínio, são abastecidos por um reservatório de água destilada, mantendo uma umidade igualmente distribuída. O ar com os aerossóis que se deseja quantificar é admitido na câmara através do acionamento de uma bomba. Posteriormente à desativação da bomba a câmara de nuvens é selada. Nesse momento, ocorre um transitório de ativação de CCNs que deve ser descartado, até que o sistema entre em equilíbrio e se inicie o processo de ativação dos CCNs na supersaturação desejada.

O processo de ativação dos CCNs é, portanto, um processo dinâmico e a concentração na região de interesse cresce rapidamente, até que todos os CCNs

estejam ativados. Após este processo este número cai gradativamente, devido à ação da gravidade.

O diagrama esquemático do CCNC-WYO é apresentado na Figura 2.2. Na parte superior (a), destacam-se a vista superior da câmara de nuvens, uma fonte de luz LASER (635 nm), fotodetector para medição de luz espalhada além da bomba, válvulas e controlador que comanda a entrada de ar atmosférico para o interior da câmara de nuvens. Na parte inferior (b), destacam-se a vista lateral da câmara de nuvens, o posicionamento das pastilhas Peltier, o papel saturado com água, os sensores de temperatura, o controlador PID de temperatura e o reservatório de água.

2.2 CCNC-CFDC

O CCNC-CFDC (*Continuous Flow Parallel Plate Thermal Diffusion Chamber*) é baseado na câmara de difusão de placas paralelas mas de fluxo contínuo (??) e foi desenvolvido para superar as limitações e deficiências do CCNC do tipo estático. Pelo fato dessa alternativa de instrumento operar de modo contínuo, os efeitos transitórios, provocados pela abertura e fechamento de válvulas comuns na câmara de nuvens, não ocorrem. Isto favorece uma medição contínua da concentração de CCNs, ao mesmo tempo que, por sua vez, melhora a resolução temporal. Além disto, como a amostra é confinada no eixo axial da câmara, todos os CCNs são expostos ao mesmo valor de supersaturação. No que diz respeito ao limite inferior de supersaturação, este deve ficar acima de 0,1% pois, abaixo deste valor, uma gota de nuvem precisa de um tempo maior do que aquele disponível para sua passagem (queda) pela região (cilindro) de amostragem.

Na CFDC suas placas paralelas podem ser dispostas tanto na horizontal quanto na vertical. Quando as placas estão dispostas na horizontal, a queda de gotas, pela ação do campo gravitacional, limita o tempo durante o qual as gotas experimentam uma supersaturação uniforme.

Figura 2.2: diagrama esquemático do CCNC-WYO, (a) vista superior da câmara de nuvens; (b) vista lateral.

Na Figura 2.3 é apresentado um diagrama esquemático da câmara do CCNC-CFDC cujas dimensões são $100\text{ cm} \times 13,2\text{ cm}$, sendo que o diâmetro interno é de $1,0\text{ cm}$.

A idéia básica do CCNC-CFDC é expor um dado aerosol a um campo variável de supersaturação e inferir o espectro dos CCNs pela distribuição de tamanho de gotas em sua saída. Os CCNs com baixa supersaturação crítica são ativados, isto é, iniciam o processo de crescimento, numa região próxima da entrada da câmara de difusão. Portanto, estes têm mais tempo para crescer do que aqueles que possuem um alto valor de supersaturação crítica.

O sistema de medida da concentração no CCNC-CFDC é baseado no espalhamento de luz. Dessa forma, os problemas relativos à calibração apresentados pelo CCNC-WYO também estão presentes nessa tecnologia.

Figura 2.3: diagrama esquemático da câmara do CCNC-CFDC.

2.3 CCNC-FUKUTA/SAXENA

Fukuta e Saxena (??) propuseram uma modificação na CFDC. Nessa proposta, um gradiente de temperatura é gerado de forma perpendicular ao fluxo de CCNs. Isto faz com que as partículas, com o mesmo tempo de exposição dentro da câmara, experimentem diferentes supersaturações numa faixa de 0,15% a 1,2%. Assim, este instrumento pode ser visto como um conjunto de CFDC com diferentes temperaturas entre as placas, operando de forma paralela.

O CCNC-FUKUTA/SAXENA utiliza um sensor óptico da Climent Instruments modelo CI201 que, na realidade, é um analisador de partículas por nível de tensão de pulso. Assim sendo, como nos demais instrumentos que não usam processamento digital de imagens, ou que não possuem mecanismos de fotografia para posterior

contagem manual, um procedimento de calibração baseado na geração de aerossóis mono-dispersivos de concentrações conhecidas, se faz necessário.

Apesar do CCNC-FUKUTA/SAXENA apresentar uma evolução significativa em relação aos CCNCs anteriores, as dimensões da câmara de condensação ($83,8\text{ cm} \times 1,8\text{ cm} \times 19,1\text{ cm}$) e o seu peso maior (26 Kg) inviabilizam sua utilização em pequenas aeronaves, pois, exigem uma estrutura especial de montagem, conforme mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4: diagrama esquemático do CCNC proposto por Fukuta e Saxena.

2.4 CCNC-Chuang

O instrumento desenvolvido por Chuang et al (??), combina a técnica de fluxo de gradiente descrito por J.G. Hudson (??) e gradiente alternado de condensação descrito por Hoppel et al (??). A câmara de condensação consiste de uma coluna dividida em segmentos quentes e frios alternados como mostra a Figura

2.5. A diferença de temperatura aumenta ao longo do tubo, produzindo uma supersaturação crescente na direção do fluxo. Da mesma maneira que na câmara de FUKUTA, o espectro dos CCNs é estimado medindo-se o tamanho das gotas na saída do instrumento. No caso particular deste instrumento, embora a câmara de condensação tenha sido desenvolvida com uma preocupação importante relativa ao seu tamanho (24 cm de altura $\times 2,5\text{ cm}$ de lado), seus sistemas de apoio, tais como controle de temperatura, aquisição de dados, são de uso geral e embarcados em um computador pessoal, tornando-o um produto final grande e pesado. Entretanto, segundo Chuang, os resultados obtidos em laboratório são muito bons chegando a medir concentrações de gotículas de até $1400\text{ partículas/cm}^3$ (??).

Figura 2.5: diagrama esquemático da câmara de difusão de Chuang.

2.5 CCNC-Peter

O CCNC descrito nesta seção foi desenvolvido por Peter Otto e colaboradores (??) e foi apresentado em 2002. Trata-se de um CCNC de fluxo contínuo que implementa as técnicas de Fukuta e Saxena, sendo que utiliza três CCDs para a medida da concentração dos CCNs em três supersaturações diferentes. A câmara é orientada verticalmente de modo que o ar amostrado flui de forma laminar entre as placas. Uma das placas é mantida usualmente a uma temperatura $T_c = 20^\circ\text{C}$ e outras três mantidas nas temperaturas T_{wi} abaixo de T_c . O controle das supersaturações, a digitalização e o processamento digital das imagens são realizadas por um microcomputador. Na Figura 2.6 é mostrado um diagrama básico do sistema. Este sistema apresenta um avanço significativo em relação aos CCNCs anteriores, pois, já incorpora tecnologias baseadas em eletrônica digital e processamento digital de imagens, conferindo naturalmente ao sistema uma maior estabilidade e exatidão. Testes mostram uma boa correlação (99%) entre este CCNC e um CPC em uma faixa de 10 até 1000 partículas/ m^3 .

Entretanto, é um sistema exigente, pois, é necessária a manutenção da circulação de alguns mililitros por minuto de água nas placas. Além disto, essa água contém uma pequena quantidade ($7 \times 10^{-3} \text{mol/l}$) de timol, necessário para manter o interior da câmara livre de fungos. Outro fator de complexidade é a necessidade de dois fluxos de ar limpo próximos às placas de difusão de vapor para garantir que o ar amostrado se mantenha confinado na região de máxima supersaturação.

Figura 2.6: diagrama esquemático da CCNC-Peter.

2.6 O CCNC-MPI-Chemie

Há um CCNC similar ao descrito por Lala e Jiuisto (??), pertencente ao Instituto Max Plank para Química que, como no caso do CCNC-Peter, utiliza também a tecnologia digital, sendo que, ao invés de três CCDs, apenas uma é utilizada. A Figura 2.7 mostra o diagrama deste instrumento. Pelo fato deste CCNC utilizar uma câmara estática, os seus problemas são os mesmos encontrados no CCNC-WYO, no mínimo aqueles relacionados aos efeitos transitórios já descritos anteriormente.

O processamento digital de imagens, para contagem automática do número dos CCNs ativados, neste CCNC, considera a quantidade de objetos brancos e de *pixels* brancos na imagem para calcular a quantidade de gotículas (??). Correções empíricas são utilizadas para os casos de concentrações mais elevadas, onde o efeito de sobreposições de gotículas é mais acentuado. Essa técnica apresentou resultados razoáveis para concentrações abaixo de 600 cm^{-3} , mas para concentrações mais altas, encontradas em muitas situações de interesse, os resultados mostram uma subestimação sistemática do número de partículas ativadas (????).

Figura 2.7: diagrama esquemático do CCNC do Max Plank Institute.

