

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

EDUARDO DAMBROS TELLI

**AVALIAÇÃO DE UM INJETOR AUTOMOTIVO PARA GERAÇÃO DE GOTAS NO
ESTUDO DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DO NÚCLEO DE REATORES
NUCLEARES A ÁGUA PRESSURIZADA**

CAXIAS DO SUL

2020

EDUARDO DAMBROS TELLI

**AVALIAÇÃO DE UM INJETOR AUTOMOTIVO PARA GERAÇÃO DE GOTAS NO
ESTUDO DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DO NÚCLEO DE REATORES
NUCLEARES A ÁGUA PRESSURIZADA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Área de concentração: Engenharia Térmica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini

CAXIAS DO SUL

2020

EDUARDO DAMBROS TELLI

**AVALIAÇÃO DE UM INJETOR AUTOMOTIVO PARA GERAÇÃO DE GOTAS NO
ESTUDO DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DO NÚCLEO DE REATORES
NUCLEARES A ÁGUA PRESSURIZADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito para a obtenção do Grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica da
Universidade de Caxias do Sul

Aprovada em: ____/____/____

Banca Examinadora:

Presidente

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Examinadores:

Prof. Dr. Francisco Catelli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Carlos Costa
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

No intuito de aperfeiçoar uma bancada experimental utilizada para fins de estudo das transferências mássicas e térmicas de um reator nuclear de água pressurizada (*Pressurized Water Reactor* - PWR) em situação de Acidente de Perda de Refrigerante (APR), surgiu a demanda de substituição de um injetor piezoelétrico por um outro capaz de fornecer maior vazão. As gotas de água são misturadas com vapor de água em alta temperatura, ocorrendo um escoamento disperso de vapor com gota, que reproduz os efeitos de transferências bifásicas. Este trabalho é uma caracterização do comportamento de um injetor automotivo eletromagnético Marelli™, operando com água desmineralizada com o objetivo de entender como ocorre a variação da vazão e das características das gotas do injetor em função de parâmetros ajustáveis como pressão e ciclo de trabalho. Os métodos de medição empregados foram a medição de vazão por pesagem, por tempo e a utilização da técnica de anemometria à raio laser (PDA) para medição do diâmetro e velocidade de gota. Os resultados fornecem curvas características do injetor que permitem comparar a capacidade de injeção requerida para a reprodução do escoamento em questão, contribuindo para os estudos da área. Ao final do trabalho, é feita uma comparação dos valores de diâmetro de gota, velocidade de gota e fração volumétrica de gotas entre o injetor piezoelétrico a ser substituído e o injetor automotivo em questão, concluindo que o último reproduz uma faixa de valores mais próximos daqueles encontrados na literatura para o escoamento disperso de vapor com gotas nas condições de APR.

Palavras chaves: Reatores PWR, PDA, injeção automotiva, propriedades de gota.

ABSTRACT

In order to improve an experimental workbench used to study the heat and mass transfer of a Pressurized Water Reactor (PWR) during a loss-of-coolant accident (LOCA) at sub-channel scale, has been emerged a demand for the replacement of a piezoelectric injector for another one capable to provide higher flow rate of injected water. These injected droplets are mixed with water vapor at high temperature, providing a dispersed steam-droplets flow that is injected in the test section. This work is an experimental characterization of a Marelli™ IWP220 electromagnetic automotive injector operating with demineralized water. The main purpose is to understand how the injector mass flow and droplet velocity and diameter vary according to adjustable parameters such as pressure injection and duty cycle. Scale weight apparatus was used to measure sprayed water mass through certain time to obtain mass flow rate and a Phase Doppler Anemometry (PDA) system to measure the droplets velocity by Doppler Effect and their diameter by phase difference. The results provided characteristic curves regarding these parameters, which in turn serve for evaluating and comparing injection capability to supply the desired droplet characteristics for dispersed flow film boiling studies. By the end of this document, a value comparison is made of droplet diameter, droplet velocity and volumetric between the piezoelectric injector to be replaced and the automotive injector, being the latter more suitable for reproducing LOCA condition values.

Keywords: PWR Reactors, Water refrigeration, automotive injection, droplet properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema transitório de temperatura e pressão no núcleo do reator em APR.	13
Figura 2 - Principais fenômenos físicos atuando no processo de reinundação de um APR. ...	14
Figura 3 - Esquema simplificado de uma central nuclear PWR.....	21
Figura 4 - Varetas combustíveis deformadas e rompidas: experimento PHEBUS-LOCA.....	23
Figura 5 - (a) Configuração LDA com dois feixes. (b) Volume iluminado.....	25
Figura 6 - Esquema do princípio de medição da técnica PDA.	26
Figura 7 - Diferentes regimes de fragmentação de gota de acordo com o número de Weber.	28
Figura 8 - Esquema de montagem da bancada COLIBRI.....	32
Figura 9 - Injetor de gotas piezoelétrico a ser substituído.....	33
Figura 10 - Esquema simplificado do procedimento experimental.	35
Figura 11 - Fluxograma do trabalho.	37
Figura 12 - Curvas características da vazão do injetor para diferentes condições.	38
Figura 13 - Distribuição do diâmetro médio das gotas com ciclo de trabalho de 50%.	39
Figura 14 – Distribuição da velocidade média com ciclo de trabalho de 50%.	39
Figura 15 – Correlação diâmetro e velocidade de gota para ciclo de trabalho de 50%.	40
Figura 16– Influência da temperatura de injeção na vazão.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número total de reatores nucleares operando e sob construção, janeiro 2015, classificados por tipo de reator	20
Tabela 2 Comparação de resultados entre diferentes métodos de injeção e condições de LOCA.....	41

LISTA DE SIGLAS

PDA	<i>Phase Doppler Anemometry</i>
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i>
PHWR	<i>Pressurized Heavy Water Reactor</i>
GCR	<i>Gas-Cooled, graphite-moderated Reactor</i>
LWGR	<i>Light-Water-cooled Graphite-moderated Reactor</i>
FBR	<i>Fast Breeder Reactor</i>
APR	Acidente de Perda de Refrigeração
COLIBRI	<i>COoLIng of a Blockage Region Inside a PWR Reactor</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

T_{gota}	Temperatura de gota
T_{sat}	Temperatura de saturação
T_{vapor}	Temperatura de vapor
T_{varetas}	Temperatura de tubo de zircaloy
P_{vapor}	Pressão de vapor
d_{gota}	Diâmetro de gota
α	Fração volumétrica
$\varepsilon_{\text{vareta}}$	Emissividade de tubo de zircaloy
RC	Ciclo de trabalho (<i>Rapport Cyclique</i>)
\tilde{u}_g	Velocidade média de gota em [m/s]
\tilde{d}_g	Diâmetro médio de gota em [μm]
α_{max}	Fração volumétrica máxima
α_{min}	Fração volumétrica mínima
$\dot{m}_{g\text{max}}$	Vazão mássica máxima de gotas obtidas nos experimentos
$\dot{m}_{g\text{min}}$	Vazão mássica mínima de gotas obtidas nos experimentos
$\dot{m}_{v\text{max}}$	Vazão mássica de vapor máxima na bancada COLIBRI
$\dot{m}_{v\text{min}}$	Vazão mássica de vapor mínima na bancada COLIBRI
ρ_g	Densidade da água à 100 °C
ρ_v	Densidade da água à 1,3 bar absoluto e 300 °C
R_{og}	Raio da gota inicial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	AMBIENTE DE TRABALHO.....	15
1.3	OBJETIVOS	15
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	ENERGIA NUCLEAR.....	17
2.2	REATORES NUCLEARES	18
2.3	ACIDENTE DE PERDA DE REFRIGERAÇÃO PRIMÁRIA (APR)	22
2.4	FENÔMENOS TERMOHIDRÁULICOS DA FASE DE REINUNDAÇÃO.....	23
2.5	TÉCNICA DE ANEMOMETRIA À RAIOS LASER (PDA).....	25
2.6	ESTUDOS REALIZADOS NA ÁREA	27
3	MÉTODOS E MATERIAIS	33
3.1	PROPOSTA DE EXECUÇÃO	33
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	34
3.3	INJETOR ELETROMAGNÉTICO	35
3.4	DISPOSITIVO PDA UTILIZADO.....	35
3.5	TRATAMENTO DOS DADOS	36
3.6	FLUXOGRAMA.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	43
	APÊNDICE A – GRÁFICOS UTILIZADOS PARA REGRESSÃO LINEAR E EQUACIONAMENTO DA VAZÃO	46
	APÊNDICE B – VALORES MÉDIOS DE DIÂMETRO E VELOCIDADE DE GOTA PARA OS DIFERENTES PONTOS DE TRABALHO	47
	APÊNDICE C – NUVEM DE PONTOS: VELOCIDADE X DIÂMETRO DE GOTAS PARA CICLO DE TRABALHO DE 20% E PRESSÃO DE 1 BAR	48
	APÊNDICE D - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM MODELO MATEMÁTICO DA VAZÃO	49

APÊNDICE E – CORRELAÇÕES VELOCIDADE X DIÂMETRO DE GOTA COM PRESSÃO FIXA	50
APÊNDICE F - CORRELAÇÕES VELOCIDADE X DIÂMETRO DE GOTA COM CICLO DE TRABALHO FIXO.....	51
APÊNDICE G – DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETRO DE GOTA COM PRESSÃO FIXA.....	52
APÊNDICE H – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE DE GOTA COM PRESSÃO FIXA.....	53
APÊNDICE I – DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETRO DE GOTA COM CICLO DE TRABALHO FIXO.....	54
APÊNDICE J – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE DE GOTA COM CICLO DE TRABALHO FIXO.....	55

1 INTRODUÇÃO

A utilização de água para resfriamento de superfícies quentes é um conceito muito usado em diversas aplicações quando o objetivo é extrair calor. Esta prática tem sido utilizada e estudada de diversas maneiras, sendo as mais comuns a utilização de jatos de água ou o aquecimento de grandes volumes de água. Segundo Webb e Ma (1995), a técnica de resfriamento por *spray* pode fornecer rebaixe de temperatura mais uniforme e controlada, com menos volume de água. A razão pela qual ainda não há tanta utilização, como os outros métodos convencionais de resfriamento, é que não há muito conhecimento sobre os fenômenos que ocorrem quando as gotas interagem com uma parede quente.

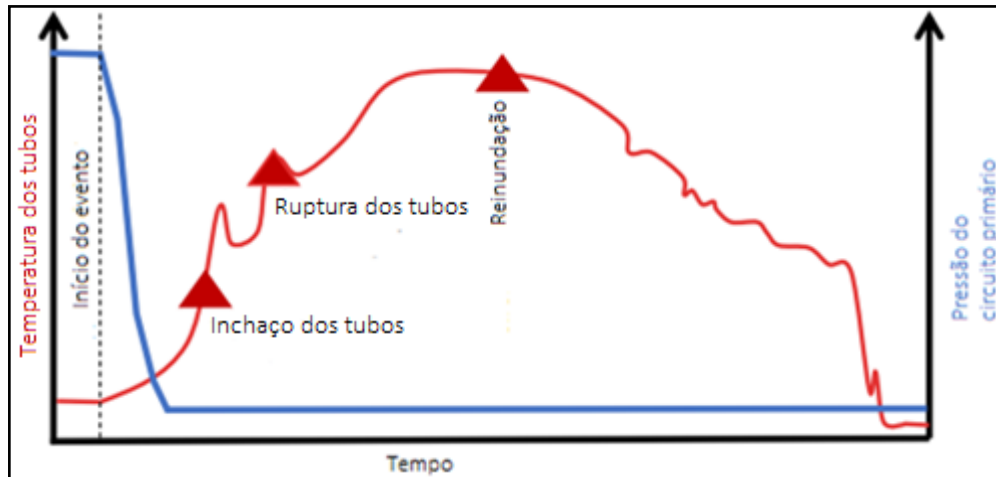
A aplicação de interesse deste trabalho é a implementação de um gerador de gotas em formato de *spray*, numa bancada que simula as condições de emergência (perda de refrigeração primária) de um reator nuclear à água pressurizada (PWR). É avaliada a capacidade de resfriamento dos tubos de zircaloy (varetas combustíveis), nos quais se encontra o combustível nuclear em forma de *pellets* (dióxido de urânio - UO_2 , com concentração de U235 em torno de 3%), quando o mesmo sofre um processo termohidráulico chamado de reinundação.

Uma central nuclear produz energia elétrica a partir do calor liberado pela fissão de um combustível nuclear. Uma das instalações mais comuns atualmente são as que utilizam água em alta pressão, em torno de 150 bar e podendo chegar à 325 °C – estado de líquido comprimido Breeze (2014), para absorver o calor gerado pela fissão nuclear. Essa água pressurizada está contida no chamado circuito primário da instalação, que então segue até um gerador de vapor, a partir do qual se tem o circuito secundário da instalação. Esse circuito conduz o vapor gerado para uma turbina na qual a energia térmica do fluido é convertida em energia elétrica. Um dos acidentes que pode acontecer nos reatores PWR é quando há perda de água do circuito primário, comprometendo o resfriamento das varetas de combustível. Acidente desta espécie, denominado Acidente de Perda de Refrigeração (APR), pode ser muito perigoso, e é por isto que todos reatores contam com um sistema de refrigeração de emergência.

Quando o reator se encontra nesta situação, os tubos de zircaloy que abrigam o material radioativo se expandem por causa da queda de pressão da água, podendo chegar à ruptura. Em seguida, a refrigeração de emergência é ativada e o núcleo do reator é resfriado novamente, essa etapa é chamada de reinundação. No momento da reinundação, a água encontra o núcleo em alta temperatura e por consequência é estabelecido um escoamento

bifásico de vapor com gotas com seção de passagem reduzida. O gráfico da Figura 1 ilustra o comportamento transitório da pressão e temperatura em situação de APR.

Figura 1 - Esquema transitório de temperatura e pressão no núcleo do reator em APR.



Fonte: adaptado de Peña Carillo (2018).

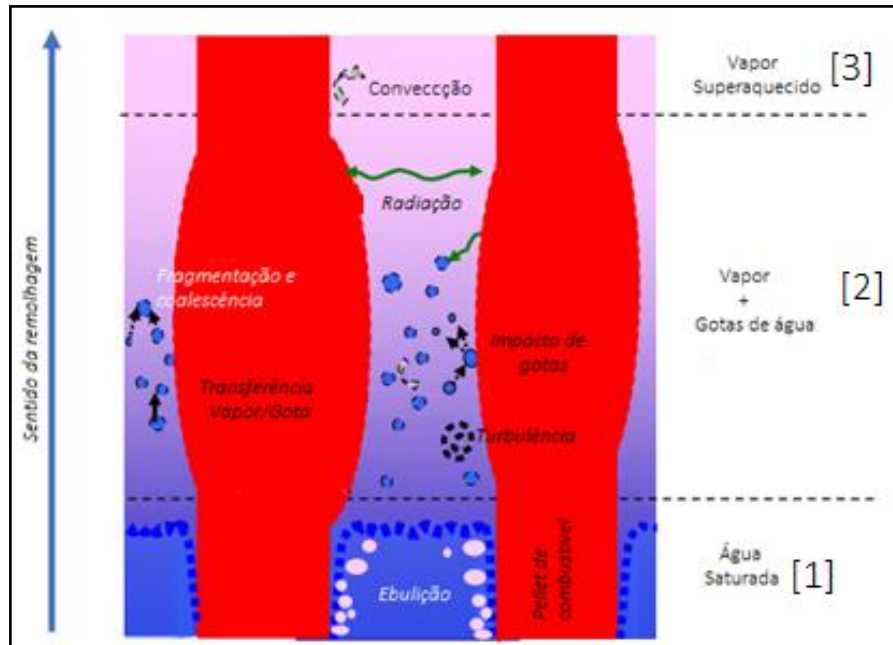
O interesse de estudar o injetor automotivo é para implementá-lo na bancada experimental COLIBRI (*COoLI*ng of a *B*lockage *R*egion *I*nside a PWR *R*eactor) e simular o fenômeno de formação de gotas que acontece durante o estabelecimento do escoamento bifásico na fase de reinundação no núcleo do reator. Em tal período ocorre um fenômeno termohidráulico complexo, em que a passagem do fluido de refrigeração é reduzida, devido ao inchaço dos tubos de zircaloy e ocorre um aumento da temperatura dos mesmos, ocasionando mudança de fase no fluido. Portanto, pode-se dividir a geometria de interesse em 3 zonas: zona de água saturada [1], zona de mistura de vapor e gotas de água [2] e vapor superaquecido [3], como mostrado na figura 2.