Capítulo 3

Novo Contador de Núcleos de Condensação de Nuvens - CCNC-SDCC

Um novo contador de núcleos de condensação de nuvens baseado na câmara de difusão estática é proposto. Este CCNC utiliza técnicas de visão computacional para estimar a concentração de núcleos de condensação de nuvens presentes na atmosfera. O hardware do CCNC-SDCC apresentado segue uma configuração clássica, isto é, consiste de uma câmara com controle de diferença de temperatura entre as suas tampas que são mantidas úmidas (para possibilitar a supersaturação de vapor de água no seu interior), um sistema de bomba e válvulas para admissão do ar atmosférico, uma fonte de luz para iluminação dos aerossóis ativados (gotículas de água formadas) e um sistema de medição da concentração de aerossóis presentes no volume de amostragem, que por sua vez é definido por uma fonte de luz, no caso um LASER do tipo HeNe.

A descrição do CCNC-SDCC está dividida em duas partes: *hardware* e *software*. O CCNC-SDCC proposto, utiliza técnicas de visão computacional para medir a

concentração de aerossóis. As técnicas de binarização por limiar e transformada *watershed* são combinadas para medição da concentração dos aerossóis.

Uma metodologia inovadora para determinação do volume de amostragem também é apresentada. Essa metodologia dispensa a tradicional técnica de calibração baseada na comparação de medições com equipamentos de referência.

Nas seções seguintes são apresentados, em detalhes, o *hardware*, o *software* e a metodologia de calibração do volume de amostragem do CCNC-SDCC.

3.1 Descrição do Hardware

O principal elemento do CCNC-SDCC é a câmara estática de difusão térmica, conforme mostrado na Figura 3.1. Como descrito no Capítulo anterior, a câmara de nuvens, deste CCNC, possui uma parede (sua parte lateral) construída de um material de baixa condutividade térmica e impermeável; tampas são de alumínio (boa condutividade térmica) onde estão alojados sensores de temperatura. A tampa inferior é fixa na câmara e a tampa superior é facilmente removível para facilitar a manutenção interna, consistindo em remoção do excesso de água e/ou limpeza das janelas de entrada de luz LASER e filmagem. A distância entre as tampas, quando instaladas é de 1,0 cm e o interior da câmara de nuvens é cilíndrico com 10,0 cm de diâmetro, tendo portanto um volume interno de $78,5 \text{ cm}^3$. Essa câmara possui 8 faces que facilitam a instalação de diversos dispositivos como por exemplo: tubos para entrada e saída de ar, janelas para entrada de luz LASER, câmera fotográfica digital e outros sensores caso sejam necessários.

A função da câmara de nuvens é tornar o núcleo de condensação de nuvens, admitido em seu interior, opticamente detectável. Isto é conseguido supersaturando com vapor de água o seu interior. A finalidade deste vapor é condensar sobre os aerossóis, transformando-os em gotículas de água opticamente detectáveis quando iluminadas por uma fonte de luz. Para tal, uma infraestrutura de dispositivos

Figura 3.1: desenho da nova câmara de nuvens.

complementam a câmara de nuvens e que, por fim, compõem o CCNC propriamente dito.

O diagrama esquemático do CCNC-SDCC é apresentado na Figura 3.2. Na parte superior (a), destacam-se a vista superior da câmara de nuvens, uma fonte de luz LASER (635 nm), a câmera fotográfica digital para o registro das imagens além da bomba, válvulas e controlador que comanda a entrada de ar atmosférico para o interior da câmara de nuvens. Na parte inferior (b), destacam-se a vista lateral da câmara de nuvens, o posicionamento das pastilhas Peltier, o papel saturado com água, os sensores de temperatura, o controlador PID de temperatura e o reservatório de água.

Os detalhes da câmara de nuvens são mostrados em seis fotografias na Figura 3.3. Na Figura 3.3 (a) é mostrada a câmara de nuvens ainda desmontada com destaque para a lateral e para a tampa superior que é composta por dois discos de alumínio (tampa externa e tampa interna). Estes discos, quando juntos, acomodam entre si um tecido de algodão, cuja finalidade é armazenar água no interior da tampa para que essa possa ser liberada de forma gradativa por orifícios igualmente espaçados na face inferior da tampa. É importante ressaltar que um fino tecido de

algodão recobre o disco menor para garantir uma uniforme distribuição da água na superfície de alumínio, exposta no interior da câmara. Na Figura 3.3 (b) é mostrada a tampa superior montada, bem como a câmara. Na Figura 3.3 (c) destaca-se a câmera fotográfica fixada na lateral da câmara de nuvens. Na Figura 3.3 (d) é apresentada a câmara de nuvens e o seu reservatório de água. Por fim, na Figura 3.3 (e) visualiza-se a câmara de nuvens montada com sensores de temperatura, pastilha Peltier e o circuito eletrônico de controle pronto para testes.

Figura 3.2: diagrama esquemático do novo CCNC.

3.2 Controle da Supersaturação

Como reportado anteriormente, a supersaturação (o excesso de vapor) dentro da câmara de nuvens é obtida através da manutenção de umidade nas suas tampas inferior e superior, garantida por um reservatório de água externo à câmara, e da

(a) lateral da câmara e detalhes da tampa superior. (b) tampa superior e a câmara montadas.

(c) WEBCAN fixada na lateral da câmara. (d) câmara montada e o reservatório de água.

(e) a câmara e o circuito eletrônico de controle.

Figura 3.3: detalhes da câmara do CCNC-SDCC.

manutenção de uma diferença de temperatura entre as tampas inferior e superior da câmara.

A diferença de temperatura entre as tampas é mantida através do acionamento de um dispositivo termo-elétrico (também conhecido como pastilha Peltier), instalado na tampa inferior da câmara de nuvens. Nesse caso, são utilizadas duas pastilhas Peltier modelo DV-30-10 fabricados pela DANVIC. Quanto à tampa superior, esta somente possui um sensor de temperatura, sendo portanto, a sua temperatura a mesma do meio ambiente.

A medida da diferença de temperatura entre as tampas é realizada por dois sensores iguais fixados no centro das tampas inferior e superior da câmara de nuvens. Este sensor é o DS18B20-PAR fabricado pela Dallas Semiconductor e fornece o valor da temperatura na forma digital com 12 bits, com uma resolução de $0,0625^{\circ}\text{C}$ e com uma acurácia de $0,5^{\circ}\text{C}$. O valor da acurácia, garantida pelo fabricante é, em princípio, um fator restritivo ao seu uso, pois, segundo Frank et al (??) é necessário uma acurácia na medição da diferença de temperatura de no mínimo $0,1^{\circ}\text{C}$. Entretanto, considerando-se que é a diferença da temperatura o principal parâmetro a ser considerado, utilizou-se dois sensores idênticos.

Com o objetivo de se selecionar os sensores a serem utilizados, um experimento foi realizado para avaliar a dispersão dos valores medidos. Esse experimento consistiu em monitorar as medições de temperaturas por 2 horas e 27 minutos de dois sensores, instalados em uma mesma chapa de alumínio de 2,0 mm de espessura e com uma distância de 1,0 cm um do outro. Nesse experimento foram obtidos os resultados estatísticos apresentados na Tabela 3.1 a seguir.

O principal resultado apresentado na Tabela 3.1 são as diferenças de temperatura máxima e mínima entre os sensores, cujo valor obtido é $0,0625^{\circ}\text{C}$. Essa diferença garante medidas de diferença de temperatura abaixo de $0,1^{\circ}\text{C}$ necessários a um bom desempenho do CCNC-SDCC conforme é dito por Frank et al (??). Simulações

Tabela 3.1: resultados estatísticos para os dois sensores de temperatura DS18B20-PAR.

Parâmetro	Valor
Diferença média	0,0082
Diferença mínima	-0,0625
Diferença máxima	0,0625
Desvio padrão	0,03
Número de medições	8824

realizadas segundo as equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4, considerando-se a diferença máxima e absoluta medidas, mostram que o erro máximo no valor da supersaturação é menor do que 3%.

O circuito eletrônico, mostrado na Figura 3.4, indica como é realizado o controle da diferença de temperatura entre as tampas. Esse circuito consiste de um controle eletrônico de temperatura em malha fechada que se inicia a partir da escolha de uma determinada supersaturação de operação da câmara de nuvens, definida pelo operador, cujo valor é inserido através do PC. Em seguida, a partir do valor medido da temperatura da tampa superior (temperatura do meio ambiente) é calculada a temperatura da tampa inferior necessária para que se possa obter a supersaturação definida pelo operador conforme as expressões 2.1 a 2.4. Então, essa diferença é transferida ao microcontrolador (dsPIC30F4013) que, através de um sistema de controle clássico do tipo PID (Proporcional Integral Diferencial), gera um sinal do tipo PWM (*Pulse With Modulation*) para um conversor D/A de 1 bit. O sinal analógico aciona o amplificador de potência, configurado no modo inversor que, por sua vez, aciona as pastilhas Peltier.

Figura 3.4: diagrama de blocos do hardware de controle das pastilhas termo-elétricas.

3.2.1 Unidade de controle

A unidade de controle do CCNC-SDCC tem como núcleo o microcontrolador dsPIC30F4013. Esse microcontrolador, de alto desempenho, fabricado pela Microchip, possui uma arquitetura interna do tipo RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) e um *chipset* que o torna capaz de realizar tanto tarefas comuns a quaisquer microcontroladores, bem como de realizar cálculos específicos em processamento digital de sinais. Sua função é o acionamento das válvulas, bomba, leitura dos sensores de temperatura, geração de um sinal PWM para acionamento das pastilhas Peltier a partir de um controle PID e comunicação com um microcomputador para interface homem-máquina. O circuito eletrônico completo dessa unidade de controle, cujas dimensões são 15,0 cm x 10,0 cm, é mostrado no Anexo D. Esse circuito é bastante reduzido em número de dispositivos

eletrônicos se comparado com o circuito de controle do CCNC-WYO que possui 5 placas eletrônicas. Isso é possível porque todas as funções do CCNC-SDCC estão embarcadas no microcontrolador: medição da temperatura, geração do sinal de controle para as pastilhas termoelétricas, acionamento da bomba, acionamento das válvulas e comunicação com computador. A única função que é realizada fora da unidade de controle é o processamento da imagem que é feita por um microcomputador.

3.2.2 Software CCNC-SDCC ver1.0

O software CCNC-SDCC (versão 1.0) consiste de um programa computacional com dois núcleos importantes e é executado em um computador pessoal com sistema operacional *Windows*. O primeiro núcleo permite a interação entre o operador e a unidade de controle do CCNC-SDCC. Trata-se, portanto, de uma interface homem-máquina. O segundo núcleo processa a imagem, em tempo real, e informa o número de gotículas dentro do volume de amostragem e, conseqüentemente, calcula a concentração dessas gotículas e, portanto, a concentração de aerossóis.

O núcleo responsável pela interface homem-máquina foi construído utilizando-se o sistema de desenvolvimento C++ Builder versão 6.0. Foram criadas três telas de interface. A primeira, que é apresentada da Figura 3.5, é a principal. Essa tela permite as seguintes ações: a seleção de quais supersaturações que devem ser induzidas no interior da câmara, o disparo do ciclo de medição e a visualização de gotas. Além disso, apresenta as temperaturas inferior e superior, a diferença de temperatura entre as tampas, número de gotas e, por fim, o valor obtido da concentração dos núcleos de condensação de nuvens.

As duas telas seguintes são telas de serviço e de configuração operacional. A tela de serviço, mostrada na Figura 3.6, permite o acionamento assíncrono da bomba, das válvulas, das pastilhas Peltier e a visualização das imagens no interior da câmara

Figura 3.5: tela principal do CCNC-SDCC.

de nuvens. A tela de configuração operacional, mostrada na Figura 3.7, permite o ajuste do volume de amostragem, do nível de iluminação da câmara, do nível de limiar de detecção e do período de medição. Isso é feito digitando-se os valores de configuração nos campos existentes e, em seguida acionando-se o botão *SAVE*.

Figura 3.6: tela de serviço.

O núcleo de visão computacional foi desenvolvido inteiramente obedecendo o padrão ANSI da linguagem de programação C. Isto permite que este núcleo seja facilmente transportado para outro ambiente computacional.

Figura 3.7: tela de configuração operacional.

3.3 Descrição dos algoritmos usados no CCNC-SDCC proposto

Como mencionado anteriormente o número de partículas ativadas na câmara de nuvens pode ser obtido de forma indireta, através da medição da intensidade de luz espalhada pela gotícula de água ao cruzar um feixe de luz, ou direta pela contagem das gotículas através das técnicas de visão computacional. A técnica indireta apresenta diversos fatores que comprometem significativamente a sua acurácia, como por exemplo o fato da intensidade de luz espalhada ser dependente do tamanho da gotícula de água. Entretanto, o mesmo não ocorre com a técnica de contagem direta por visão computacional cuja principal característica é o fato de ser independente do tamanho da gotícula. A limitação nessa técnica, ao menos até o presente momento, consiste em medir alta concentração onde o número de gotículas sobrepostas na imagem é grande. Entretanto, com a combinação de técnicas de processamento de sinais é possível aumentar significativamente a capacidade de medição em altas concentrações.

A segmentação de objetos sobrepostos em imagens tem sido bastante estudada, uma vez que este é um problema cuja solução robusta é fundamental em vários processos de automação (?????????). O método da transformada *watershed* tem sido utilizado em diversas aplicações onde o problema da segmentação de objetos

sobrepostos está presente nas imagens (??????????).

A seguir são postos os principais conceitos em processamento de imagens aplicados ao CCNC-SDCC.

3.3.1 Conceitos básicos de processamento digital de imagens

O elemento básico de uma imagem digital é o *pixel* (*picture element*). Este representa uma intensidade radiométrica dentro de uma escala que, dependendo do elemento sensor de imagem, varia por exemplo de 0 (preto) a 255 (branco) nas imagens representadas em níveis de cinza. Outro parâmetro importante na definição de um *pixel* é a sua localização no plano. Assim sendo, uma imagem digital consiste de uma função $f(x,y)$, em que x e y são as coordenadas de um valor de intensidade radiométrica. A partir dessa definição de imagem digital diversas operações matemáticas podem ser perfeitamente aplicadas, podendo resultar na melhoria de contraste, identificação de descontinuidades, equalização de histogramas entre outros atributos (??).

Em uma imagem digital, a vizinhança de um *pixel* é importante na definição de várias propriedades e conceitos, dentre outros o conceito de região conectada. Considerando-se uma imagem digital como sendo uma grade retangular, um conjunto de *pixels* pode ser, em relação a um *pixel* central e adjacente, um vizinho tipo 4 ou tipo 8. Chama-se vizinhança 4 de um *pixel* P , todos os *pixels* adjacentes a P , localizados fora da diagonal que passa por P , e de vizinhança 8 de um *pixel* P todos os *pixels* que são adjacentes a P . Nos dois casos, ainda é necessário que os *pixels* obedeçam a algum critério de similaridade referente a seus níveis de intensidade e ou cor. Assim sendo, uma região (objeto) é dita conectada quando todos os seus *pixels* são adjacentes segundo a vizinhança 4 ou vizinhança 8. Na Figura 3.8 (a) é apresentada uma estrutura de vizinhança 4, na Figura 3.8 (b) é apresentada uma estrutura de vizinhança 8 e na Figura 3.8 (c) é apresentado um caso que, dependendo

do tipo de vizinhança escolhida, considera-se como sendo uma região conectada, ou seja, um objeto com *pixels* de vizinhança 8 ou duas regiões conectadas, ou seja, dois objetos com *pixels* de vizinhança 4 (??).

Figura 3.8: exemplos de vizinhança tipo 4(a), tipo 8(b) e elemento conectado(c).

Como dito anteriormente, as operações matemáticas, ou transformações, também são aplicáveis às imagens digitais. A transformação de distância, por exemplo, consiste em converter uma imagem digital binária em uma outra representada em níveis de cinza. Essa transformação tem como base a substituição de um *pixel* branco da imagem binária $g(x, y)$, por outro cujo valor (intensidade do nível de cinza) representa a distância $d(x, y)$ deste *pixel* branco a um *pixel* preto (x_i, y_i) mais próximo conforme a seguinte equação:

$$d(x, y) = \min \text{dist}\{(x, y), (x_i, y_i)\}, (x_i, y_i) \in \text{borda do objeto}. \quad (3.1)$$

Algumas métricas de distância podem ser utilizadas como por exemplo a Euclidiana, City Block e Chessboard (??). A mais comum das métricas é a distância Euclidiana, pois, é a mais adequada quando se busca modelar dados geométricos do ambiente humano. Contudo, devido a simplicidade computacional, utiliza-se nesse trabalho a métrica Chessboard dada por:

$$D_8(p, q) = \max(|x - s|, |y - t|) \quad (3.2)$$

Para ilustrar a transformada de distância, considere um objeto de cor branca numa imagem binária, conforme mostrado na Figura 3.9(a). O resultado da transformação de distância aplicada à uma imagem é apresentada na Figura 3.9(b).

Figura 3.9: (a) objeto branco, (b) resultado da transformação de distância.

Neste trabalho, a metodologia para implementação da métrica escolhida consiste em substituir cada *pixel* branco por um valor que corresponde a menor quantidade de *pixels* brancos na direção do *pixel* preto mais próximo. Isto é feito a partir de uma varredura nas vizinhanças do *pixel* de interesse. O raio de varredura é expandido até que se encontre um *pixel* preto.

Um dos problemas mais complexos em visão computacional é a segmentação de imagens digitais. Segmentar uma imagem consiste em separar objetos presentes numa dada imagem. Existem várias técnicas de segmentação, duas das quais são: a binarização por limiar e a transformação que define a linha divisora de bacias hidrográficas ou *Wahershed* (?????????).

A binarização por limiar é uma técnica simples que consiste em gerar uma imagem binária $g(x, y)$, a partir de uma imagem em tons de cinza $f(x, y)$, considerando um valor de limiar k segundo a relação (??)