Dessa forma, há grande interesse de reproduzir em bancada os fenômenos termohidráulicos que ocorrem na região 2 (vapor com gotas de água). Para isso, faz-se necessário a implementação de um injetor para produção das gotas. Vale ressaltar que o injetor de gotas em questão é utilizado somente na bancada experimental e não nas instalações dos reatores nucleares.

Estudos de Lelong (2010), Lee, Reyes e Almenas (1984) e de Kim et al. (2017) mostram as diversas características termohidráulicas das gotas, do vapor e das varetas combustível na zona de vapor com gotas. Para estudar estes fenômenos, a bancada experimental COLIBRI foi elaborada no laboratório LEMTA (*Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée* – Nancy, França) com o intuito de reproduzir as

condições termohidráulicas mostradas na Figura 2. O objeto de estudo deste trabalho é um injetor eletromagnético atuando na rede de geração de gotas desta bancada mencionada.

Figura 2 - Principais fenômenos físicos atuando no processo de reinundação de um APR.



Fonte: adaptado de Peña Carillo (2018).

O estudo focaliza na caracterização do injetor mencionado, com o objetivo de extrair através de experimentos as informações necessárias como vazão e diâmetro e velocidade de gotas para descrever o funcionamento deste equipamento em diferentes condições de trabalho. Há interesse de estudos da área tais como Oliveira et al. (2020) e Glantz et al. (2018) em reproduzir as condições termohidráulicas em questão através de bancadas experimentais, reunindo resultados cujos dados completam um modelo matemático que descreve o escoamento de água na fase de reinundação no núcleo de um reator PWR em situação de APR. Entre as características do injetor de gotas a serem estudadas estão a vazão, diâmetro de gota e velocidade de gota, variando parâmetros controlados como a pressão e o ciclo de trabalho do injetor eletromagnético.

1.1 JUSTIFICATIVA

Dado a relevância da tecnologia nuclear para a geração de energia nos dias atuais, é imprescindível o estudo das situações de emergência destas instalações para que haja o avanço do controle sobre esta técnica de extração de energia da forma mais segura possível.

Para isto, é necessário compreender os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem dentro do núcleo do reator a água pressurizada em situação de APR.

Visto que o estudo é de alta complexibilidade, a escolha dos componentes e suas respectivas condições de operação, referentes à bancada experimental que reproduz os fenômenos reais chamada de COLIBRI, devem ser cuidadosamente escolhidos. Isso para que o estudo dos fenômenos de transporte se aproxime o máximo da realidade.

O injetor de gotas é um dos componentes desta bancada experimental e tem o papel fundamental de gerar as gotas de água que simulam o efeito de reinundação no núcleo do reator, que por sua vez é caracterizado por um regime bifásico vapor com gotas. Uma vez que o injetor é implementado, evidencia-se a importância de obter o equacionamento da vazão e as características das gotas em diferentes condições de trabalho, podendo-se dimensionar a bancada experimental de maneira a reproduzir efeitos mais próximos à realidade.

1.2 AMBIENTE DE TRABALHO

Durante a participação do autor desse trabalho no programa BRAFITEC (CAPES) na Universidade de Nancy, França, realizou-se um período de estágio de 2 meses no laboratório de transferências térmicas LEMTA (*Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée*), dessa universidade. No LEMTA foi realizado o estudo experimental em foco nesse trabalho seguindo a metodologia proposta por Peña Carrillo et al. (2019) e sob a tutela do pós-doutorando Arthur Oliveira e do Prof. Michel Gradeck.

Dado a necessidade da escolha de um gerador de gotas para bancada COLIBRI, surgiu a proposta da implementação do injetor automotivo eletromagnético Marelli™. O objetivo é atingir uma distribuição de gotas mais homogêneas e centradas verticalmente, com menos gotas acumuladas na parte da janela ótica. Tal fenômeno pode comprometer as medidas a laser da bancada, além da necessidade de garantir que o injetor produza gotas com características de mesma ordem de grandeza da situação real.

1.3 OBJETIVOS

Esta seção apresenta os objetivos gerais e específicos para auxiliar no desenvolvimento do trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

Realizar a caracterização do comportamento de um injetor eletromagnético automotivo com experimentos que verifiquem aspectos do mesmo em diferentes condições de pressão, temperatura e ciclo de trabalho, denominados parâmetros controlados.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atender o objetivo geral, são estabelecidos alguns objetivos específicos, que são:

- a) descrever a abordagem experimental detalhadamente;
- b) realizar medições de vazão para diferentes condições de trabalho, variando os parâmetros controlados;
- c) implementar a técnica de medida de anemometria a raio laser no jato de gotas nas diferentes condições dos parâmetros controlados, para obter diâmetro e velocidade de gotas em cada medida;
- d) compilar os dados, verificando a influência dos parâmetros controlados na vazão e no diâmetro e velocidade de gota.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão do assunto abordado no TCC, no qual se faz inicialmente uma contextualização da energia nuclear e suas implicações na sociedade. Em seguida, é apresentado o cenário atual dos reatores nucleares e as diferentes tecnologias implementadas. Também é descrita a situação de APR de reatores, mais especificamente os fenômenos físicos que ocorrem na região bifásica em etapa de reinundação. São abordados também os princípios de medição de tamanho e velocidade de gota pela técnica PDA (*Phase Doppler Anemometry*), assim como noções sobre a teoria da formação de gotas. Além disso é feita a descrição dos trabalhos realizados na área, incluindo os estudos realizados com a bancada experimental COLIBRI, a qual utiliza o injetor eletromagnético, objeto de estudo do presente trabalho.

2.1 ENERGIA NUCLEAR

Como é descrito no trabalho sobre a história da energia nuclear do *U.S Department of Feely* (1984), no início do século XX, cientistas teóricos já sabiam que átomos carregavam uma imensa quantidade de energia. Conforme o passar dos anos, o conhecimento sobre a física nuclear cresceu rapidamente com diferentes contribuições. Porém, na prática, a série de fissões de átomos geradas, chamada de reação em cadeia, foi controlada pela humanidade pela primeira vez em Chicago, 1942, dando início a era nuclear (DOE/NE-0088).

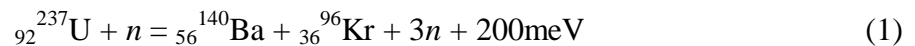
A relação com essa nova tecnologia foi iniciada justamente na época da segunda guerra mundial e, inicialmente, a motivação para sua exploração era substancialmente bélica. No período pós-guerra, os cientistas começaram a se concentrar em aplicações pacíficas da tecnologia nuclear. Um uso importante desta descoberta é para geração de energia elétrica, tal ideia que se tornou uma grande promessa de eletricidade limpa e ilimitada para a civilização (DOE/NE-0088).

A importância da busca por fontes de energia renovável é inquestionável nos dias de hoje. A situação dos recursos energéticos terrestres é extensivamente discutida no livro de David Bodanksy (2005), salientando a crescente necessidade de buscar-se fontes alternativas.

Muitos países começaram a desenvolver seus próprios designs de reatores nucleares de primeira geração, nos quais aconteceram terríveis acidentes, comprometendo a reputação e o avanço da extração da energia nuclear. Porém conforme o passar dos anos, o avanço

tecnológico e estudos na área fizeram com que as instalações nucleares tivessem seu design sendo convergido para alguns modelos principais que estão em operação nos dias de hoje. Há dois tipos de reações nucleares, descritos no trabalho de Breeze (2014): a fissão e a fusão, sendo a fissão a mais comumente utilizada (BODANSKY,2004).

A fissão nuclear usada na maioria das instalações atualmente consiste na separação de um átomo de urânio, tal reação que começa quando um nêutron atinge o núcleo do átomo de urânio-235, tendo como produtos outros elementos como boro, criptônio e mais nêutrons, assim como uma enorme quantidade de energia:



A reação mostrada na equação (1) se auto-alimenta, visto que os produtos na forma de nêutrons podem desencadear outras reações. Já a fusão nuclear consiste na união de átomos para criar um outro de maior massa. É uma das principais reações que liberam energia no sol. É possível ser uma fonte de energia no futuro, porém, cientistas não foram capazes de produzir quantidades consideráveis de energia com a fusão e continuam realizando pesquisas (BODANSKY, 2004).

2.2 REATORES NUCLEARES

Reator nuclear é o nome designado às instalações que nas quais é controlada a reação nuclear. Existem diversos designs, porém há muitos aspectos semelhantes entre cada modelo. As principais características chave dos reatores estão nas diferentes escolhas de combustível, refrigerador, moderador nuclear e material para absorção de nêutrons (BREEZE, 2014).

O elemento combustível utilizado, por exemplo, é urânio (dentre protactínio ou tório) pois é o único com quantidades úteis de material físsil encontrado na natureza. O urânio é composto de dois isótopos: urânio-235, utilizado para desencadear a reação em cadeia e compõe 0,7%, enquanto o resto é urânio-238, um material não físsil.

Urânio natural pode ser usado como combustível na fissão nuclear, porém, na maioria das vezes, o material passa por algum processo de enriquecimento¹ (difusão gasosa, separação centrífuga, processo aerodinâmico, etc) para que possua até 3% de urânio-235 em sua composição. Assim é facilitado o desencadeamento e a sustentação da reação em cadeia da fissão nuclear (BREEZE, 2014).

¹ Pode ser por difusão gasosa, separação centrífuga, processo aerodinâmico, entre outros.

O núcleo do reator é onde o combustível nuclear é posicionado e a reação acontece. Normalmente o combustível é inserido em pequenos *pellets* de 2 cm de diâmetro e comprimento de 1 a 2 cm, onde são carregados dentro de uma vareta, um tubo fino feito de liga de zircônio². Cada vareta tem de 3 a 4 metros de comprimento e contém de 150 a 200 *pellets*, sendo que apenas um reator pode conter até 75000 varetas combustíveis Breeze (2014). Estas varetas são normalmente arranjadas em formato quadrático. Na França, os PWR's possuem em seu núcleo um arranjo de varetas de 17 por 17, totalizando 289, onde 264 destes possuem combustível no interior e o resto serve para sustentação do arranjo (PEÑA CARILLO, 2018).

Entre as varetas combustíveis estão arranjados bastões de boro, usados para controlar a reação. Estes bastões podem ser movidos para dentro e para fora do núcleo do reator, ajustando a velocidade da reação ou parando-a completamente. Dentro do núcleo também estará contido um moderador para retardar os nêutrons da fissão dos átomos de urânio. Em alguns casos o moderador também é a próprio fluido refrigerante (BREEZE, 2014).

O moderador absorve tanto o calor produto da reação como calor proveniente da energia cinética das partículas, em seguida troca calor com o refrigerante. O fluido refrigerante absorvendo calor é conduzida para o gerador de vapor, no qual é produzido vapor para alimentar uma turbina. O fluido refrigerante pode ser água (H₂O), deutério (água pesada - D₂O), um gás como hélio ou dióxido de carbono ou ainda algum metal como sódio.

O núcleo é revestido em suas extremidades e também em seu centro por material que age como um refletor, retornando os nêutrons propensos a escapar do núcleo. Isto gera uma densidade de energia mais uniforme dentro do núcleo. O reator contém também diversos elementos para garantir a segurança, isto inclui uma isolamento de concreto e aço que cerca totalmente a instalação para evitar que a radioatividade chegue ao meio exterior em caso de acidente (BREEZE, 2014).

Através da pesquisa publicada por IAEA (2015), é possível ver na Tabela 1 a lista dos principais modelos de reatores nucleares no ano de 2015 com suas respectivas características. O *design* dominante de reator são os chamados *Light Water Reactor* (LWR), que utilizam água comum tanto como moderador, quanto como fluido refrigerante, e urânio enriquecido como combustível. Há dois tipos de reatores LWR: reator à água pressurizada (PWR) e reator a água em ebulição (BWR). Juntos eles correspondem à 81% dos reatores em operação em

² Também denominado de *zircaloy*.

2015, sendo que as instalações de PWR em construção equivalem à 85% de todos reatores sendo construídos no ano.

Tabela 1 - Número total de reatores nucleares operando e sob construção, janeiro 2015, classificados por tipo de reator

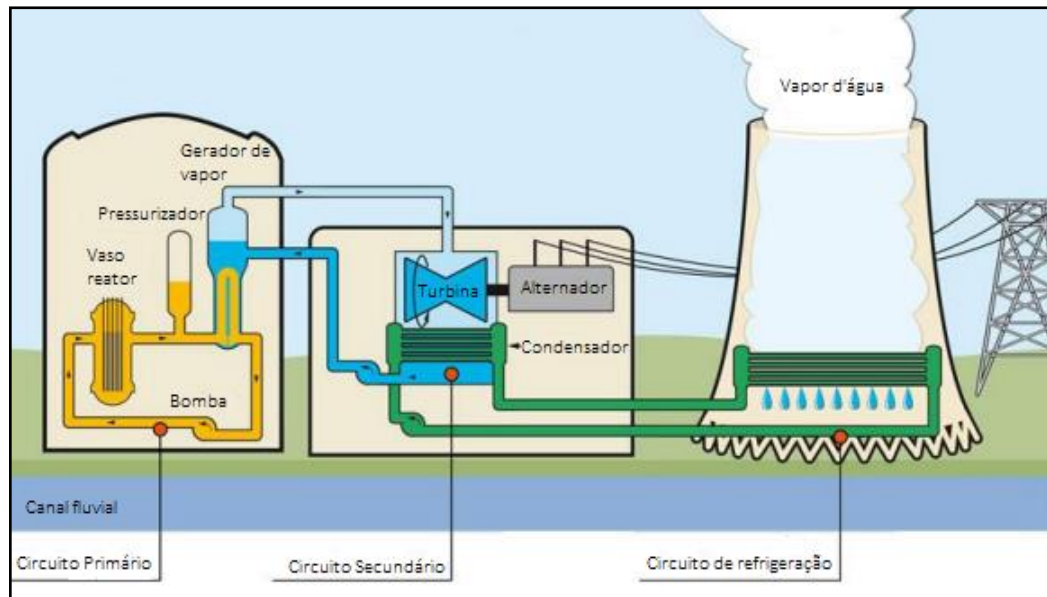
Tipo de reator	Em operação	Em construção	Combustível	Moderador	Fluido Refrigerante	Procedência
PWR	277	59	UO ₂ enriquecido	H ₂ O	H ₂ O	EUA
BWR	80	4	UO ₂ enriquecido	H ₂ O	H ₂ O	EUA
PHWR	49	4	UO ₂ natural	D ₂ O	D ₂ O	Canadá
GCR	15	0	U	C	CO ₂	Reino Unido
LWGR	15	0	UO ₂ enriquecido	C	H ₂ O	EUA/URSS
FBR	2	2	UO ₂ + PuO ₂	Nenhum		Vários
TOTAL	438	69				

Fonte: Adaptado de IAEA (2015).

O reator PWR utiliza água comum desmineralizada como fluido refrigerante e moderador. Um diferencial deste modelo de reator é que o refrigerante é mantido sob alta pressão, sendo seu núcleo composto por água à 150 bar e temperatura que pode chegar à 325 °C, impedindo o fluido de entrar em ebulição. Observando o esquema simplificado de uma instalação PWR na Figura 3, nota-se outra particularidade: o fato da água no circuito primário não mover a turbina e não ser misturada com a água do circuito secundário (BREEZE, 2014).

O calor é transferido de um circuito para o outro através de um trocador de calor (gerador de vapor), sendo a água do circuito secundário evaporada e responsável por mover a turbina, cuja potência de saída é utilizada para alimentar um alternador gerando eletricidade na rede. O vapor a baixa pressão na saída da turbina condensa por meio de água de resfriamento proveniente de uma fonte natural (rio, mar, oceano, etc.). A água de resfriamento pode operar em circuito aberto no caso de usar uma fonte natural à temperatura ambiente. Ou então, em circuito fechado, utilizando uma torre de resfriamento, tal qual possui uma superfície de troca térmica suficientemente grande para resfriar com a ação de uma corrente de ar ascendente (PEÑA CARILLO, 2018).