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f(x, y) > k, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.3)$$

A transformada *Watershed* consiste em considerar os tons de cinza da imagem como sendo um terceiro eixo. Isto é, para cada posição de um *pixel* é associada

uma profundidade ou elevação, cujo valor corresponde ao nível de cinza deste *pixel*. Assim, considera-se a imagem com seus objetos como sendo a superfície de um terreno com vales e montanhas. Ao se promover a inundação dos vales, a partir de seus mínimos locais, e construindo-se diques sempre que necessário para evitar-se transbordamento, destacam-se as linhas divisoras de bacias hidrográficas (*Watershed*), produzindo dessa forma a segmentação dos objetos presentes na imagem. Um eficiente método recursivo para realização da transformada *Watershed* é proposto por Luc Vincent and Pierre Soille (??) e corresponde a:

$$\begin{cases} X_{h_{\min}} = T_{h_{\min}}(I) \\ \forall h \in [h_{\min}, h_{\max} - 1], X_{h+1} = \min_{h+1} \cup IZ_{T_{h+1}}(I). \end{cases} \quad (3.4)$$

A idéia básica da transformada *Watershed* é mostrada na Figura 3.10. Neste exemplo é apresentado uma sequência de inundação de dois discos que encontram-se sobrepostos. Deve-se considerar que, a partir das bordas dos discos e na direção de seus centros, existe um declive formando dois poços. Dessa forma, cada centro é um mínimo local. A inundação ocorre a partir do centro, na direção das bordas, como se em cada centro existisse um furo e os poços estivessem sendo afundados em um lago. Quando a inundação atinge um nível suficiente para formar uma única superfície, um dique é construído nessa posição, identificando a interseção dos discos. A inundação continua até atingir as bordas dos discos quando o dique final é construído em torno de todo o disco. Este dique final tem como objetivo impedir que a superfície do lago forme uma única superfície em relação aos poços. O resultado final deste procedimento é a segmentação (separação) dos objetos, neste caso dos dois discos.

3.3.2 Técnica proposta

A medida da concentração de gotículas presentes no volume de amostragem da câmara de nuvens, isto é, a concentração dos aerossóis, é realizada a partir

Figura 3.10: transformada *Watershed* - inundação em andamento.

da contagem individual dessas gotículas. Para tal, uma técnica é proposta sendo constituída dos processos mostrados no diagrama de blocos da Figura 3.11. Esses blocos exibem o fluxo de análise de uma imagem de entrada com a imagem correspondente a cada saída resultante de cada processo, representado por cada bloco.

Figura 3.11: diagrama de blocos da técnica proposta e as saídas correspondentes a cada processo.

Para captura das imagens utiliza-se uma câmera digital de vídeo com uma resolução de 640×480 *pixels* instalada na janela de fotografia da câmara de nuvens. Em seguida, um recorte dessa imagem inicial é realizado, produzindo uma outra imagem menor $f(x,y)$, cujas dimensões são 620×73 *pixels*, conforme será mostrado

adiante. Essa imagem, assim produzida, contém apenas a informação a ser processada, sendo, pois, usada como a entrada efetiva de dados.

O segundo processo consiste em aplicar uma binarização por limiar com o objetivo de realizar uma primeira segmentação na imagem $f(x,y)$. Assim, um nível de limiar de intensidade mínima k (intensidade de luz) deve ser definido, de modo que garanta que a informação é oriunda de dentro do volume de amostragem e é efetivamente uma gota de água. A definição desse limiar é o resultado da medida do valor médio das intensidades dos níveis de cinza dos *pixels* sem formação de gotas dentro da câmara. Neste trabalho, o valor médio encontrado para k é de 25. Dessa forma, os *pixels* cujos valores de intensidade de nível de cinza variam de 0 a 25 são substituídos por zero (preto) e acima desse valor são admitidos iguais a um (branco). Assim, obtém-se uma imagem binarizada $g(x,y)$ conforme esta mostrado na parte (b) da Figura 3.11, produzida por este processo, definido por

$$g(x,y) = \begin{cases} 0, & \text{se } f(x,y) \leq k, \\ 1, & \text{se } f(x,y) > k. \end{cases} \quad (3.5)$$

O processo seguinte consiste na construção de mínimos locais artificiais nos objetos brancos (gotas) identificados no processo anterior. Isto é obtido utilizando-se a transformação de distância. O resultado deste processamento é mostrado na parte (c) da Figura 3.11. A partir da construção desses mínimos locais, a transformada *Watershed* é aplicada ao resultado mostrado na parte (c) da Figura 3.11, produzindo uma imagem segmentada como está mostrado na parte (d) da Figura 3.11.

3.4 Determinação do volume de amostragem da câmara de nuvens

O volume de amostragem V_a , considerado cilíndrico, é definido por

$$V_a = \pi \frac{d^2}{4} l, \quad (3.6)$$

em que d é o diâmetro da luz LASER e l é o comprimento da luz LASER na região de interesse. Nesse caso, V_a é todo o volume iluminado pela luz LASER dentro da câmara. Esse volume encontra-se aproximadamente a meia altura da câmara, pois, conforme é mostrado na Figura 2.1, é nessa região onde o valor da supersaturação é máxima.

O procedimento para determinar d e l consiste na execução dos seguintes passos:

- (1) registra-se a imagem de um papel milimetrado colocado no centro da câmara de nuvens e alinhado com a luz LASER, de modo a permitir a calibração da relação *pixels*/milímetros;
- (2) registra-se um número suficiente de imagens, com a presença de gotículas, de maneira tal que a sobreposição das imagens possa definir completamente a região iluminada pela luz LASER, definindo as coordenadas do retângulo da imagem a ser processada e
- (3) a partir da relação *pixels*/milímetros e das coordenadas deste retângulo, obtém-se d e l .

O processo de registro das imagens pode ser visto na Figura 3.12: (a) papel milimetrado posicionado no centro da câmara de nuvens, exatamente por onde a luz LASER passa; (b) gotículas formadas dentro da câmara de nuvens; (c) sobreposição de imagens, todas com gotículas, revelando totalmente o diâmetro d da luz LASER. É importante ressaltar que as imagens de gotas são inicialmente segmentadas para remoção de ruídos espúrios através de uma binarização por um limiar k segundo a equação 3.5.

(a) (b) (c)

Figura 3.12: imagens do processo de calibração, (a) papel milimetrado no centro da câmara de nuvens; (b) gotículas dentro da câmara de nuvens; (c) resultado de 2000 imagens sobrepostas.

O valor de $i(y)$ de todos os *pixels* iluminados ao longo de todo o feixe de luz LASER para cada altura y (em *pixels*) é mostrado na Figura 3.13 e dado por

$$i(y) = \sum_{x=0}^{m-1} g(x, y), \quad y = 0, \dots, n-1, \quad (3.7)$$

em que m e n são o número de *pixels* da imagem no eixo horizontal e vertical, respectivamente.

Figura 3.13: gráfico de distribuição de *pixels* brancos (valor 1) ao longo da altura da imagem.

Nesse procedimento, considera-se como diâmetro da luz LASER as regiões iniciais e finais que contém pelo menos 1% do número máximo de ocorrências de *pixels* ativados (iluminados). Na Figura 3.13 é apresentado um gráfico com o número de

vezes em que um determinado *pixel* é ativado dentro de um grupo composto por 2000 imagens utilizadas na construção da Figura 3.12 (c).

Assim sendo, o diâmetro do LASER é de 73 *pixels*. Com o objetivo de ter o maior volume de amostragem possível, assume-se como comprimento do LASER 620 *pixels*. A partir da relação *pixels*/milímetros (43,29 *pixels*/milímetro na horizontal e 44,50 *pixels*/milímetro na vertical), obtida através da análise da imagem mostrada na Figura 3.12a e da altura e do comprimento em *pixels* definidos anteriormente, obtém-se o valor do volume de amostragem conforme a equação 3.6 $V_a = 30,27 \pm 1,76$ mm³. O valor da incerteza do volume (1,76 mm³) é calculado considerando-se uma propagação de erros, em função de um posicionamento errado do papel milimetrado dentro da câmara de nuvens no valor de $\pm 1,0$ mm, de uma incerteza de ± 1 *pixel* tanto no diâmetro quanto no comprimento bem além de um possível erro de 0,05 mm no papel milimetrado, pois este foi aferido com um paquímetro com esta resolução.

Uma vez descrito e caracterizado o CCNC-SDCC proposto, podem-se obter resultados de sua operação e com isto permitir uma análise comparativa entre este CCNC-SDCC e um contador de partículas condensáveis (CPC).

Capítulo 4

Resultados

Os resultados apresentados neste Capítulo estão divididos em dois grupos: resultados do sistema de visão computacional e resultados dos experimentos em bancada. Nos resultados relativos à segmentação das gotas são apresentadas cinco situações de concentrações que correspondem às situações normalmente encontradas em medidas de campo. Em relação aos resultados de experimentos em bancada, primeiramente, é apresentada a metodologia utilizada para avaliação de desempenho do CCNC-SDCC, isto é, como esses experimentos são realizados e em que condições. Em seguida são apresentados os resultados propriamente ditos. Por fim são feitas comparações entre o CCNC-SDCC e o CCNC-WYO em termos de peso, volume e consumo elétrico.

4.1 Resultados do Sistema de Visão Computacional

Os resultados do sistema de visão computacional consistem no número de gotas. Nas Figuras a seguir são mostrados os resultados da segmentação de gotas formadas dentro da câmara de nuvens em cinco concentrações diferentes. As Figuras de 4.1 até 4.5 referem-se às concentrações médias de 528, 1616, 2774, 4129 e 6342 gotas/cm³ de aerossol medidas por um contador de partículas, com 300 nm de

diâmetro e produzidos a partir de uma solução de sulfato de amônia $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Essas concentrações são abrangentes o suficiente para avaliar o desempenho do CCNC-SDCC, tanto em condições favoráveis quanto em condições extremas. Nas Figuras colocadas à esquerda são apresentadas as imagens registradas de gotas formadas sem a segmentação e sem nenhum tipo de processamento. Nas Figuras colocadas à direita são mostradas imagens resultantes do processo de segmentação. Em todas as situações apresentadas constata-se a capacidade de segmentação do sistema, mesmo em condições adversas como é o caso da Figura 4.5 onde ocorrem sobreposição parcial de gotas.