Figura 3 - Esquema simplificado de uma central nuclear PWR



Fonte: Adaptado de Peña Carillo (2018).

A utilização de um segundo ciclo de água faz este modelo de reator ser menos eficiente, porém, o urânio usado como combustível possui um nível de enriquecimento maior do que os reatores BWR. Isso gera uma maior densidade de energia no núcleo e, conseqüentemente, reatores mais compactos. Um reator PWR tem capacidade típica de geração de 1000 MW, possuindo um rendimento de aproximadamente 33%³ (BREEZE, 2014).

Já sobre o modelo BWR, pode-se afirmar que é o principal modelo alternativo para o PWR Bodansky (2004). No reator BWR a água em ebulição, a água no núcleo entra em ebulição sob uma pressão de 75 bar, a uma temperatura de 285 °C. O vapor gerado é usado diretamente para mover a turbina à vapor, e em seguida é condensado e reaproveitado para alimentar o núcleo novamente. É provavelmente o *design* mais simples para um reator nuclear, os BWR's possuem uma eficiência perto de 33% e capacidade de até 1400 MW (BREEZE, 2014).

Outro tipo de reator que vale mencionar é o PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*). Também conhecido como CANDU (*Canadian Deuterium Uranium*), foi desenvolvido no Canadá com a estratégia de fabricar uma instalação nuclear na qual o urânio não precisasse passar pelo caro processo de enriquecimento. Ao invés disto, este reator utiliza urânio natural como combustível. Além disso, tanto o moderador como o fluido refrigerante é

³ O rendimento termodinâmico teórico de Carnot para uma central PWR é de aproximadamente 50% Peña Carrillo et al. (2019)

composto de água pesada⁴. Água pesada tem o dobro de massa da água comum e é usada pois absorve uma menor quantidade de nêutrons, possibilitando sustentar a reação nuclear sem a necessidade de utilizar urânio enriquecido (BREEZE, 2014).

2.3 ACIDENTE DE PERDA DE REFRIGERAÇÃO PRIMÁRIA (APR)

Um dos acidentes de dimensionamento de um reator PWR é o acidente de perda de refrigeração primária (APR), ou LOCA (*Loss of Cooling Accident*). Mesmo que a probabilidade de acontecer um acidente deste tipo seja muito baixa, as consequências são potencialmente perigosas, o que justifica a necessidade de conhecer os fenômenos que ocorrem nessa situação. Tal assunto foi estudado, além de prevenir acidentes, também para dimensionar o sistema de segurança de injeção de água no circuito primário (PEÑA CARILLO, 2018).

O APR acontece quando há uma fuga de água do circuito primário seja por alguma espécie de ruptura, seja por algum defeito de um elemento secundário do sistema. Este acidente já foi objeto de diversos estudos sendo um deles um teste experimental chamado PHEBUS-LOCA. Um fator com grande influência nas consequências do APR é o tamanho da ruptura. No caso de uma grande ruptura, o acidente pode se decompor em diversas fases distintas, como apresentadas na Figura 1.

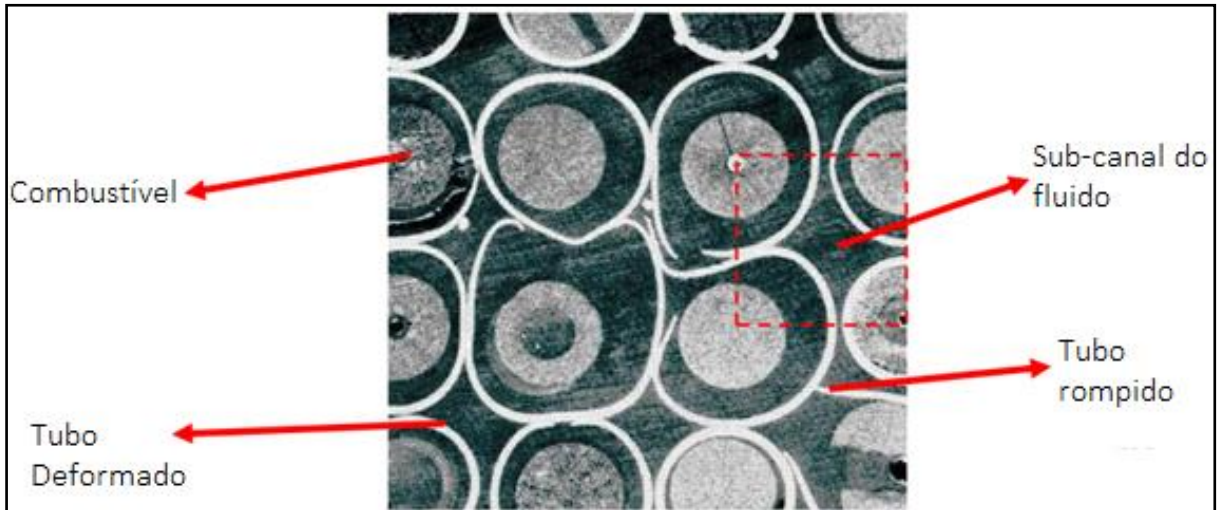
Chama-se a fase 1 de depressurização, que acontece logo após o vazamento de água. É caracterizada por uma violenta queda de pressão acompanhada de muita evaporação da água do circuito primário. Essa evaporação mássica leva o núcleo a perder muita água em um curto espaço de tempo, sendo praticamente esvaziado e secando o arranjo das varetas combustíveis. O núcleo do reator para de receber refrigeração e a reação nuclear é interrompida pelas barras de controle e pelo fato de não haver o agente moderador dos nêutrons. As varetas combustíveis ainda emitem potência térmica residual, que não é mais retirado do sistema, então ocorre um alto aumento de temperatura dos tubos que abrigam o combustível nuclear. A depressurização destes tubos pode conduzir ao inchaço dos mesmos, e em seguida sua ruptura, lançando produtos radioativos no circuito primário. Este fenômeno pode-se observar na Figura 4 (PEÑA CARILLO, 2018).

A fase 2 é denominada de enchimento e nela ocorre o acionamento automático dos sistemas de segurança de injeção de água com o intuito de evacuar o calor residual das varetas

⁴ Água pesada (D₂O) é uma forma de água na qual os dois átomos de hidrogênio são substituídos por um isótopo chamado deutério, tal qual possui um nêutron extra e consequentemente o dobro de massa.

combustíveis. Neste primeiro momento, grandes reservatórios de água à 45 bar chamados de acumuladores permitem que água flua até o vaso do reator, enchendo parte dele e eventualmente refrigerando as varetas combustíveis (PEÑA CARILLO, 2018).

Figura 4 - Varetas combustíveis deformadas e rompidas: experimento PHEBUS-LOCA.



Fonte: Adaptado de Peña Carillo (2018).

Na fase 3, chamada de reinundação, a injeção de segurança efetivamente bombeia água para o circuito primário e deve garantir a refrigeração do núcleo do reator a longo prazo. Sendo esta a razão de ser objeto de tantos estudos, conhecer os fenômenos térmicos e hidráulicos que ocorrem no núcleo na fase 3, sendo essencial para aprimorar as instalações dos reatores PWR. É nesta fase o momento quando ocorre os fenômenos termohidráulicos discutidos na introdução deste trabalho e ilustrados na Figura 2 (PEÑA CARILLO, 2018)..

2.4 FENÔMENOS TERMOHIDRÁULICOS DA FASE DE REINUNDAÇÃO

Como apresentado na Figura 2, existem 3 regiões distintas no arranjo das varetas combustíveis durante o processo de reinundação. A primeira zona caracteriza-se pela água saturada, onde o fluido é majoritariamente monofásico líquido. O início desta zona é marcado por mecanismos de ebulição nucleada, e conforme o escoamento se desenvolve, seu regime muda para ebulição em filme. O filme de vapor se forma em torno dos tubos de zircaloy e as transferências convectivas e radiativas causam uma evaporação em massa, enquanto as gotas de água remanescentes são levadas pelo vapor para a região de vapor com gotas. O limite superior desta zona é chamado de frente de resfriamento.

Na zona bifásica, [2], o vapor transporta as gotas à uma temperatura próxima da saturação. As transferências térmicas são caracterizadas principalmente pela convecção forçada entre os tubos e o vapor de água, a radiação e os impactos das gotas nas paredes dos tubos. Em seguida forma-se a zona [3], marcada por um escoamento monofásico de vapor superaquecido onde os principais fenômenos de transferência térmica são convecção forçada e radiação (PEÑA CARILLO, 2018).

Muitos são os esforços para estudar a capacidade de resfriamento na região [2] de vapor com gotas. No estudo de Kim et al. (2017), experimentos de reinundação foram reproduzidos para compreender o efeito do comprimento da zona bloqueada no resfriamento variando a taxa de reinundação. Foi utilizado um arranjo 2x2 de tubos aquecidos eletricamente simulando uma mesma proporção de bloqueio, porém, em diferentes comprimentos. As características de transferência térmica foram avaliadas para investigar a influência da região bloqueada no resfriamento. Também foi observado o comportamento das gotas pelo diâmetro e velocidade na região de bloqueio.

Já no trabalho de tese de Lelong (2010), foi realizado um estudo sobre a interação de gotas com superfície quente, tendo como referencial bibliográfico fontes nas quais são determinadas as condições termohidráulicas da região vapor com gotas na fase de reinundação do APR. No estudo constam tanto trabalhos experimentais como teóricos.

Em estudos feitos por Lee et al. (1984) foi desenvolvido um modelo no qual foi descrita a evolução da população e tamanho das gotas na região bifásica de reinundação. São constatados dois mecanismos de geração de gotas nesta zona: fragmentação de filme e hidrodinâmica. A taxa de evaporação das gotas é analisada tomando em conta as trocas térmicas por convecção e radiação.

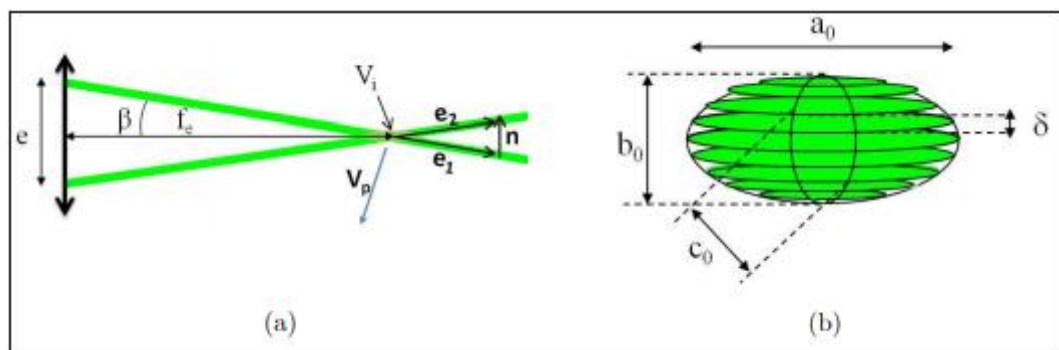
Compilando os trabalhos de Kim et al. (2017), de Lelong (2010) e de Lee et al. (1984), obtém-se as seguintes informações termohidráulicas sobre a região de vapor com gotas na fase de reinundação de um PWR em APR:

- Gotas de água com temperatura $T_{gota} < T_{sat}$; $50 < d_{gota} < 1000 \mu\text{m}$ e fração volumétrica de gotas para cada metro cúbico entre $10^{-4} \text{m}^3_{\text{g}}/\text{m}^3_{\text{v}}$ e $10^{-2} \text{m}^3/\text{m}^3_{\text{v}}$.
- Vapor a $T_{sat} < T_{vapor} < 800 \text{ }^\circ\text{C}$ e $P_{vapor} < 3 \text{ bar}$.
- Varetas combustíveis a $300 \text{ }^\circ\text{C} < T_{varetas} < 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ e emissividade $0.5 < \varepsilon_{varetas} < 0.8$.

2.5 TÉCNICA DE ANEMOMETRIA À RAIO LASER (PDA)

A medição da velocidade de uma partícula pode ser obtida pela técnica LDA (*Laser Doppler Anemometry*). As bancadas para realizar esta medição são compostas de uma fonte de laser cujo feixe é dividido em dois, separados por uma distância e e focalizados em um ponto. Neste ponto é formado um volume iluminado V_i e possui um formato de elipse de dimensões a_0 , b_0 e c_0 . Devido à coerência da fonte luminosa, o volume iluminado constitui-se de planos sucessivamente iluminados e sombreados, separados por uma distância δ (PEÑA CARILLO, 2018). A Figura 5 apresenta o esquema de funcionamento da técnica LDA.

Figura 5 - (a) Configuração LDA com dois feixes. (b) Volume iluminado.



Fonte: Adaptado de Peña Carillo (2018)

Assim que uma gota atravessa o volume iluminado, a luz difusa descreve um sinal modular no qual a frequência, chamada de frequência Doppler f_D , depende da velocidade da gota de acordo com a seguinte equação:

$$f_D = [(2 \cdot \sin \beta / \lambda_{laser})] \cdot u_n \quad (2)$$

sendo u_n a componente na direção n da velocidade da gota u_g , perpendicular ao plano de interferência. É possível medir outra componente da velocidade se for usado uma outra fonte de laser de comprimento de onda diferente, orientando os feixes de tal maneira que o segundo volume iluminado seja ortogonal ao primeiro. Para detectar o sinal, é utilizado um fotodetector, cujo sinal é amplificado antes de ser registrado pelo processador que calcula a frequência f_D .

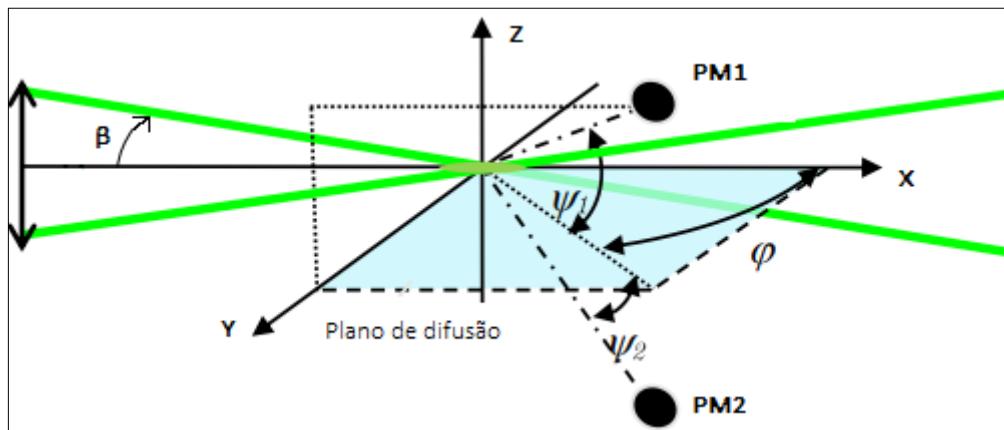
A técnica PDA é uma extensão da LDA. O princípio consiste em analisar o sinal modular Doppler utilizando dois detectores em posições distintas no espaço, provocando uma

defasagem entre os dois sinais. Esta defasagem é diretamente proporcional ao diâmetro da gota d_g .

$$\Delta\phi_{12} = d_g \cdot H_{12} \quad (3)$$

O parâmetro H_{12} designa o fator de fase entre os foto-detectores PM1 (Ponto de medição 1) e PM2 (Ponto de medição 2) mostrados na Figura 6. Este parâmetro depende da configuração experimental: índice de refração das gotas n_{gotas} e do meio n_{meio} , o semi-ângulo dos feixes incidentes β , ângulo de difusão φ (posição da ótica de recepção em relação ao plano definido pelos dois feixes incidentes) e ângulo de elevação dos dois foto-detectores ψ_1 e ψ_2 em relação ao plano de difusão.

Figura 6 - Esquema do princípio de medição da técnica PDA.