(a) (b)

Figura 4.1: 15 gotas (528 gotas/cm^3).

(a) (b)

Figura 4.2: 48 gotas (1616 gotas/cm^3).

Um exemplo da capacidade do sistema de visão computacional proposto em segmentar gotas sobrepostas é apresentado na Figura 4.6(a) com destaque de uma região da imagem onde aparecem três gotas muito próximas. Ampliando-se essa

(a) (b)

Figura 4.3: 83 gotas (2774 gotas/cm^3).

(a) (b)

Figura 4.4: 124 gotas (4129 gotas/cm^3).

(a) (b)

Figura 4.5: 191 gotas (6342 gotas/cm^3).

região, observa-se que três gotas estão parcialmente sobrepostas. Essa é uma situação comum em altas concentrações em que uma segmentação simples por binarização implicaria em uma subcontagem e, por conseguinte, uma medida da concentração menor do que a realidade apresenta. Entretanto, mesmo nessa condição de sobreposição parcial, o sistema de visão computacional utilizado é capaz de identificar e isolar estes objetos (gotas) como pode ser visto no detalhe a direita, na mesma Figura, que é o resultado da segmentação dessa região da imagem. Na Figura 4.6(b) é apresentado o resultado da segmentação na forma matricial em que os *pixels* associados ao fundo da imagem são representados pelo número 1; o contorno dos objetos são representados pelo número 0 e aos objetos (gotas) são representados pelos demais números.

Nas condições apresentadas na Figura 4.6, a contagem por um operador se torna praticamente impossível, bem como utilizando-se a contagem por espalhamento de luz. Este resultado evidencia a superioridade do CCNC-SDCC proposto em relação aos CCNCs existentes que subestimam a medição em concentrações acima de 3000 gotas/cm³ (??) devido a sobreposição de gotas.

4.2 Metodologia para avaliação de desempenho do CCNC-SDCC em bancada

A metodologia para avaliação de desempenho do CCNC-SDCC em bancada consiste praticamente na mesma que foi utilizado por Frank et al. (??). Isto é, foi realizada uma comparação entre um contador de partículas condensáveis CPC (*Condensation Particle Counter* Modelo 3025) e o CCNC-SDCC. De uma forma resumida pode-se dizer que essa metodologia consiste em produzir uma concentração de aerossóis capazes de, na sua totalidade, serem detectados pelo CCNC-SDCC e pelo CPC e comparar os resultados. Considerando-se que o CPC é um contador de partículas totais é importante que cada aerosol produzido seja exclusivamente



(a)



(b)

Figura 4.6: resultado do CCNC-SDCC com gotas sobrepostas. (a) Imagem resultante do processo de segmentação com expansão de uma região. (b) Representação da região expandida com a identificação da gotas.

formado por núcleos higroscópicos com um diâmetro mínimo de 100 nm, pois, nestas condições, garante-se uma eficiência de detecção de 100% por parte do CCNC-SDCC (??). Nessas condições, o que um instrumento detecta, o outro também deve detectar.

Para tal, foi utilizada no Laboratório de Química da Partícula do Instituto Max Planck na Universidade de Mainz - Alemanha, uma bancada capaz de produzir aerossóis sob condições controladas de concentração, bem como de diâmetro de partícula. Na Figura 4.7 são apresentados os diversos componentes da bancada: compressor, armadilha, atomizador, reservatório de sulfato de amônia, secador, classificador eletrostático e o contador de partículas. Maiores detalhes dos equipamentos utilizados nessa bancada e seu funcionamento estão no Anexo B.

Figura 4.7: bancada geradora de aerossóis.

4.2.1 Aspectos práticos do processo de comparação

Considerando-se que este trabalho envolve fenômenos físicos reais, algumas considerações do ponto de vista prático, no que diz respeito ao ajuste de concentração, sua variação e seus transitórios, são importantes de serem postas.

Ajuste da concentração de aerossóis

O ajuste da concentração de aerossóis é feito de forma empírica. Isto é, dissolve-se o sulfato de amônia em água destilada em uma proporção que corresponda a uma dada concentração que se deseja medir no CPC. Pequenas correções podem ser realizadas, adicionando-se água destilada ou sulfato de amônia para redução ou aumento da concentração, respectivamente. Outra forma de se obter pequenos ajustes é aumentando ou diminuindo a pressão de ar comprimido no sistema através de uma válvula.

Foram definidas três faixas de valores de concentrações para realização dos experimentos de comparação:

- ▶ baixa ... $< 1500 \text{ partículas} \cdot \text{cm}^{-3}$,
- ▶ média..... $1500 - 3000 \text{ partículas} \cdot \text{cm}^{-3}$ e
- ▶ alta..... $> 3000 \text{ partículas} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Essas faixas de valores de concentração de partículas são escolhidas pelo fato de representarem situações normalmente encontradas na natureza (??).

Variação da concentração

A concentração medida pelo CPC varia ao longo do tempo como é mostrado na Figura 4.8. Essa variação é uma consequência do processo de produção de aerossóis, devida a uma remoção de água e de sulfato em proporções diferentes. Este fenômeno,

tem forte implicação no procedimento de comparação. Isto porque as médias de medidas obtidas em um longo período de tempo variam, portanto não devem ser consideradas, mas apenas a comparação da medição obtida pelo CCNC-SDCC e a medição obtida pelo CPC em um curto período de tempo.

Figura 4.8: variação da concentração da bancada geradora de aerossóis.

Transitórios

O CPC foi projetado para trabalhar com um fluxo contínuo de aerossóis. O modelo TSI3025A, utilizado como referência neste trabalho, possui uma bomba que procura sempre manter o fluxo de 0,3 litros/min de aerossóis constante em seu sistema de medição. Como o CCNC-SDCC deve ser posto em paralelo com o CPC, ao ser acionada a sua bomba para a realização da medida, este sofre uma alteração momentânea de fluxo, produzindo-se as grandes variações destacadas na Figura 4.9. Por essa razão, estes transitórios devem ser descartados no processo de comparação.

Procedimentos adotados para comparação

Os efeitos da variação da concentração ao longo do tempo, bem como os efeitos transitórios impostos ao CPC, devido ao princípio operacional do CCNC-SDCC impõem restrições nos dados de saída do CPC usado como referência no processo de

comparação. Considera-se como medida válida do CPC, para efeito de comparação, as 50 últimas medidas antes do acionamento da bomba do CCNC-SDCC. Na Figura 4.9 são destacadas as regiões consideradas e descartadas do sinal do CPC no processo de comparação.

Figura 4.9: concentração medida pelo CPC, destacando-se as regiões usadas na medição (a) e descartadas (b).

4.3 Resultados da comparação entre o CCNC-SDCC e o CPC

Os resultados são obtidos a partir da comparação entre o CCNC-SDCC e o CPC. Os medidores são montados de acordo com o que foi descrito no Capítulo anterior, seguindo uma metodologia clássica para este estudo e que é apresentada por Frank et al. (??).

O processo de comparação apresentado na forma das Figuras 4.10 e 4.11 indica uma forte correlação entre o CPC e o CCNC-SDCC. As correlações foram obtidas a partir de 297 medições para o caso de partículas de 300 nm e de 55 medições para o caso de partículas de 100 nm. A faixa de concentração analisada é de 500 partículas/cm³ até 4500 partículas/cm³. Essa é uma faixa bastante ampla que abrange desde situações comumente encontradas nos processos de formação de nuvens no oceano ou floresta (em situações de baixa poluição), bem como em

processo de formação de nuvens produzidas por plumas de fumaça oriundas de queima de florestas (??).

É importante ressaltar que a única calibração feita no CCNC-SDCC é aquela realizada na determinação do volume de amostragem. Isto é, não é feito nenhum ajuste nos dados obtidos. Este resultado demonstra claramente que o procedimento adotado para a medida do volume de amostragem, bem como as técnicas adotadas para contagem das gotas são adequados para essa aplicação. Dessa forma, este CCNC-SDCC dispensa equipamentos de referência para calibração.

Figura 4.10: correlação entre CPC e CCNC-SDCC utilizando aerossóis monodispersivos de sulfato de amônia com diâmetro de 300 nm (297 pontos medidos).

Outro aspecto importante que deve ser ressaltado é o que diz respeito à dispersão dos dados. Na Figura 4.12 observa-se que o CCNC-SDCC possui um desvio padrão relativo de 12%, enquanto que o do CPC é de 7,4% para o mesmo conjunto de dados. Entretanto, na média os valores são muito próximos, conforme é demonstrado através das linhas de tendências desenhadas na Figura 4.12. O gráfico apresentado na Figura 4.12 pode ser melhor compreendido na Figura 4.13 em que são apresentadas as distribuições dos erros do CPC (a) e do CCNC-SDCC (b) em relação às suas linhas de tendências.

A maior dispersão no CCNC-SDCC em relação ao CPC é esperada, pois, os

Figura 4.11: correlação entre CPC e CCNC-SDCC utilizando aerossol monodispersivo de sulfato de amônia com diâmetro de 100 nm (55 pontos medidos).

aerossóis considerados são aqueles iluminados pela fonte de luz LASER que define o volume de amostragem. Este volume é realmente muito pequeno em relação ao volume total da câmara de nuvens, enquanto que no caso do CPC seu resultado é oriundo de uma média, uma vez que seu sistema de medição é de fluxo contínuo. Não se pode garantir, de forma prática, uma distribuição espacial de gotas perfeitamente uniforme dentro da SDCC. Assim, cada medida considerada do CCNC-SDCC deve ser o resultado de uma média aritmética em torno do ponto de interesse, de maneira semelhante ao que foi feito com os dados que originaram as Figuras 4.10 e 4.11.

Figura 4.12: comparação da dispersão dos dados entre CPC e o CCNC-SDCC utilizando aerossóis monodispersivo de sulfato de amônia com diâmetro de 100 nm.

(a) (b)

Figura 4.13: dispresão dos dados do CPC (a) e do CCNC (b) em relação às suas linhas de tendência.

4.4 Aspectos mecânicos e elétricos

O CCNC-SDCC foi desenvolvido para substituir um outro CCNC, mais antigo, que atualmente é utilizado no Avião Laboratório para Pesquisas Atmosféricas - ALPA, o CCNC-WYO. Descrito no Capítulo 2, o CCNC-WYO faz parte de um conjunto de equipamentos instalados no Avião Laboratório para Pesquisas Atmosféricas (ALPA) cuja finalidade é realizar as medidas de parâmetros microfísicos das nuvens *in situ* (temperatura ambiente, temperatura de ponto de orvalho, pressão atmosférica, quantidade de água líquida, espectro de gotas de nuvens e de chuva, concentração de núcleos de condensação de nuvens dentre outros parâmetros). O ALPA, uma aeronave modelo Bandeirante EMB110-P1, foi modificada tanto estruturalmente quanto eletricamente para receber este conjunto de equipamentos.

Nesse conjunto de equipamentos encontra-se o CCNC-WYO, que ocupa o maior espaço e possui maiores peso e consumo de energia. Estes três parâmetros (peso, espaço e consumo de energia) são restritivos em medições aerotransportadas, pois, os recursos de espaço e energia dentro da aeronave são limitados e o posicionamento

do equipamento na aeronave em função do seu peso também impõe restrições. Assim sendo, caso seja necessário incluir algum equipamento extra, situação bastante comum, outro deve ser desligado e, às vezes ser removido da aeronave por razões de segurança. Nesse contexto, o CCNC-SDCC apresenta significativa vantagem em relação CCNC-WYO, pois, apresenta uma importante redução de tais parâmetros conforme mostra a Tabela 4.1 possibilitando a instalação de outros equipamentos.

Tabela 4.1: comparação entre CCNC-SDCC e o CCNC-WYO.

Parâmetro	CCNC-SDCC	CCNC-WYO
Volume	29,2 l	40,0 l
Peso	5,0 kg	37,0 kg
Corrente média	0,35 A	1,0 A
Corrente de pico	1,5 A	3,0 A

Na construção do CCNC-SDCC foram utilizados componentes facilmente encontrados no mercado nacional. Apenas duas peças foram feitas sob encomenda: a câmara de nuvens e a placa de circuito impresso da unidade de controle.

O protótipo do CCNC-SDCC foi montado em uma caixa padrão de alumínio do tipo 19"X 3U. Alguns componentes ficaram externos à caixa como, por exemplo, o LASER, sua fonte de alimentação, bem como parte da SDCC. Dessa forma, as dimensões do CCNC-SDCC são as seguintes: 48,26cm de frente, 22,0cm de altura e 27,5cm de profundidade. Na Figura 4.14 é apresentado o protótipo.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 são apresentadas vistas frontais e superior, evidenciando uma boa percepção do ganho de espaço obtido pelo CCNC-SDCC.

Figura 4.14: protótipo do CCNC-SDCC.

Figura 4.15: vista frontal dos dois CCNCs.

Figura 4.16: vista superior dos dois CCNCs.

Capítulo 5

Conclusões, contribuições e trabalhos futuros

Esta tese propõe um novo contador de núcleos de condensação de nuvens com câmara de difusão estática, empregando um sistema de visão computacional para a contagem automática de gotas. Além disso, são descritos e analisados os diversos tipos de CCNCs existentes, apontando-se as principais características, bem como suas limitações. Descreve-se a metodologia de concepção e desenvolvimento desse novo CCNC, dividindo-se em duas partes: hardware e software.

Quanto à primeira parte, contempla o esquemático do novo CCNC, o controle de supersaturação, composto por circuitos elétricos projetados especificamente para este fim, contendo um reduzido número de componentes. A segunda parte, o software, divide-se em dois núcleos, sendo o primeiro responsável por permitir a interação do novo CCNC com o operador para possibilitá-lo operar os serviços e a configuração operacional, tais como ajustar o volume de amostragem, o nível de iluminação, entre outros. O segundo núcleo é composto pelo sistema de visão computacional, composto por um conjunto de algoritmos, que permite a segmentação e contagem automática das gotas, demonstrando-se eficiente mesmo

em altas concentrações em que ocorrem sobreposição de gotas. Em equipamentos equivalentes, essa situação é contornada apenas com a utilização de diluidores de gases. Além disso, esse sistema de visão é responsável pela determinação automática do volume de amostragem da câmara de nuvens. A validação do novo CCNC é obtida por comparação com um CPC, produzindo-se concentrações de aerossóis neste e comparando-se com as concentrações medidas pelo novo CCNC, resultando numa correlação de 99% entre as medidas.

Com base nos resultados experimentais conclui-se que o novo CCNC pode ser empregado na medição de CCNs, inclusive em situações de atmosferas poluídas, onde há alta concentração de aerossóis. Conclui-se também que esse CCNC, por possuir baixos peso e consumo de energia e pode ser embarcado mais facilmente em aeronaves menores.

A expansão da capacidade de contagem de gotas para cerca de 4000 partículas/cm³, sem o emprego de diluidores de gases e bem acima de outros CCNCs como, por exemplo, o CCNC-MPIChemie (CCNC do Instituto Max Plank para Química da Universidade de Mainz-Alemanha), constitui uma contribuição importante, pois, permite a medição de CCNs em muitas situações que atualmente são de interesse científico como no caso de atmosferas poluídas.

Uma nova metodologia para determinação do valor do volume de amostragem também é apresentada, sendo que essa garante medidas confiáveis dentro de uma ampla faixa de concentração de núcleos de condensação de nuvens e dispensa necessidade de uma calibração em bancada.

Além das contribuições mencionadas, destacam-se também que todo o material usado no projeto do novo CCNC é facilmente encontrado no mercado nacional e a intensiva utilização de tecnologia digital permitiu a construção de um protótipo de baixo peso, de baixo consumo de energia e de pequeno volume se comparado com outros contadores equivalentes.

Como sugestão de trabalhos futuros, visando o aperfeiçoamento do novo CCNC, podem-se relacionar:

1. substituir o a fonte de luz LASER a gás (HeNe) por outra fonte de luz LASER baseada em semicondutor. Pode-se citar três bons motivos: redução de peso, de consumo de energia e de custo do CCNC-SDCC. Do ponto de vista mecânico este é um procedimento simples porque a câmara de nuvens foi construída com acessórios prevendo essa possibilidade. Entretanto no que diz respeito a metodologia de determinação do volume de amostragem, essa deverá sofrer adaptações pois normalmente a geometria do feixe do LASER semicondutor não é perfeitamente cilíndrico;

2. embarcar o sistema de visão computacional e de interface homem máquina no *hardware* do próprio CCNC-SDCC. Isto feito, dispensa a utilização de um computador para tal. Nesse sentido, passos já foram dados, pois, o código de processamento de imagem foi implementado em linguagem de programação C-ANSI;

3. colocar outra câmera digital numa janela da câmara para permitir uma visão tridimensional das gotas, podendo ser rastreado o processo de crescimento, inclusive, extraíndo-se medidas;

4. dispor o CCNC de um sistema eletônico que permita a transmissão dos dados por GPRS, facilitando o embarque deste equipamento em microaeronaves não tripuladas;

5. disponibilizar o histograma de tamanho de gotículas. Isto é totalmente factível a partir da substituição da atual *webcam* por outra de alta definição de modo a permitir uma melhor relação *pixels*/milímetros.

Apêndice A

Aerossóis

Os aerossóis atmosféricos são partículas minúsculas, líquidas ou sólidas, que existem em suspensão na atmosfera da Terra. Essas minúsculas partículas influenciam, sob vários aspectos, a vida na Terra: controlam a visibilidade no ar, a intensidade de radiação solar incidente e refletida pela superfície da Terra, assim como as propriedades elétricas e radiativas do meio ambiente. Os aerossóis atmosféricos também desempenham um papel fundamental na regulação do ciclo hidrológico da natureza, uma vez que gotículas de água das nuvens são formadas pela condensação do vapor de água da atmosfera na superfície destes aerossóis.

Os aerossóis atmosféricos formadores de gotículas de nuvens recebem o nome de núcleos de condensação de nuvens (CCN - Cloud Condensation Nuclei). É sabido que a estrutura das nuvens depende fortemente das características desses núcleos, os quais determinam a formação de precipitação e a transferência, através das nuvens, da radiação solar incidente ou refletida pela Terra (??).