Fonte: Adaptado de Peña Carillo (2018)

Quanto mais próximos são os dois foto-detectores (ψ_1 e ψ_2 pequenos), maior será o diâmetro máximo detectável ($d_{g,max}$). Vale ressaltar que este diâmetro máximo depende também da configuração ótica e dos índices de refração das partículas e do meio. Como a defasagem dos ângulos é uma função periódica de 0 à 2π , sendo o valor máximo em 2π , quando é detectado um diâmetro superior à $d_{g,max}$ o cálculo resulta em um valor menor. Para solucionar esta ambiguidade, usa-se um terceiro foto-detector para analisar uma segunda defasagem angular (PEÑA CARILLO, 2018).

2.6 ESTUDOS REALIZADOS NA ÁREA

Conceito importante para o presente estudo, o regime de Leidenfrost é descrito na sétima edição do livro de Incropera e Dewitt (2011) e pode ser definido como o regime de ebulição que ocorre quando a temperatura da superfície de contato do fluido é superior à temperatura de saturação, formando uma camada de vapor próximo à superfície e dificultando a troca de calor entre o fluido e a superfície. Apesar dos experimentos a serem realizados neste trabalho não se encontrarem dentro do regime de Leidenfrost, muitos dos experimentos que servem como referência neste trabalho, inclusive aqueles feitos por Peña Carrillo (2018) na bancada COLIBRI ocorrem em tal regime.

No âmbito da realização de estudos nos quais é envolvida a análise de formação de gotas, é usado com frequência o número adimensional de Weber definido por:

$$We = (\rho \cdot v^2 \cdot d) / \sigma \quad (4)$$

Onde:

ρ é a densidade do fluido (kg/m³);

v é sua velocidade (m/s);

d é a dimensão característica do fluido, tipicamente usado o diâmetro de gota (m);

σ a tensão superficial (N/m).

Esta equação expressa a relação das forças inerciais com a tensão superficial. Estudos de Pilch e Erdman (1987) indicam que existe um número de Weber crítico ($We_{crítico}$) igual à 12, que determina o ponto em que acontece a fragmentação de gota no escoamento. Pode-se observar na Figura 7 os diferentes regimes de fragmentação de gotas de acordo com o número de Weber.

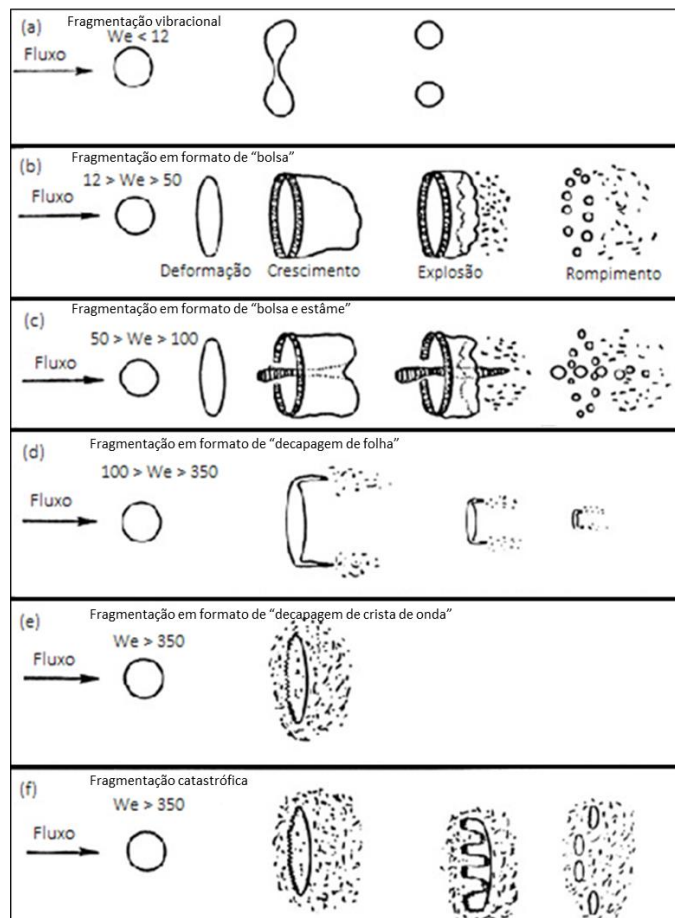
Além deste, outro parâmetro adimensional usado com frequência nos estudos da área é o número de Mundo (K). Desenvolvido por Mundo et al. (1995), este parâmetro leva em conta a dependência da viscosidade na caracterização dos impactos através de uma relação com o número de Weber e o número de Reynolds.

$$K = \sqrt{We} \cdot Re^{0.25} \quad (5)$$

Labergue et al. (2017) realizaram um estudo do uso de um gerador de gotas (*spray*) no resfriamento de um disco aquecido. Diversos experimentos permitiram caracterizar o fluxo de calor removido pelo *spray* utilizando técnicas de medição com termopares e câmera infravermelha. Porém, para investigar de maneira mais eficiente os mecanismos de troca térmica é necessário medir a temperatura de gota. O objetivo deste trabalho foi demonstrar a habilidade da combinação da técnica de laser induzido por fluorescência (3cLIF), para medição de temperatura de gota, juntamente com a técnica PDA. Isso permitiu determinar a temperatura de gota por classe de tamanho antes e depois do impacto na superfície quente. Foi ainda analisado a influência do número de Weber na vaporização do líquido.

Na Figura 7, pode-se observar a classificação do regime de fragmentação de gota realizado pelos autores Pilch e Erdman (1987). Tais experimentos foram realizados em um meio líquido-gás por fragmentação: a) vibracional; b) em formato de sacola; c) em formato de sacola com estame; d) em formato de decapagem em folha; e) em formato de decapagem em crista de onda; f) catastrófica.

Figura 7 - Diferentes regimes de fragmentação de gota de acordo com o número de Weber.



Fonte: Adaptado de Pilch; Erdman (1987).

Estudos mais aprofundados sobre a fragmentação das gotas em superfícies quentes foram feitos, especialmente sob o regime de Leidenfrost. Um deles realizado por Wachters et al. (1966) fizeram experimentos de impactos de gotas de água em uma superfície aquecida de alumínio, classificando da seguinte maneira:

- $We < 5$ o choque é elástico;
- $5 < We < 30$ a gota realiza um movimento de bate-volta sem sofrer grandes deformações;
- $30 < We < 80$ as gotas são deformadas sem desintegração;
- $We > 80$ a gota se desintegra;

No estudo de Castanet et al. (2009), a partir de uma série de dados experimentais, construíram cartogramas de impactos de gotas em função de K e T^* , sendo K o número de Mundo e a temperatura adimensional como:

$$T^* = \frac{T_{parede} - T_{sat}}{T_{leidenfrost} - T_{sat}} \quad (6)$$

Através destes cartogramas conclui-se que o regime de impacto predominante nas condições de APR é de bate-volta.

No estudo dinâmico dos impactos de bate-volta das gotas em regime de Leidenfrost, a literatura aponta dois principais aspectos: o tempo de vida da gota e o diâmetro de espalhamento da mesma.

$$t_{vida} = C \sqrt{\frac{\rho_{gota} \cdot d_{gota}^3}{\sigma}} \quad (7)$$

$$d_e = f(t) \quad (8)$$

Com experimentos recentes, Lelong et al. (2010) desenvolveram experimentalmente uma correlação para o calor trocado entre a gota e a parede, considerando transferências térmicas por convecção e radiação:

$$Q = \int_0^{t_{vida}} h \cdot (T_p - T_{v_{media}}) \cdot \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} dt + \int_0^{t_{vida}} \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot (T_p^4 - T_g^4) \cdot \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} dt \quad (9)$$

Para descrever a dinâmica do impacto, uma analogia com o sistema massa/mola foi utilizada. A solução da equação dinâmica do sistema permite expressar a evolução do diâmetro de espalhamento como:

$$d_e(t) = \sqrt{2 \cdot R_{og}^3} \cdot \left(\frac{g}{w_0}\right) \cdot e^{-\left(\frac{\eta}{m_g}\right)t} \cdot \left[\cos(w_1 \cdot t) - \frac{w_0}{w_1} \cdot \left(\frac{2 \cdot u_{gn} \cdot w_0}{2 \cdot \pi \cdot g} + \frac{\eta}{m_g \cdot w_0}\right) \cdot \sin(w_1 \cdot t) \right] - \frac{g}{w_0^2} + 2 \cdot R_{og} \quad (10)$$

Sendo:

$$w_0^2 = \frac{2 \cdot k_{eq}}{m_g} \quad (11)$$

$$w_1 = \sqrt{w_0^2 - \left(\frac{\eta}{m_g}\right)^2} \quad (12)$$

Sendo que os parâmetros k_{eq} e η representam a constante de rigidez e amortecimento do sistema, expressos em função da dinâmica da gota – We e Re:

$$k_{eq} = 0,8 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot (0,92We + 1,25) \quad (13)$$

$$\eta = 0,1 \cdot \mu \cdot d_g \cdot Re^{0,9} \quad (14)$$

Conhecendo o coeficiente de transferência térmica h é possível estimar a energia extraída pelo impacto de uma gota. Gradeck et al. (2013) utilizaram dados experimentais e concluiu-se que este coeficiente h é altamente dependente da temperatura da parede e pouco do número de Weber.

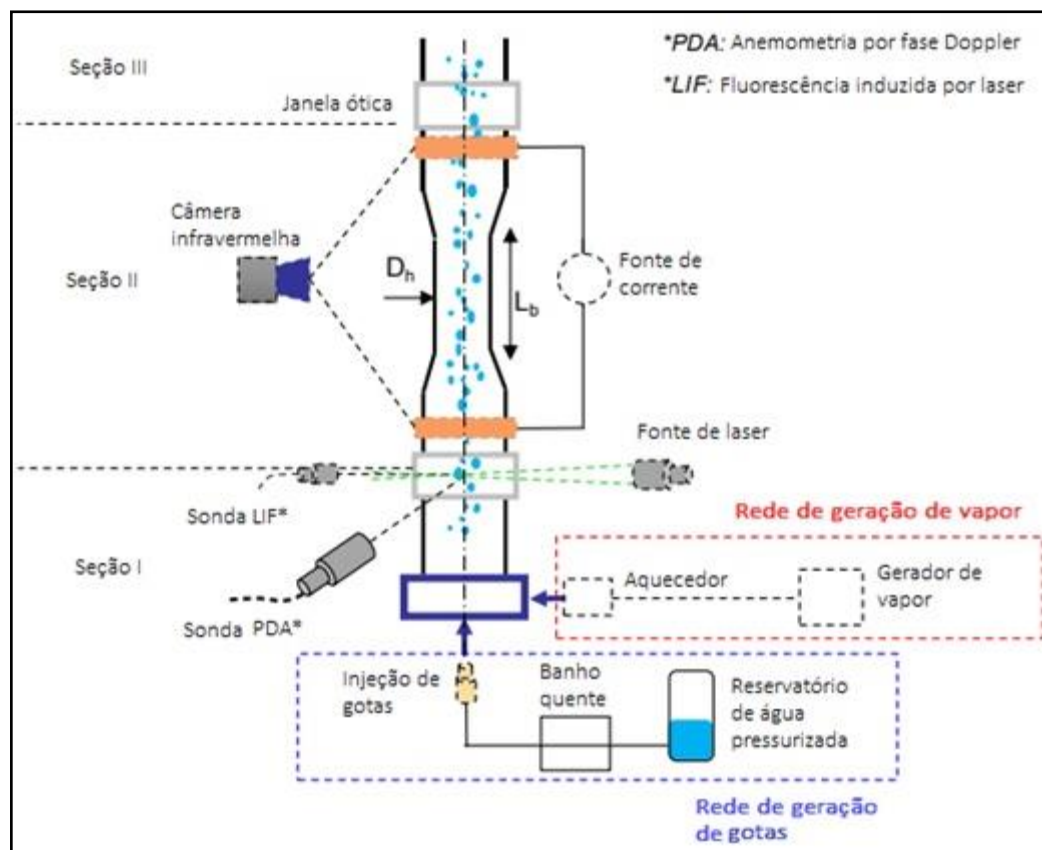
No trabalho de Peña Carrillo et al. (2019) foram fornecidos dados experimentais que contribuem para o estudo dos efeitos termohidráulicos na situação de reinundação em APR. Os efeitos de bloqueio na geometria das varetas combustíveis são estudados experimentalmente através da bancada COLIBRI (mencionada na introdução deste trabalho). É avaliada a temperatura, dissipação de calor, remolhagem das paredes dos tubos e características das gotas para 3 configurações de bloqueio – 0%, 61% e 90% de obstrução da seção. Os métodos de medição utilizados são os mesmos de Labergue (2017) e os resultados apontam um comportamento generalizado da remolhagem dos tubos de baixo para cima, com exceção ao bloqueio de 90%, onde houve descontinuidade. As gotas de água tendem a diminuir de tamanho a jusante da zona de teste por causa da evaporação. Foi constatada também uma temperatura praticamente uniforme entre a montante e a jusante da zona de teste, indicando que há quase um equilíbrio térmico e, portanto, representativo da situação de APR.

Em Jin et al. (2018), testes de reinundação foram realizados em um arranjo 7x7 de varetas representativas, gerando dados úteis para desenvolver modelos teóricos e aprimorar códigos já existentes que descrevem fenômenos termohidráulicos. É feita a análise de escoamentos bifásicos em regime transiente da reinundação. Os resultados sugerem uma baixa capacidade de troca térmica do fluxo misto em regiões afastadas da frente de resfriamento. Por outro lado, na região logo a jusante à frente do resfriamento, o escoamento bifásico se encontra próximo ao equilíbrio térmico, indicando que as trocas térmicas neste local são muito eficientes. Além disto, foi descoberto que a relação de velocidades entre as duas fases (*slip ratio*⁵) é em função do tamanho da gota e tempo de reinundação. Quanto maior a gota e menor a distância da frente de resfriamento, maior é o *slip ratio*.

Na tese de doutorado de Peña Carrillo (2018), o objetivo foi caracterizar o escoamento disperso vapor/gotas representativo da fase de reinundação de um PWR. Para isto foi elaborada a bancada experimental COLIBRI, cujo esquema está representado na Figura 8. Esta bancada permitiu extrair informações como: diâmetro, fração volumétrica, velocidade, temperatura e distribuição do escoamento de gotas. Além disto, foi estimado o fluxo térmico extraído pelo escoamento de vapor e gotas. Os resultados experimentais serviram como dados para obter um modelo numérico mais detalhado, complementando o código desenvolvido com o intuito de descrever o regime de vapor/gotas.

⁵ $S_{slip\ ratio} = \frac{vel_{gas}}{vel_{liquido}}$

Figura 8 - Esquema de montagem da bancada COLIBRI.



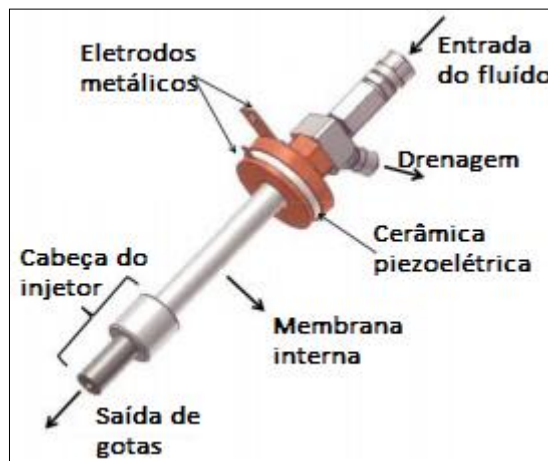
Fonte: Adaptado de Peña Carillo (2018)

3 MÉTODOS E MATERIAIS

3.1 PROPOSTA DE EXECUÇÃO

O objeto de estudo do presente trabalho é focado no elemento que realiza a injeção de gotas, tal elemento que faz parte da rede de geração de gotas apresentada na Figura 8. O objetivo é avaliar um injetor automotivo eletromagnético comercial na capacidade de produzir gotas com características que representam a situação física em questão. A necessidade deve-se à ideia de substituir o gerador de gotas piezoelétrico utilizado atualmente - FMP TECHNOLOGY™: ref: MTG-01-G, mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Injetor de gotas piezoelétrico a ser substituído.



Fonte: Adaptado de Peña Carillo (2018)

Neste injetor atualmente em uso, o que define o diâmetro das gotas geradas é uma membrana interna, excitada por um movimento linear causado pela excitação elétrica do material piezoelétrico, dispendo de uma faixa entre 50 e 200 μm e não há controle da vazão além da própria alteração na pressão do sistema. Portanto, é justificável a busca por um dispositivo que reproduza gotas mais condizentes com a realidade de um reator PWR em APR – gotas com até 1000 μm . Desta forma, surgiu a ideia de trocar por um injetor eletromagnético automotivo, variando outros parâmetros que possam servir para controlar as características do escoamento.

Para tal, deve-se caracterizar o equipamento de maneira a obter resultados de mesma ordem de grandeza dos valores das unidades termohidráulicas encontradas na literatura e descritas na seção 2.3 deste trabalho. Além disso, o interesse nesta avaliação também se dá no

âmbito da escolha de modo de operação do injetor, sendo possível, ao final, saber qual o ciclo de trabalho (%) e pressão (bar) que corresponde à vazão e ao diâmetro e velocidade de gota adequado para a finalidade.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a execução dos ensaios experimentais, adotou-se o ciclo de trabalho, ou *duty cycle*, do injetor eletromagnético e a pressão na qual trabalha como parâmetros variáveis. O ciclo de trabalho é definido pela fração do período em que o sinal está ativo, neste caso, a porcentagem do tempo de cada pulso em que o bico do injetor está efetivamente aberto. Com as medidas de um experimento cujo as ferramentas foram apenas uma balança e um cronômetro foram obtidas a vazão enquanto que em outra experiência obteve-se diâmetro e velocidade de gotas através da técnica de anemometria a raio laser (PDA).

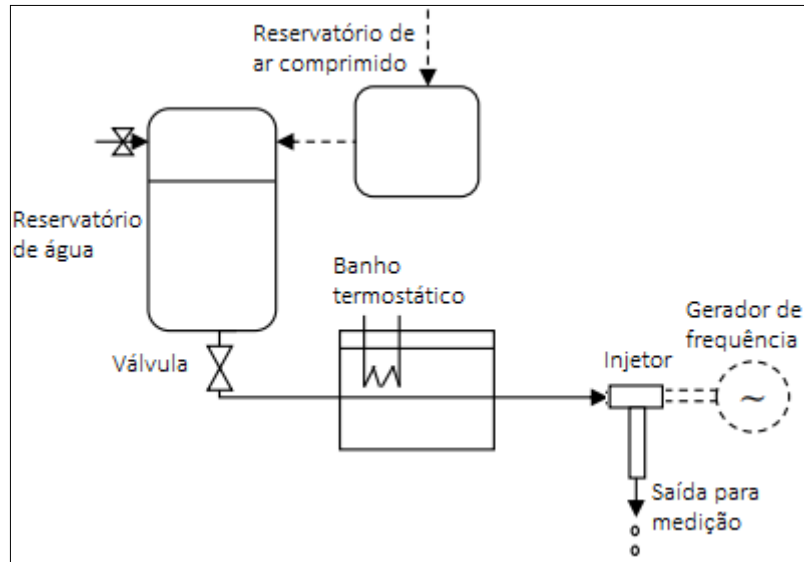
O injetor foi alimentado por uma fonte de 12 V e conectado à um gerador de sinal. Em tal equipamento foi determinada uma frequência fixa de sinal de 45 Hz para a geração de uma onda quadrada, sendo ajustável o ciclo de trabalho de 0 à 100% (porcentagem de tempo de abertura do bico injetor para cada pulsação). A alimentação de fluido foi feita com água desmineralizada através de uma mangueira vinda de um reservatório à alta pressão (6 bar), cuja regulagem foi feita na saída do mesmo.

Na medição da vazão, utilizou-se um recipiente para fazer a coleta da massa de água em determinado tempo, pesando-a posteriormente e obtendo-se assim a vazão. A balança de medição possui uma precisão de 0,01 gramas e a incerteza de medida de tempo é estimada pelo erro humano em 0,5 segundos. Evidenciou-se 3 níveis de pressão diferentes – 1, 2 e 3 bar – e em cada nível o teste repetiu-se 9 vezes, variando o ciclo de trabalho de 10 à 90 % com um passo de 10. Constituiu-se uma abordagem similar para o experimento que verifica a influência da temperatura na operação do injetor. Para tanto, foi adicionado um banho termostático entre o reservatório de água e o injetor, variando a temperatura em 3 níveis diferentes – 25, 50 e 75 °C. Nesta etapa, fixou-se a pressão em 1,5 bar e variou-se o ciclo de trabalho entre 20, 50 e 80%.

Tanto na medição da vazão quanto na realização da técnica PDA, o procedimento foi arranjado conforme a Figura 10. No injetor controla-se a pressão através da válvula no reservatório e o ciclo de trabalho pelo aparelho gerador de frequências. O bico do injetor foi fixado à 3 centímetros acima do volume iluminado pelos dois feixes de laser sob temperatura e pressão ambiente e as sondas receptoras fixadas em posições distintas. Adotou-se os

mesmos níveis de pressão que na medição da vazão – 1, 2 e 3 bar, porém, para cada valor de pressão, fez-se o experimento variando o ciclo de trabalho entre 20, 50 e 80%.

Figura 10 - Esquema simplificado do procedimento experimental.



Fonte: Adaptado de Peña Carillo (2018).

3.3 INJETOR ELETROMAGNÉTICO

O gerador de gotas avaliado é um injetor automotivo eletromagnético IWP220 da marca Magneti Marelli™. O injetor possui uma pressão nominal de trabalho de 2,5 bar (pressão relativa), porém, sua faixa de utilização vai de 1 a 3 bar. A vazão pode chegar até 11 cm³/s em um único *spray*.

3.4 DISPOSITIVO PDA UTILIZADO

O sistema PDA utilizado nos experimentos é comercializado pela empresa DANTEC-DYNAMICS™. A fonte emite um raio laser de argônio de comprimento de onda de 514,5 nm e com uma potência máxima de 4 W. O feixe incidente, com um diâmetro de 1,35 mm, é em seguida dividido em dois por um divisor de fibra óptica. O transmissor de laser também é equipado com uma célula de Bragg capaz de regular o índice de refração e a frequência do laser através de um efeito acústico-óptico. Além disso, é possível controlar o tamanho do volume iluminado trocando a lente convergente.

Dos valores dos parâmetros geométricos apresentados na Figura 6, adotou-se neste trabalho a configuração seguinte: espaçamento entre feixes (e) de 60 mm, distância focal da sonda de emissão (f_e) de 1200 mm, formando um semi-ângulo de emissão (β) de $1,5^\circ$. Além disso, a potência luminosa no volume iluminado é da ordem de 400 mW. A sonda receptora utilizada foi o modelo *Dantec 57X10*, equipada com uma lente à uma distância focal de 310 mm e ângulo de 60° com relação ao plano dos feixes incidentes. O receptor é equipado também com uma fenda de abertura mínima, o que possibilita a medição de gotas com diâmetro superior à 2000 μm .

O sinal coletado é tratado por um processador BSA-P80 e os dados são salvos em um computador no qual se utiliza um *software* desenvolvido pela própria *DANTEC Dynamics (BSA Flow Software)*. Tanto a sonda de emissão quanto a sonda receptora são integradas em um sistema de movimentação tridimensional, permitindo controlar o posicionamento dos feixes na bancada de experimentos com precisão.

Quanto às incertezas do equipamento, são dependentes da configuração de medição utilizada assim como os valores de tensão associados ao sinal coletado pela sonda receptora. É possível estimar um erro relativo se as condições do experimento são constantes durante todo o procedimento. Sendo no pior dos casos de aproximadamente 10% para o diâmetro médio de gotas e 5% para a velocidade média de gotas.

3.5 TRATAMENTO DOS DADOS

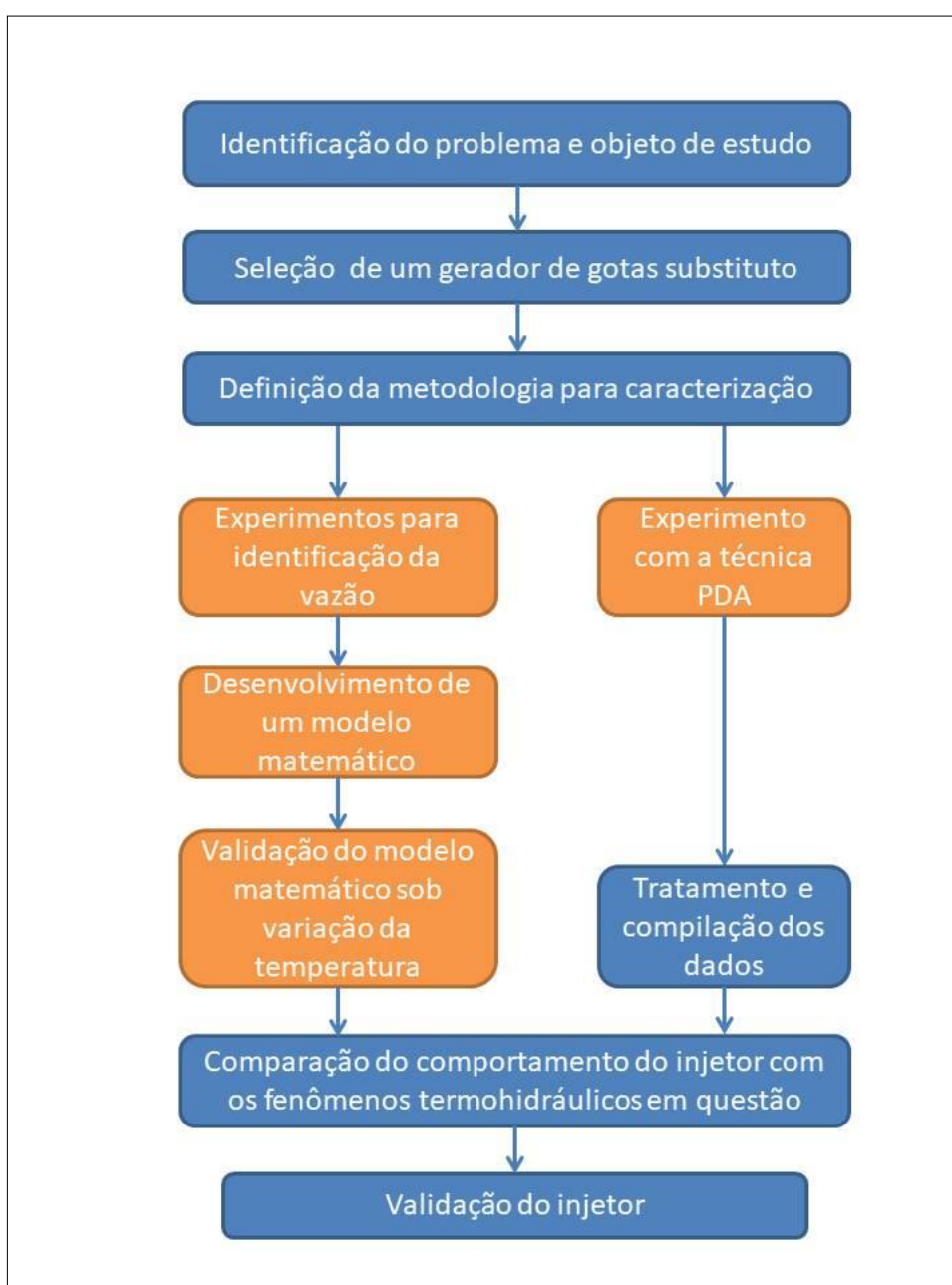
Após a aquisição dos dados da técnica PDA, adotou-se a utilização do programa MATLAB para a implementação de um código que traduz os resultados obtidos em gráficos que possibilitam a análise das características do escoamento produzido pelo injetor. O arranjo dos dados é feito com gráficos de correlação de velocidade de gota com diâmetro de gota, nas diferentes condições de operação, assim como as curvas de distribuição dos valores de velocidade e diâmetro, comparadas entre si.

Na avaliação da vazão do equipamento, adotou-se o programa Excel para a compilação dos dados. Aqui buscou-se um modelo matemático que exprima o valor da vazão em função do ciclo de trabalho escolhido e a pressão, contando com os respectivos erros associados. Além disto, fez-se uma análise dos dados obtidos quando se utiliza o banho termostático no experimento, avaliando a influência da temperatura na vazão e realizando um confronto com o modelo teórico.

3.6 FLUXOGRAMA

A Figura 11 apresenta o fluxograma do presente trabalho desde a identificação do problema até a validação da solução proposta. As etapas em laranja foram executadas em na Universidade de Nancy/França, enquanto as etapas restantes fazem parte do trabalho no âmbito da realização do trabalho de conclusão de curso.

Figura 11 - Fluxograma do trabalho.

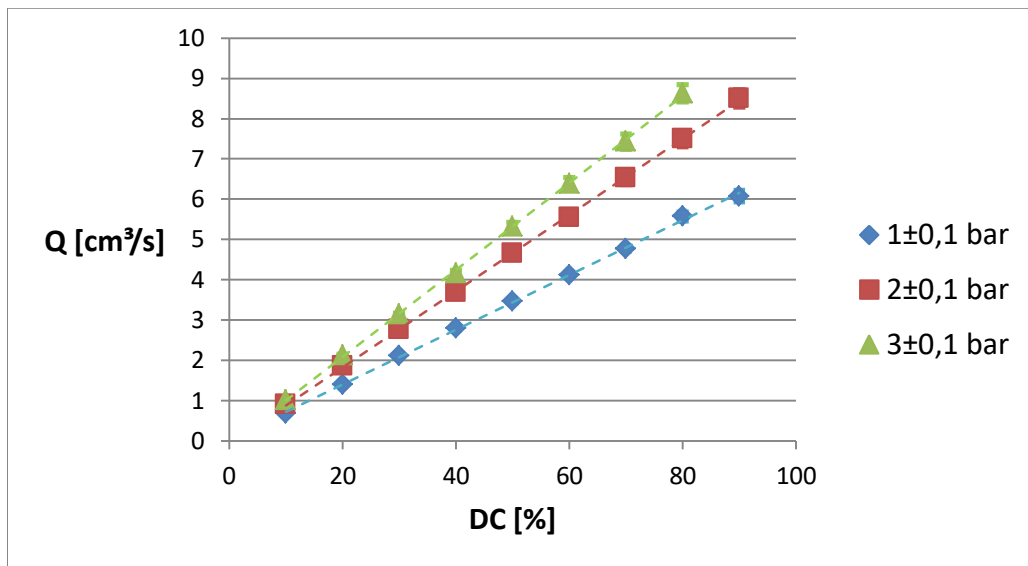


Fonte: Autor (2019)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, três relações lineares da vazão volumétrica foram encontradas e são mostradas na Figura 12. Cada curva corresponde a um nível de pressão em função do ciclo de trabalho. Utilizando o recurso matemático de regressão linear cujos gráficos encontram-se no APÊNDICE A, encontrou-se na Equação 15 o modelo que descreve o comportamento da vazão (Q) do injetor de acordo com a pressão (P) e o ciclo de trabalho (DC). Conforme o gráfico do APÊNDICE D, foi verificado que o erro deste modelo matemático é inferior à 4%.

Figura 12 - Curvas características da vazão do injetor para diferentes condições.