Dependendo das naturezas física, química e da quantidade de vapor na atmosfera, os CCNs podem iniciar o processo de formação de gotículas de nuvens (??). Assim sendo, as características microfísicas das nuvens são fortemente alteradas pela quantidade e pela atividade desses núcleos. Os aerossóis atmosféricos não só

absorvem e espalham a radiação solar, como também têm um importante efeito indireto sobre o clima, uma vez que as gotículas de nuvens formadas sobre os CCN influenciam, de forma significativa, a transferência de radiação de comprimento de onda curta. Por outro lado, as nuvens são absorvedores quase perfeitos em uma faixa de grandes comprimentos de onda da radiação emitida pela superfície terrestre (??). Essa absorção reduz a perda de calor das camadas inferiores da troposfera, dando origem ao conhecido efeito estufa (??).

Uma característica física importante da atmosfera é a concentração de aerossóis. Essa concentração é normalmente dada pelo número de partículas por unidade de volume do gás. Os resultados de medidas da concentração de aerossóis atmosféricos realizadas sob diferentes condições estão catalogadas (??). É observado que, a maioria das partículas, são de origem continental, sendo óbvio o papel que as atividades humanas desempenham na produção dessas partículas. A fração que se origina no mar, embora de menor concentração, é de fundamental importância no ciclo de água na Terra. Adicionalmente, sabe-se que a concentração de aerossóis atmosféricos decresce com o aumento da altura (??).

A.1 Núcleos de Condensação de Nuvens

Na atmosfera terrestre, as supersaturações (umidade acima de 100%) que ocorrem em nuvens naturais são baixas, em torno ou menores do que 1%. Em cerca de 50% das nuvens, a supersaturação é menor do que 0,2%. Conseqüentemente, as gotículas de nuvens se formam sobre uma classe especial de aerossóis atmosféricos, os chamados CCN (??).

Os resultados apresentados por Landsberg (??) mostram que o número de aerossóis atmosféricos na troposfera varia aproximadamente de 10^2 partículas \times cm^{-3} a 10^5 partículas \times cm^{-3} , sendo uma função da interação entre as fontes de aerossóis e os processos de remoção. Por outro lado, de acordo com observações

experimentais, a concentração de gotículas de água em nuvens de diferentes tipos está entre 10 cm^{-3} e 10^3 cm^{-3} . Isto significa que as gotículas de nuvens se formam sobre uma pequena fração dos aerossóis atmosféricos. Um dos objetivos de muitas pesquisas em ciências atmosféricas atualmente realizadas é a determinação da natureza destes aerossóis que atuam como CCN na atmosfera da Terra (??).

Se em um dado volume de ar, geralmente contido em uma câmara, na qual uma baixa supersaturação é criada, o número de CCN tendo uma supersaturação crítica igual ou menor que a supersaturação na câmara pode ser determinado pela contagem das gotículas de nuvens formadas. Dessa forma, é possível determinar a concentração de CCN. Por supersaturação crítica entende-se o menor valor de supersaturação em que o vapor de água condensa sobre os CCN. Se essa medida é realizada em diferentes supersaturações, o espectro de supersaturações é obtido, e tem-se, dessa maneira, o número de núcleos ativos como uma função da supersaturação (??).

Uma vez que a concentração de gotículas em uma nuvem depende essencialmente do número de CCN, tem-se que se o número de partículas com baixa supersaturação crítica é grande, a concentração de gotículas de nuvens é alta e sua média de tamanhos é pequena, pois, a quantidade de vapor de água disponível é dividida entre um grande número de núcleos. Por outro lado, se o número de CCN é pequeno, então a população de gotículas é de baixa concentração e uma grande média de tamanhos dessas gotículas é obtida. Uma vez que a formação de precipitação em uma nuvem depende, dentre outros fatores, do tamanho das gotículas de nuvem, então os núcleos de condensação de nuvens influenciam a capacidade de uma nuvem precipitar.

A.2 Medidas Aerotransportadas

A primeira medida da concentração de CCN feita por avião foi realizada por Squires e Twomey (??) no ar continental sobre o estado do Colorado, EUA, e no ar marítimo sobre o Caribe. A Figura A.1 representa os resultados obtidos com uma

supersaturação de 0,35%. Uma importante verificação, a partir destes dados, é que enquanto nas camadas de ar próximas à superfície a diferença entre massas de ar marítima e continental são significativas, nas camadas de ar superior à troposfera a concentração de CCN tende a ser mais uniforme. Também pode-se observar que a concentração média decresce com o aumento da altura sobre os continentes, enquanto que sobre o mar permanece praticamente constante. Essas verificações foram confirmadas posteriormente pelos pesquisadores Twomey e Wojciechowski (??), concluindo-se que a principal fonte de CCN se encontra nos continentes.

Figura A.1: concentração média, por mg de ar (1 cm^3 a 20°C e 840mb), de CCNs ativados na supersaturação de 0,35% em relação a altitude.

A.3 Relação entre CCN e Gotículas de Nuvens

Howell, em 1949 (??), realizou os primeiros cálculos da formação de uma população de gotículas a partir de uma distribuição de CCNs, considerando-se a taxa de resfriamento uniforme e que a temperatura e pressão eram praticamente

constantes durante a formação de nuvens. Também considera que os CCN consistiam de aerossóis marítimos (núcleos de cloreto de sódio seco). As variáveis utilizadas nos cálculos foram: a umidade relativa (supersaturação), a massa dos núcleos, o raio das gotículas e o tempo (para uma velocidade vertical conhecida e para cima, e o tempo é proporcional a altura de ascensão da parcela).

Alguns resultados obtidos por Howell são ilustrados na Figura A.2 cujos eixos estão em escala logarítmica. Observa-se nessa Figura que inicialmente as gotículas (água condensada sobre os núcleos) crescem lentamente e em paralelo com o aumento da supersaturação. Nessa fase, o tamanho das gotículas (exceto alguns núcleos grandes e no caso de alta taxa de resfriamento) está próximo ao valor de equilíbrio. Após alcançar a máxima supersaturação, o crescimento torna-se muito rápido. Contudo, devido ao consumo de vapor de água que condensa sobre as gotas, a taxa de crescimento diminui lentamente, para se tornar um valor estacionário.

Os cálculos realizados por Howell também indicam que os tamanhos das gotículas ativadas convergem, com o tempo, para um valor comum, caracterizando assim o estreitamento do espectro de gotículas. Para uma alta taxa de resfriamento, maiores supersaturações são criadas e conseqüentemente muitos CCN pequenos são ativados. Essa relação ainda foi confirmada por E. Freud e colaboradores (??) através de medições *in-situ* em nuvens convectivas.

Há atualmente um crescente interesse no estudo dos CCN. A causa é a influência destes núcleos sobre a formação, propriedades óticas e radiativas das nuvens, e portanto, sobre a temperatura média e outras características climáticas da Terra. Twomey (??) sugeriu que um aumento na concentração de CCNs na atmosfera pode acarretar um aumento no albedo (razão entre a intensidade de fluxo refletido e o fluxo incidente) das nuvens via um aumento de cobertura. Como consequência pode haver um resfriamento no clima terrestre (efeito Twomey).

No ambiente continental estudos recentes indicam que altas concentrações de

Figura A.2: Crescimento de núcleos de cloreto sódio de massas diferentes em função do raio do núcleo e da supersaturação.

aerossóis, produzidos por queima de florestas, contribuem para a inibição de chuvas na região amazônica com a consequente mudança no ciclo hidrológico da região (????). Considerando-se o tamanho da região amazônica, uma mudança no ciclo hidrológico certamente trará importantes consequências econômicas e sociais. Assim sendo, medir a concentração de CCNs, mapear a sua origem e o seu destino final torna-se importante no contexto de mudanças climáticas de larga escala.

Apêndice B

Bancada geradora de Aerossóis

O processo de geração de aerossóis inicia-se em um compressor com saída de ar filtrado. Em seguida, este ar filtrado passa por uma armadilha de água. Nesse ponto, o ar pressurizado, filtrado e seco é injetado no atomizador TSI3076 que esta acoplado a um reservatório, contendo uma solução de sulfato de amônia $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Outras substâncias higroscópicas podem ser utilizadas como por exemplo nitrato de amônia NH_4NO_3 , cloreto de sódio NaCl e etc. Na saída deste atomizador, tem-se os aerossóis propriamente dito, embora polidispersivo e com uma umidade muito alta. A remoção da umidade é feita por um secador a base de silicagel.

Como o processo de condensação do vapor de água é altamente dependente do tamanho do aerossol, ou seja, do tamanho do núcleo de condensação, exige-se um controle deste parâmetro. Isto é, exige-se que o aerossol seja monodispersivo. Para tal, utiliza-se na saída do secador um classificador eletrostático, que no caso é o TSI3080. Por fim, a medida da concentração das partículas é feita por um contador de partículas condensáveis (CPC), no caso o TSI3025A.

O contador de partículas condensáveis TSI3025A é capaz de medir aerossóis com um diâmetro de 3nm até $3\mu\text{m}$ numa faixa de concentração de 0 até $9,99 \cdot 10^4$ partículas / cm^3 . Em condições normais, seu sensor de partículas opera em uma

atmosfera saturada de Butanol-1. Essa característica o torna sensível, não apenas aos aerossóis responsáveis pela formação das nuvens e das chuvas, mas a qualquer aerossol. Por essa razão, no processo de comparação, normalmente se utiliza apenas aerossóis higroscópicos (como por exemplo o sulfato de amônia, nitrato de amônia ou cloreto de sódio) que são capazes de sensibilizar tanto o CCNC-SDCC quanto o CPC TSI3025A.

Figura B.1: filtro para remoção de gotas de óleo, água e particulados (TSI3074B).