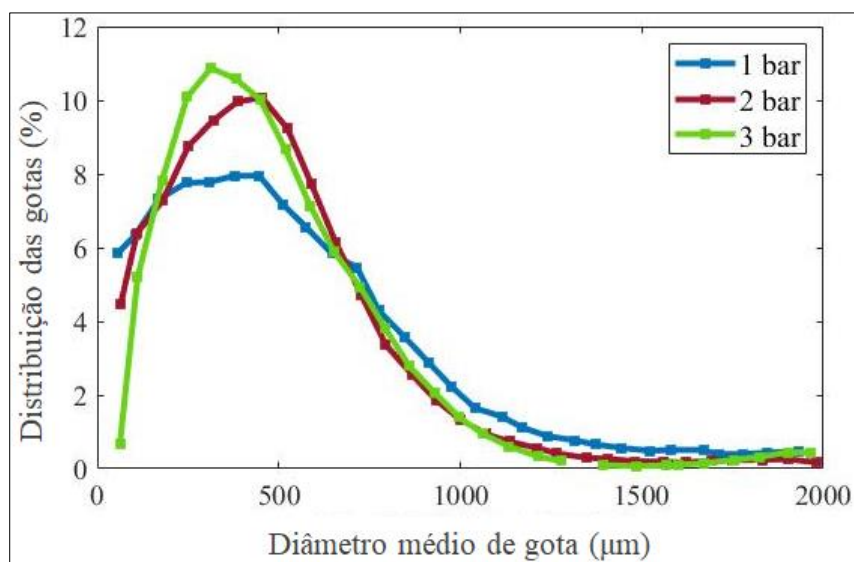
Fonte: Autor (2020)

$$Q = (3,545 \cdot \ln P + 6,865) \cdot (0,01 \cdot DC - 0,0031) \quad (15)$$

Os dados de saída do experimento da técnica PDA são mostrados nos gráficos de distribuição das Figuras 13 e 14. A Figura 13 mostra o comportamento da distribuição de diâmetro de gota, enquanto que na Figura 14 é mostrada a velocidade de gota - ambos para uma condição de ciclo de trabalho de 50%. É possível verificar uma baixa sensibilidade do diâmetro das gotas quando a pressão varia, sendo os valores médios de 529,54 μm , 465,65 e 477,36 para 1, 2 e 3 bar respectivamente. Um rápido crescimento até atingir o diâmetro mais frequente e em seguida um decréscimo constante é um exemplo típico de curva de distribuição log-normal e é similar à observação durante experimentos da bancada COLIBRI verificada por Peña Carrillo et al. (2019). Nota-se neste gráfico e também no apêndice G e H

uma pequena diferença nas curvas de 20, 50 e 80% de ciclo de trabalho e imagina-se que é devido ao efeito transiente presente nesta variação do tempo em que o bico injetor permanece efetivamente aberto.

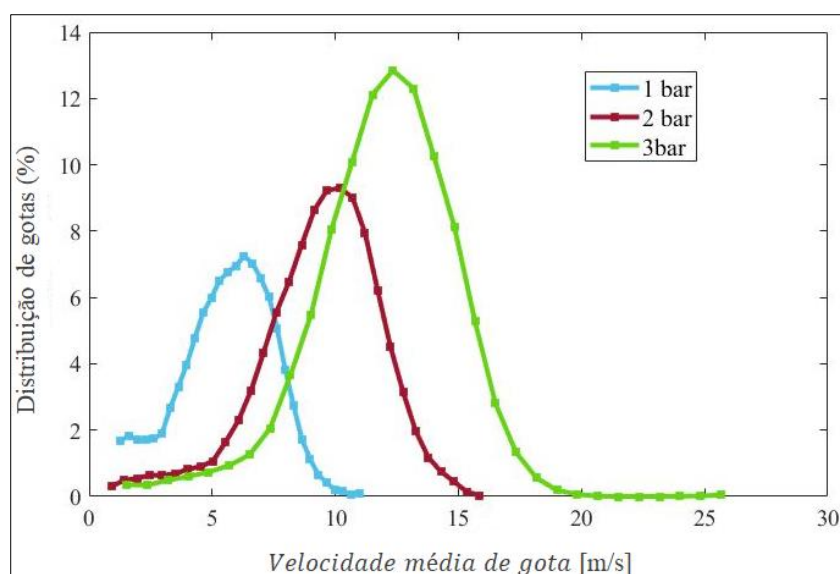
Figura 13 - Distribuição do diâmetro médio das gotas com ciclo de trabalho de 50%.



Fonte: Autor (2020)

Na Figura 14 verifica-se que a velocidade é diretamente proporcional à pressão, ocorrendo picos de velocidade com uma gama estreita de valores, para os quais suas médias para 1, 2 e 3 bar são, respectivamente 5,67, 9,37 e 12,01 m/s.

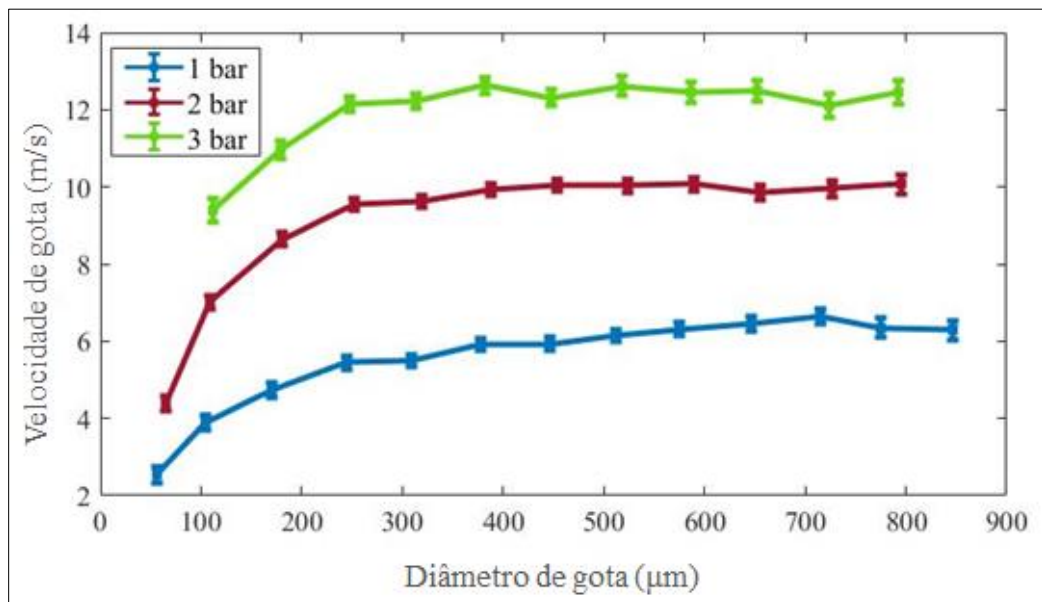
Figura 14 – Distribuição da velocidade média com ciclo de trabalho de 50%.



Fonte: Autor (2020)

Na figura 15 visualiza-se a correlação entre os dois parâmetros mensurados: diâmetro e velocidade de gota. É clara a forte influência da pressão na velocidade das gotas, porém, para gotas pequenas este efeito não se aplica. Isto se dá pela baixa força inercial das gotas menores que tendem a seguir na direção do escoamento em torno delas – neste caso o escoamento em repouso do ambiente – o qual impõe resistência significativa ao movimento das partículas menores. Gotas com diâmetro acima de 250 μm têm inércia suficiente para a velocidade ser praticamente independente do diâmetro.

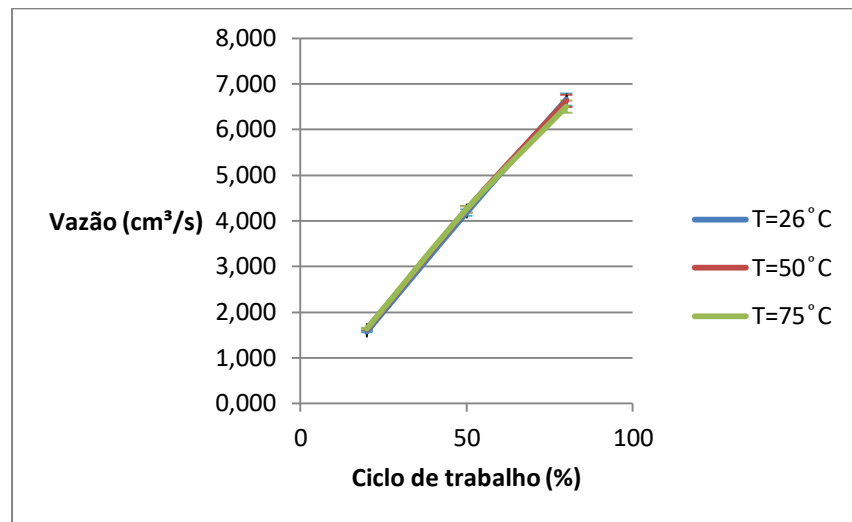
Figura 15 – Correlação diâmetro e velocidade de gota para ciclo de trabalho de 50%.



Fonte: Autor (2020)

Também foi verificado que não há influência significativa da temperatura de injeção na vazão do injetor. A Figura 16 ilustra os pontos dos experimentos realizados para diferentes valores de ciclo de trabalho. Além destes gráficos apresentados, encontram-se nos Apêndice E até o Apêndice J os resultados para o restante das condições experimentais. O ciclo de trabalho apresentou em diferentes gráficos uma influência significativamente menor que a pressão na alteração dos parâmetros mensurados. Por final, a Tabela 2 fornece uma comparação entre os dois métodos de injeção e os valores encontrados na literatura que correspondem àqueles das condições de LOCA.

Figura 16– Influência da temperatura de injeção na vazão.



Fonte: Autor (2020)

Tabela 2 - Comparação de resultados entre diferentes métodos de injeção e condições de LOCA.

Parâmetro	Condições de LOCA	Injetor piezoelétrico	Injetor automotivo
Diâmetro de gota (µm)	50 - 1200	5 - 300	0 - 1300
Velocidade de gota (m/s)	5 - 14	15 - 20	3 - 18
Fração volumétrica de líquido (m³/m³) ⁶	10 ⁻⁴ - 10 ⁻²	10 ⁻⁴ - 2×10 ⁻⁴	1,5×10 ⁻⁴ - 8×10 ⁻³

Fonte: Autor (2020)

Apesar da velocidade de gota não ser tão comparável como os outros parâmetros por conta da forte correlação com a velocidade do escoamento em torno da gota, o injetor automotivo apresentou maior similaridade de valores que o injetor a ser substituído, portanto, foi válido realizar a troca do método de injeção para atingir maior representatividade nos testes experimentais da bancada COLIBRI.

⁶Cálculo para a fração volumétrica sendo $\alpha_{min} = \frac{\frac{m_{gmin}}{\rho_g}}{\frac{m_{vmax}}{\rho_v} + \frac{m_{gmin}}{\rho_g}}$ e $\alpha_{max} = \frac{\frac{m_{gmax}}{\rho_g}}{\frac{m_{vmin}}{\rho_v} + \frac{m_{gmax}}{\rho_g}}$

5 CONCLUSÃO

O foco deste trabalho foi o aperfeiçoamento da bancada COLIBRI pela proposta de alteração do método de injeção de gotas através de um estudo experimental sobre o comportamento de um novo injetor na sua capacidade de reproduzir gotas com maior semelhança aos valores encontrados na literatura.

A realização deste trabalho permitiu igualmente a construção de uma metodologia para a caracterização deste injetor tomado como objeto de estudo, tal metodologia que poderá ser replicada e/ou refinada para novos estudos do tipo. Concluiu-se pelos resultados de diâmetro de gota e fração volumétrica que substituindo o antigo injetor da bancada experimental pelo injetor automotivo pode-se obter maior representatividade em relação ao escoamento disperso vapor com gotas que ocorre no núcleo dos reatores PWR em situação de APR.

Obteve-se também conhecimento sobre o comportamento do injetor para diferentes condições, tal saber é importante para realizar decisões de condições de operação da bancada COLIBRI. Para estudos futuros é interessante reproduzir os experimentos com a presença do vapor de água no escoamento, verificando se as características dimensionais das gotas do injetor permanecem com boa representatividade. Levar em conta outros parâmetros que têm influência sob o escoamento termohidráulico em questão como vazão, temperatura e meio de inserção de vapor nos experimentos também serve como sugestão para estudos futuros na área, assim como a caracterização de outros parâmetros da injeção como a angulação e formato do *spray*.

REFERÊNCIAS

- BODANSKY, D. **Nuclear Energy: Principles, Practices and Prospects**. 2004.
- BREEZE, P. Nuclear Power. **Power Generation Technologies**. 2^o ed., Elsevier, 2014.
- CASTANET, G.; LIÉNART, T.; LEMOINE, F. Dynamics and temperature of droplets impacting onto a heated wall. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, n. 3-4, p. 670–679, 2009.
- GLANTZ, T.; TAURINES, T.; BELON, S.; et al. DRACCAR: A multi-physics code for computational analysis of multi-rod ballooning, coolability and fuel relocation during LOCA transients. Part Two: Overview of modeling capabilities for LOCA. **Nuclear Engineering and Design**, v. 339, p. 202–214, 2018.
- GRADECK, M.; SEILER, N.; RUYER, P.; MAILLET, D. Heat transfer for Leidenfrost drops bouncing onto a hot surface. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 47, p. 14-25, 2013.
- IAEA. **Nuclear power reactors in the world**, Reference Data Series No. 2, International Atomic Energy Commission, IAEA-RDS-2/230, 2015.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 2011.
- JIN, Y.; CHEUNG, F.-B.; BAJOREK, S. M.; TIEN, K.; HOXIE, C. L. Investigation of the thermal-hydraulic non-equilibrium in a 7×7 rod bundle during reflood. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 127, p. 266-279, 2018.
- KIM, K.; KIM, B.-J.; CHOI, H.-S.; MOON, S.-K.; SONG, C.-H. Effect of a blockage length on the coolability during reflood in a 2×2 rod bundle with a 90% partially blocked region. **Nuclear Engineering and Design**, v. 312, p. 248-255, 2017.
- LABERGUE, A.; PENA-CARILLO, J.-D.; GRADECK, M.; LEMOINE, F. Combined three-color LIF-PDA measurements and infrared thermography applied to the study of the spray impingement on a heated surface above the Leidenfrost regime. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 104, p. 1008-1021, 2017.
- LEE, R.; REYES, J. N.; ALMENAS, K. Size and number density change of droplet

populations above a quench front during reflood. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 27, n. 4, p. 573-585, 1984.

LELONG, F. Expérimentation, modélisation et simulation de l'impact de gouttes d'eau sur le gainage gonflé des assemblages d'un cœur de REP en situation d'APRP. **Tese de doutorado** - Universidade Henri Poincaré, Nancy, 2010.

LELONG, F.; GRADECK, M.; SEILER, N.; et al. Behaviour of liquid droplets bouncing onto a hot slab. ILASS - Europe 2010, 23rd **Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems**, 2010.

MUNDO, C.; SOMMERFELD, M.; TROPEA, C. Droplet-wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 21, n. 2, p. 151-173, 1995.

OLIVEIRA, A. V. S.; PEÑA CARRILLO, J. D.; LABERGUE, A.; GLANTZ, T.; GRADECK, M. Mechanistic modeling of the thermal-hydraulics in polydispersed flow film boiling in LOCA conditions. **Nuclear Engineering and Design**, v. 357, p.110388, 2020.

PEÑA CARILLO, J. DAVID. Etude expérimentale du transfert paroi/fluide dans le cas d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire. **Tese de doutorado** - Universidade de Lorraine, 2018.

PEÑA CARRILLO, J. D.; OLIVEIRA, A. V. S.; LABERGUE, A.; GLANTZ, T.; GRADECK, M. Experimental thermal hydraulics study of the blockage ratio effect during the cooling of a vertical tube with an internal steam-droplets flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 140, p.648-659, 2019.

PILCH, M.; ERDMAN, C. A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 13, n. 6, p. 741-757, 1987.

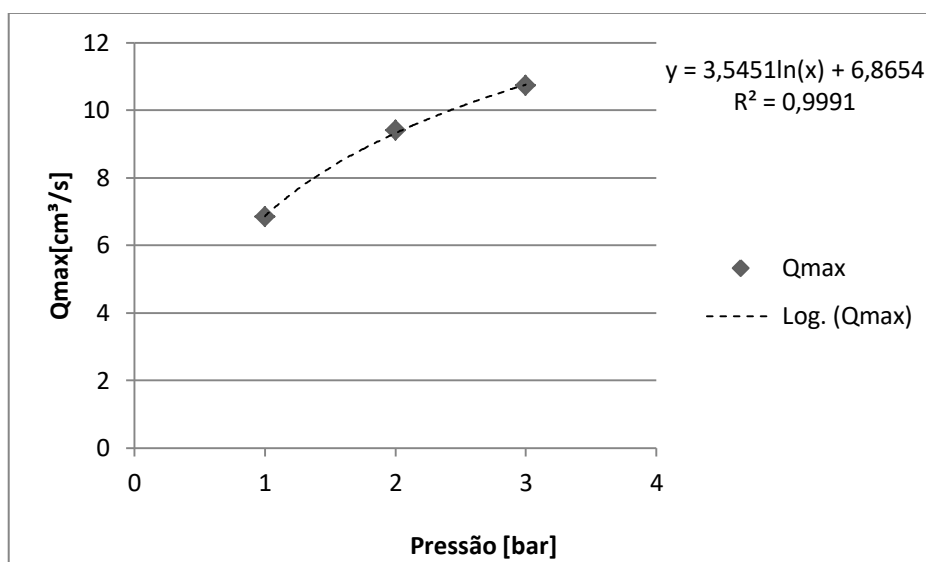
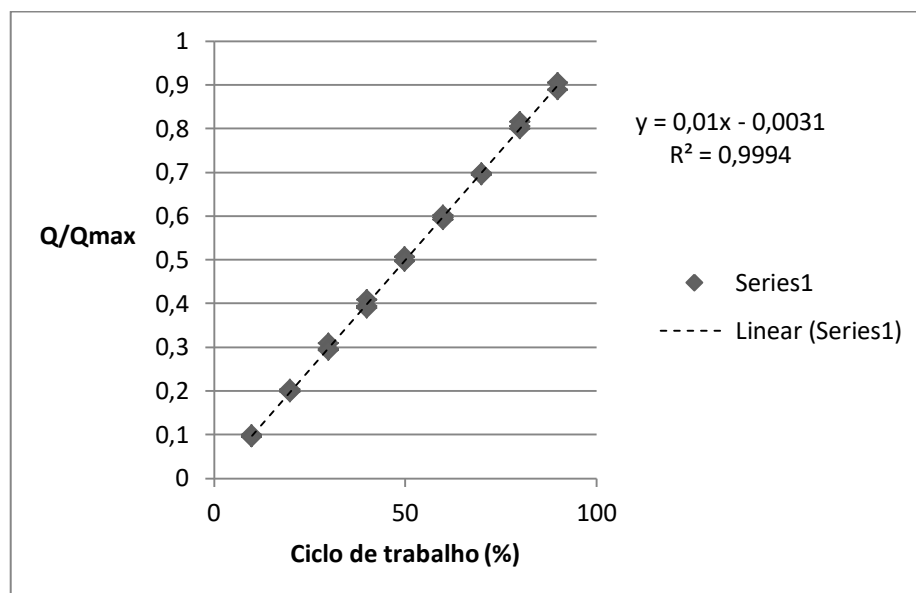
U.S DEPARTEMENT OF ENERGY (DOE/NE-0088). "**The History of Nuclear Energy**". Office of Nuclear Energy, Science and Technology, Washington DC. Acessado em: outubro de 2019.

WACHERS, L. H. J.; SMULDERS, L.; VERMEULEN, J. R.; KLEIWEG, H. C. The heat transfer from a hot wall to impinging mist droplets in the spheroidal state. **Chemical**

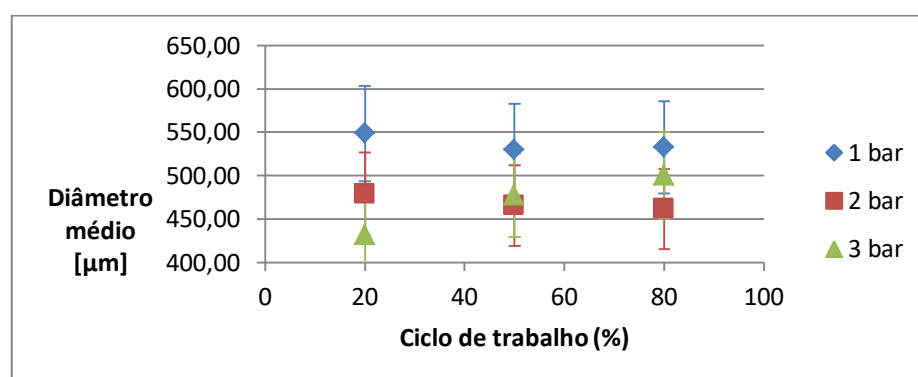
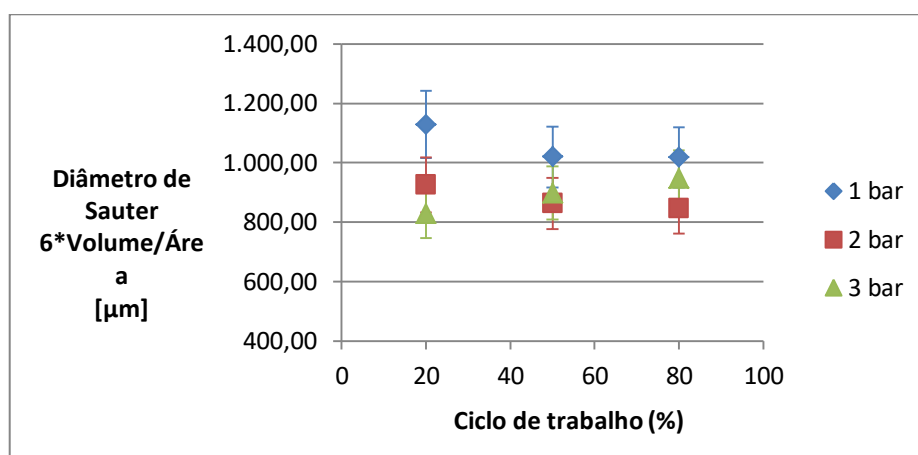
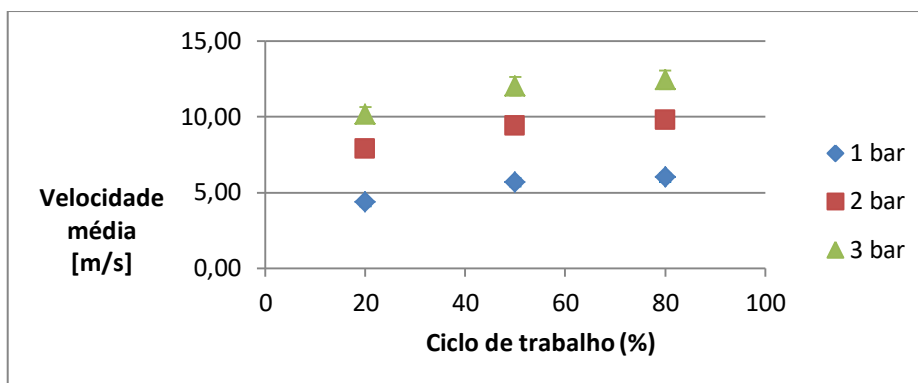
Engineering Science, v. 21, n.12, p. 1231-1238, 1966.

WEBB, B. W.; MA, C.-F. Single-Phase Liquid Jet Impingement Heat Transfer. **Advances in Heat Transfer**, v. 26, p. 105-217, 1995.

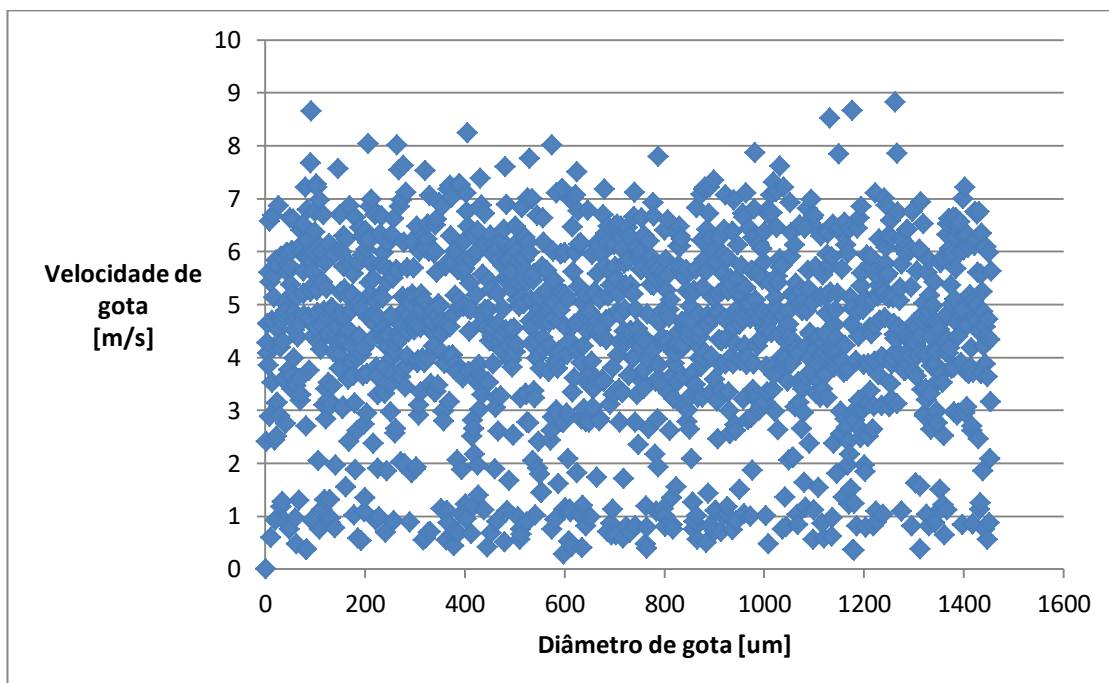
APÊNDICE A – GRÁFICOS UTILIZADOS PARA REGRESSÃO LINEAR PARA OBTER A EQUAÇÃO DA VAZÃO



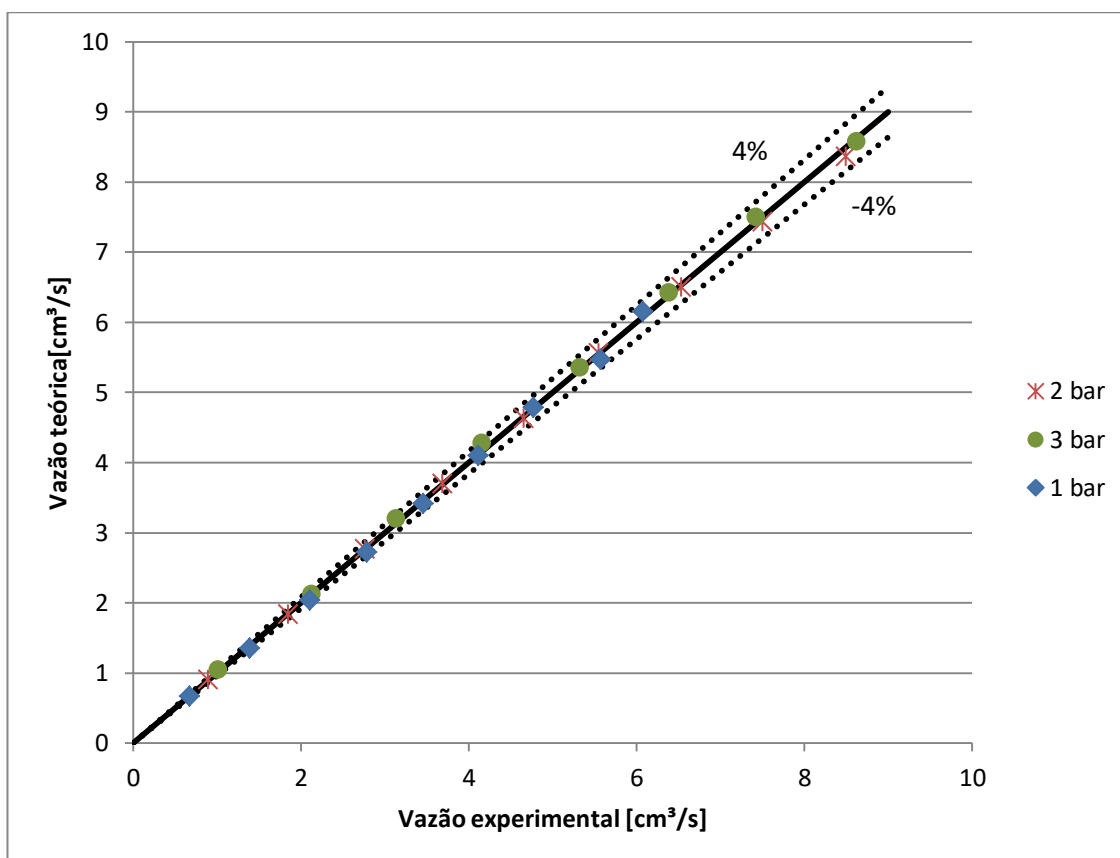
APÊNDICE B – VALORES MÉDIOS DE DIÂMETRO E VELOCIDADE DE GOTA PARA OS DIFERENTES PONTOS DE TRABALHO



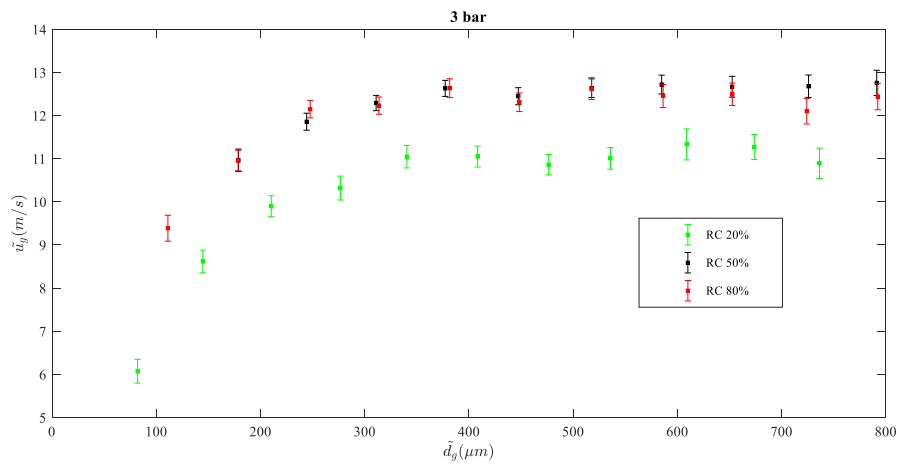
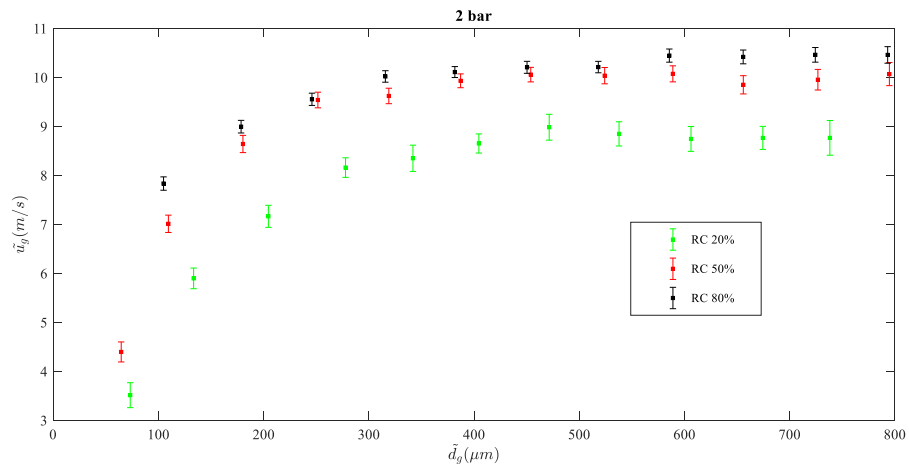
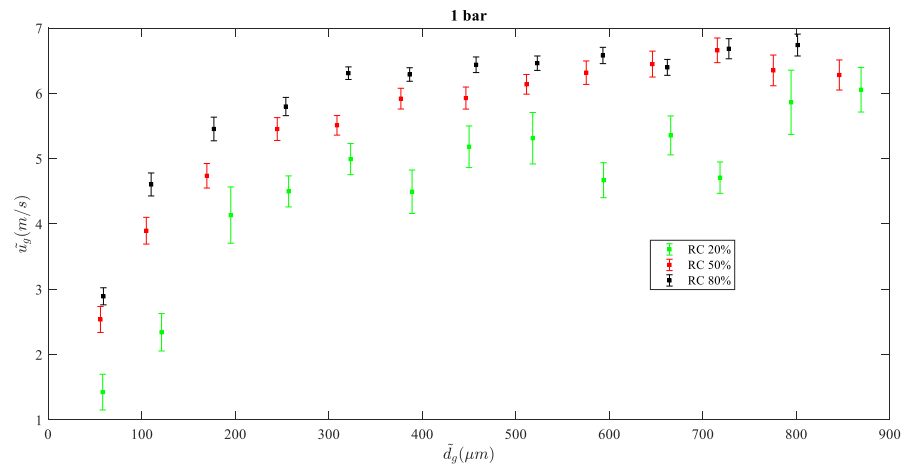
APÊNDICE C – NUVEM DE PONTOS: VELOCIDADE X DIÂMETRO DE GOTAS PARA CICLO DE TRABALHO DE 20% E PRESSÃO DE 1 BAR