B.0.1 Prevenindo perda de partículas por deposição eletrostática

As medidas de aerossóis requerem um sistema de dutos para condução destes aerossóis até os mais variados instrumentos de medição. Dependendo das características físicas dos aerossóis e dos dutos, diversos mecanismos de perda de partículas podem interferir nas medições (??). Uma destas causas chama-se de perda por deposição eletrostática. Quando os aerossóis são produzidos em atomizadores, nebulizadores ou através de mecanismos naturais, alguns podem não estar eletricamente neutros. No caso destes aerossóis serem capturados pelos dutos de qualquer medidor de concentração, pode ocorrer de algumas partículas ficarem

Figura B.2: diagrama esquemático do atomizador (TSI3076).

retinas nos próprios dutos caso estes não sejam de material condutor e não estejam aterrados. Com o objetivo de verificar estas perdas, um experimento foi realizado e consistia em comparar a medida da concentração realizada pelo CPC em 2 condições: a primeira utilizando um duto coletor de 3 metros de plástico e a segunda utilizando um duto de aço inox de mesmo comprimento. A medida foi realizada durante 50 segundos para cada caso. O resultado deste experimento mostrou que este efeito não pode ser negligenciado no caso de dutos longos, pois, a diferença chegou a 13% na média como é mostrado na Tabela B.1 e na Figura B.7.

Tabela B.1: comparação entre concentrações medidas realizadas por dutos de aço e plástico

Tipo de duto	Concentração média
Aço	2611
Plástico	2272
Diferença	13 %

Figura B.3: secador (TSI3062).

Figura B.4: contador de partículas condensáveis CPC (TSI 3025A).

Figura B.5: classificador eletrostático (TSI 3080).

Figura B.6: vista geral da bancada (TSI 3080).

Figura B.7: perdas em função do tipo de duto.

Incertezas

Como mencionado na Seção 3.4, um dos procedimentos para se determinar o volume de amostragem consiste em posicionar um papel milimetrado alinhado com o LASER instalado na câmara de nuvens. Este procedimento, como qualquer outro relativo a medições, associa uma incerteza no valor do volume de amostragem. O valor da incerteza Δv_a de 1,76 do volume de amostragem é obtido a partir de uma análise da repercussão que um erro no posicionamento do papel milimetrado em relação a câmara digital, utilizado para calibração da relação *pixel*/milímetro, pode acarretar.

Considerando-se que o LASER tem aproximadamente 2 mm de diâmetro, é admitido um possível erro de posicionamento de ± 1.0 mm em relação ao eixo axial do mesmo no momento da calibração. Assim sendo, foram tiradas três fotografias do papel milimetrado nas posições 1.0 mm atrás do eixo, no centro do eixo e 1.0 mm a frente do eixo. Isto implica em três diferentes relações *pixel*/milímetro, sendo que a correta é aquela cujo papel milimetrado encontra-se perfeitamente alinhado com o centro axial do LASER. A possibilidade de um erro de ± 1.0 mm é uma condição bastante conservadora, pois, na prática o LASER fornece uma boa orientação no posicionamento do papel milimetrado dentro da câmara de nuvens. A fotografia

mostrada na Figura C.1 mostra o papel milimetrado posicionado dentro da câmara de nuvens e a Figura C.2 mostra a fotografia do papel milimetrado tirada pela câmara digital instalada na câmara de nuvens mostrando a relação *pixel*/milímetro e a incerteza de cada medida devido ao erro de posicionamento dentro da câmara de nuvens.

Figura C.1: papel milimetrado posicionado dentro da câmara de nuvens.

Figura C.2: fotografia do papel milimetrado tirada pela câmara do CCNC-SDCC para calibração considerando o erro da relação *pixel*/milímetro devido ao erro de posicionamento dentro da câmara de nuvens.

Conforme a Seção 3.4 o volume de amostragem V_a é definido por

$$V_a = \pi r^2 l, \quad (C.1)$$

em que r é o raio do cilindro definido pela luz LASER e l é o comprimento da luz LASER na região de interesse.

Os valores de r e l são obtidos, com a ajuda do papel milimetrado, através das relações:

$$r = \frac{ab}{2c} \quad e \quad (C.2)$$

$$l = \frac{de}{f}. \quad (C.3)$$

em que a é comprimento de c *pixels* na direção vertical, b é o número de *pixels* do diâmetro do laser estimados de acordo com a Seção 3.4, d é o comprimento de f *pixels* na direção horizontal e e é o máximo comprimento de *pixels* visíveis do volume de amostragem.

Considerando-se que a incerteza na determinação da relação *pixel*/milímetro implica em uma incerteza em r e l , a incerteza Δv_a é, desta forma, definida por:

$$\Delta v_a = \frac{\partial v}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial v}{\partial b} \Delta b + \frac{\partial v}{\partial c} \Delta c + \frac{\partial v}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial v}{\partial e} \Delta e + \frac{\partial v}{\partial f} \Delta f, \quad (C.4)$$

em que Δa , Δb , Δc , Δd , Δe e Δf são as incertezas dos respectivos parâmetros.

Os valores dos parâmetros e de suas incertezas são mostrados na Tabela C.1 a seguir:

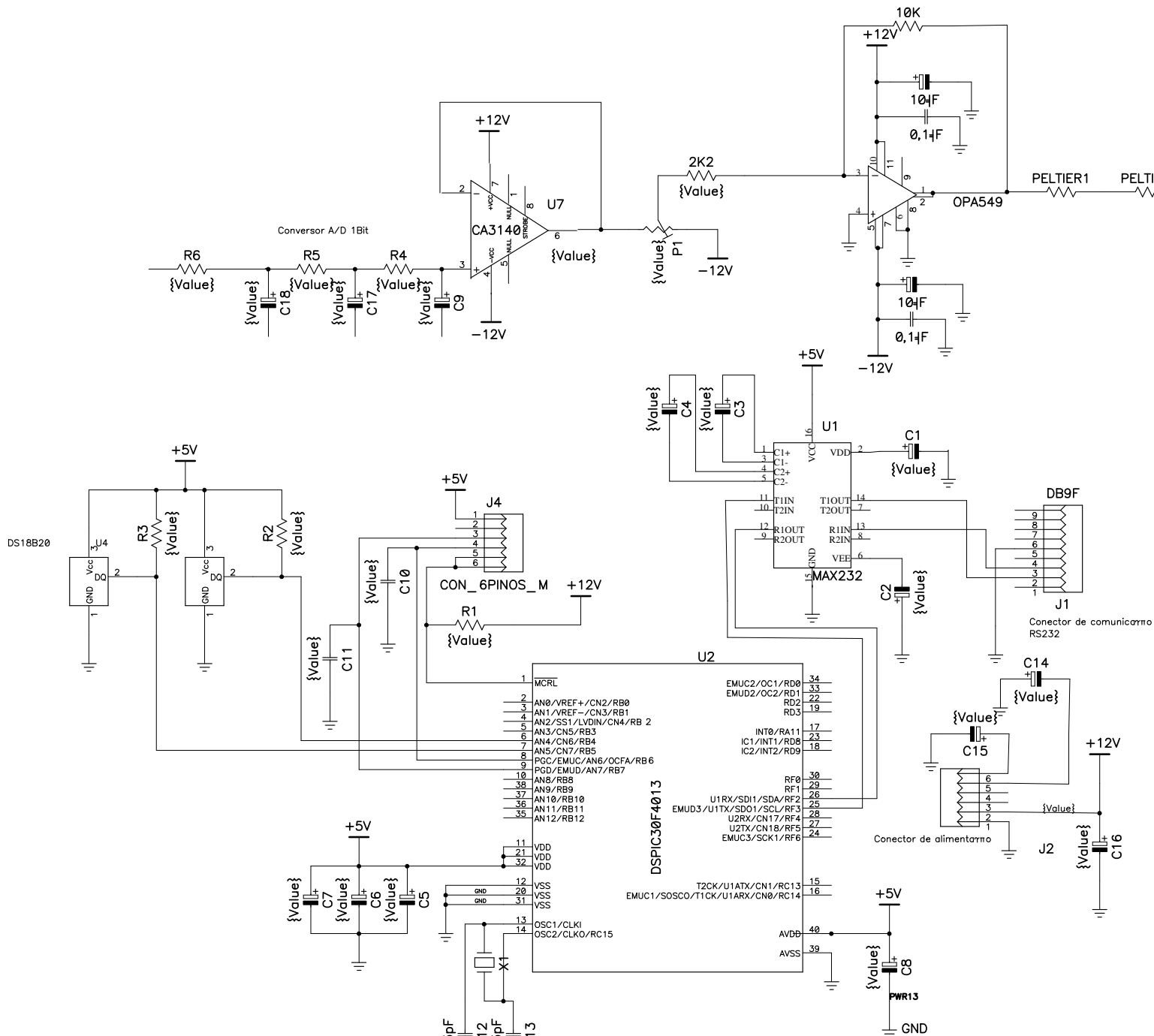
Tabela C.1: parâmetros e suas incertezas

Parâmetro	Medida	Incerteza	Unidade
a	2.0	0,05	mm
b	73	1	<i>pixel</i>
c	89	1	<i>pixel</i>
d	14	0.05	mm
e	620	10	<i>pixel</i>
f	606	10	<i>pixel</i>

Apêndice **D**

Diagrama elétrico do CCNC-SDCC

Figura D.1: diagrama elétrico da unidade de controle do CCNC-SDCC.



Referências Bibliográficas