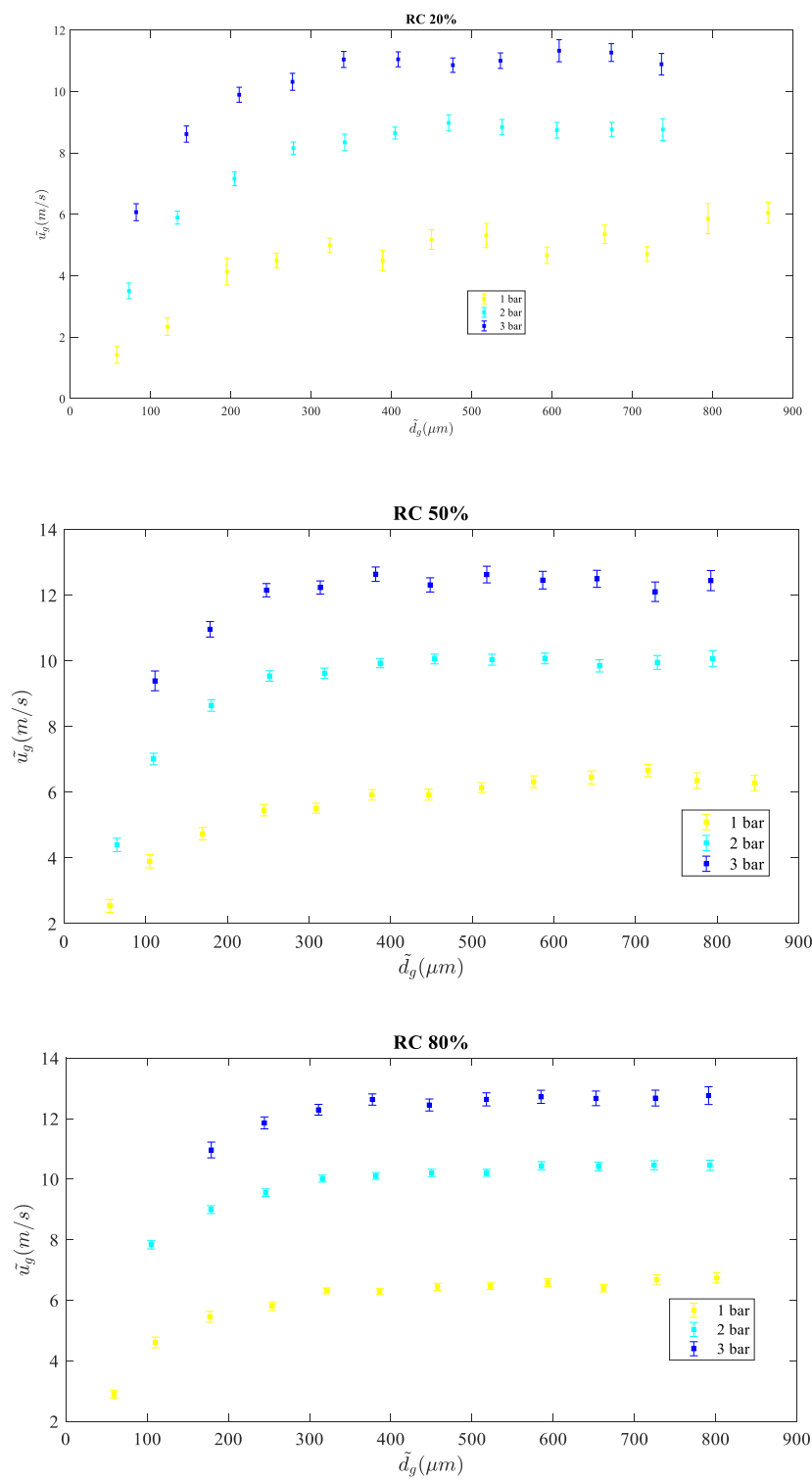
APÊNDICE D - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM A EQUAÇÃO DA VAZÃO



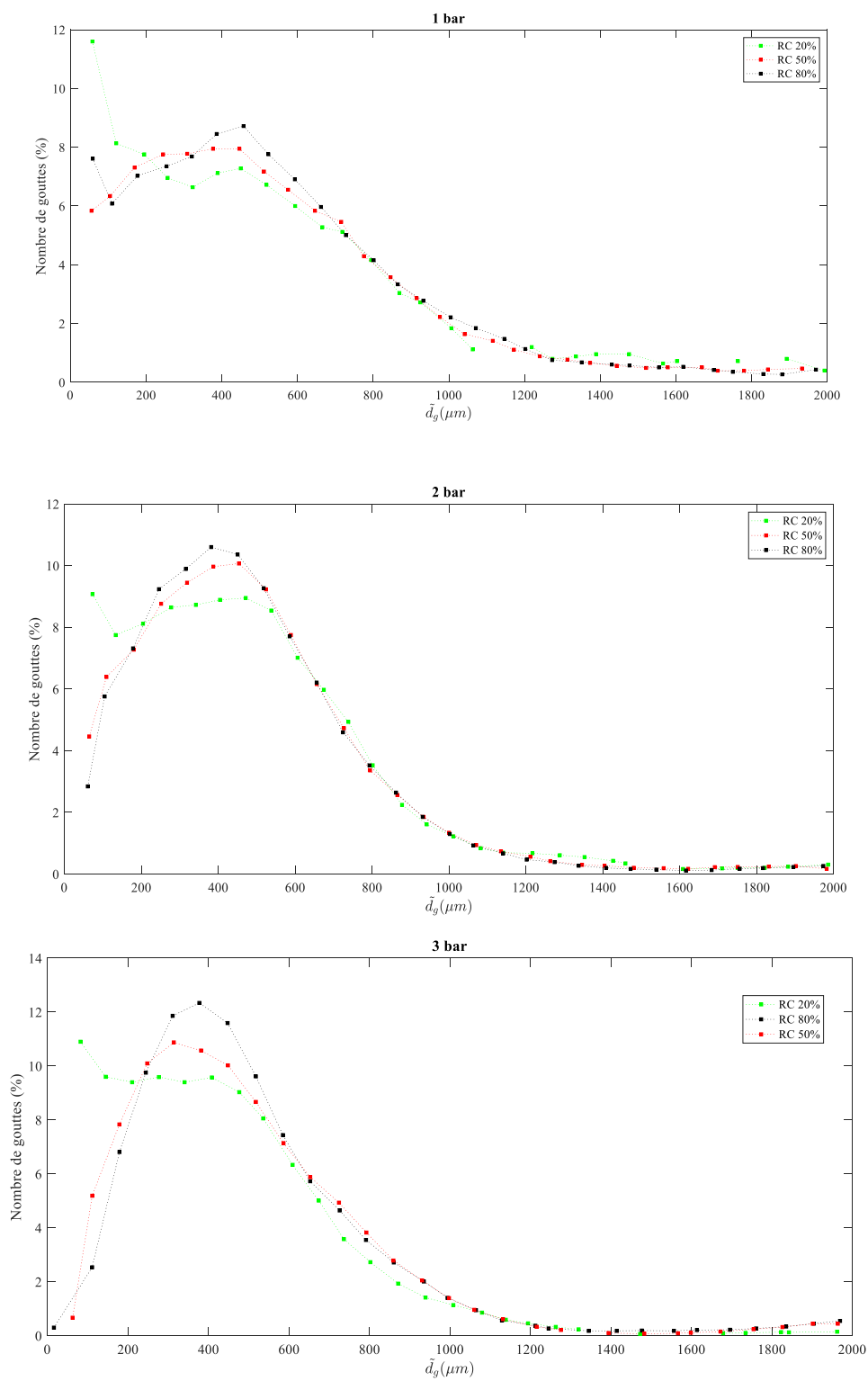
APÊNDICE E – CORRELAÇÕES VELOCIDADE X DIÂMETRO DE GOTA COM PRESSÃO FIXA



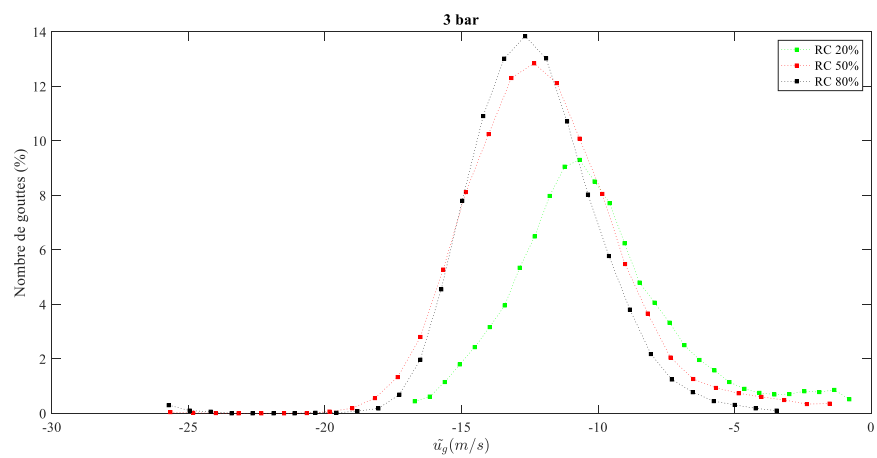
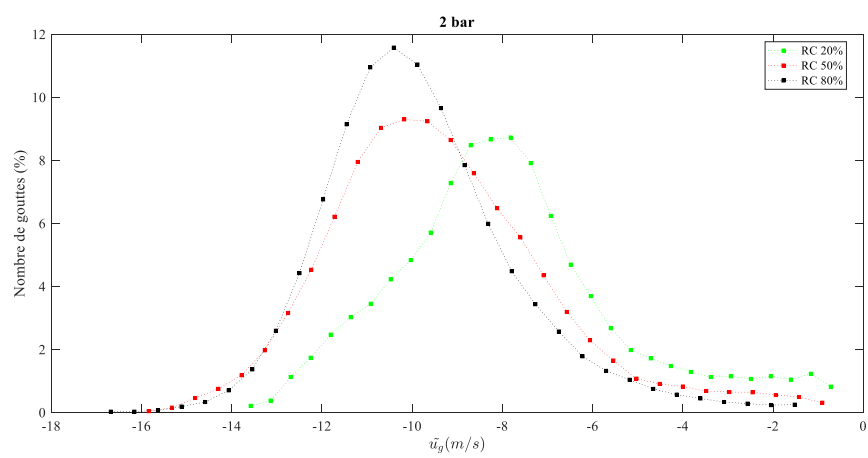
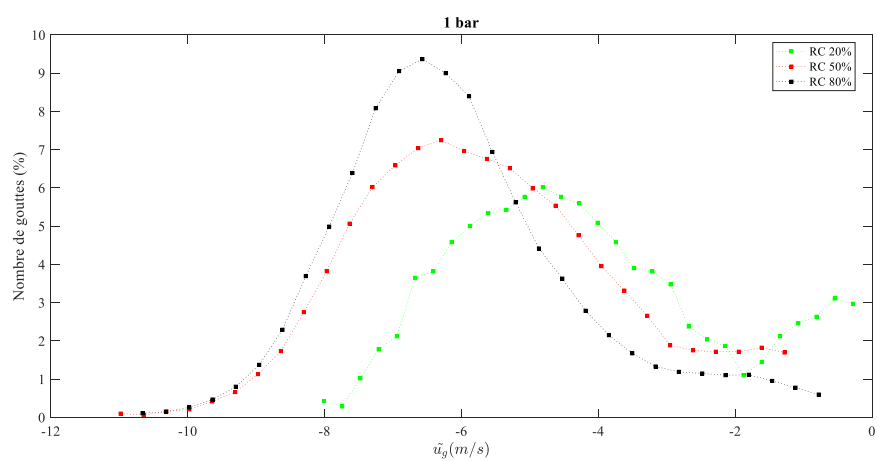
APÊNDICE F - CORRELAÇÕES VELOCIDADE X DIÂMETRO DE GOTA COM CICLO DE TRABALHO FIXO



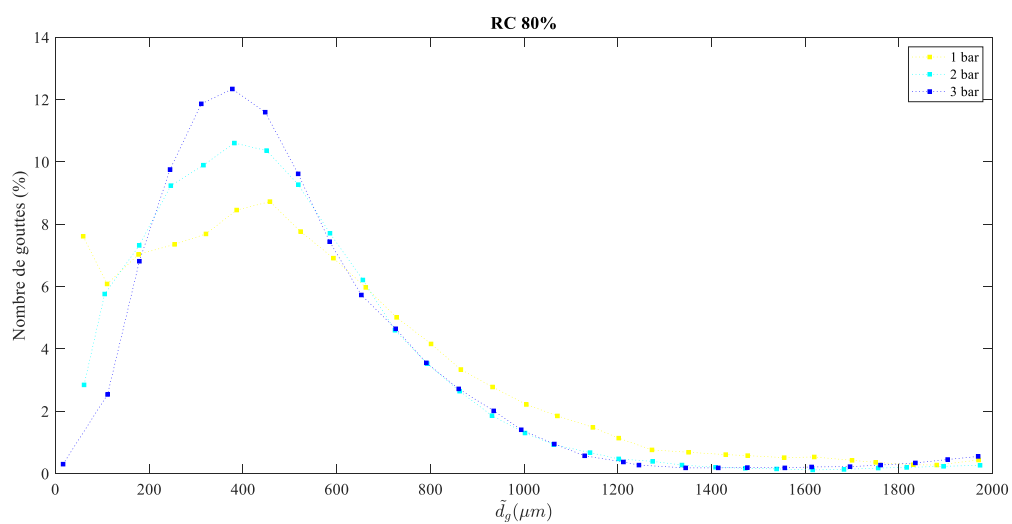
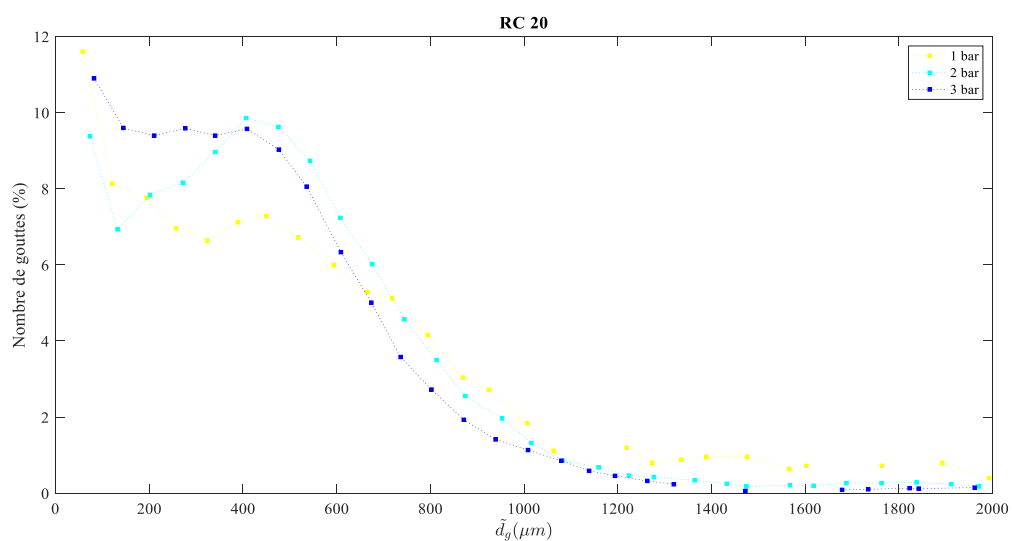
APÊNDICE G – DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETRO DE GOTA COM PRESSÃO FIXA



APÊNDICE H – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE DE GOTA COM PRESSÃO FIXA



APÊNDICE I – DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETRO DE GOTA COM CICLO DE TRABALHO FIXO



APÊNDICE J – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE DE GOTA COM CICLO DE TRABALHO FIXO

