Revisão: Jatos Sintéticos e sua Aplicação para Resfriamento

Review: Synthetic Jets and their Cooling Applications

Adriano Menezes da Silva^a, Conrad Yuan Yuen Lee^b

adrianosaoleo@gmail.com, conrady@unisinos.br

Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, Av. Unisinos 950, 93022-000 São Leopoldo RS, Brasil

Resumo

O objetivo deste artigo é apresentar uma revisão do estado da arte da aplicação de jatos sintéticos para resfriamento. A aplicação de jatos sintéticos representa uma técnica alternativa aos sistemas de resfriamento líquido, que busca aumentar a troca térmica mantendo-se o ar como fluido de trabalho. Para isso, é necessário primeiro discursar sobre as variações de dispositivos de geração, as principais fluidodinâmicas características dos iatos sintéticos e seus parâmetros adimensionais de avaliação de desempenho. Jatos sintéticos são formados em dispositivos geradores a partir de uma cavidade equipada com um pequeno orifício. A oscilação de uma membrana ou parede da cavidade induz uma movimentação periódica de fluido e produz um jato sintético na região externa ao orifício de saída. O jato sintético possui características de velocidade média semelhantes a um jato contínuo, mas com um nível de turbulência maior devido a sua natureza oscilatória. O resfriamento pode ser configurações realizado em de jato de impactação ou tangencial. Independente da configuração, a interação da turbulência do jato com uma superfície resulta em um aumento da troca térmica tanto em relação à convecção natural como convecção forçada de escoamentos de regime permanente.

Palavras-chave:jatosintético,resfriamento,Keywords:convecção forçadaconvection

Abstract

The objective of this paper is to present a review of the state of the art in cooling applications of synthetic jets. Cooling by means of synthetic jets represent an alternative technique to liquid cooling, in which air is still the working fluid. To this end, it is necessary first to present the varying types of the fluid dynamic synthetic jet generators, characteristics and the dimensionless performance parameters of the jets themselves. Synthetic jets are produced in generators that consist of a sealed cavity containing a small orifice. A boundary oscillation induces fluid movement in and out of the cavity through the orifice that, in the region external to the orifice, develops into a synthetic jet. The synthetic jet has average velocity properties similar to a steady jet albeit with a higher level of turbulence due to its oscillatory nature. Cooling applications of synthetic jets can occur in an impacting or tangential configuration. Regardless of the configuration used, several experimental and numerical studies have demonstrated that there is a significant increase in heat transfer compared to natural convection and forced convection with steady state turbulent flows.

Keywords: synthetic jets, cooling, forced convection

Introdução

O avanço no uso de novas tecnologias e da grande utilização de computadores e notebooks, tablets e smartphones, além dos altos recursos investidos em pesquisa fazem com que os processadores de componentes eletrônicos sejam os menores possíveis e com a taxa de processamento sempre em crescimento. Por exemplo, conforme Intel (2015), o processador I7-6700K tem uma Potência de Design Térmico (PDT) de 91 W. A PDT representa o consumo médio de energia, dissipada pelo processador quando o mesmo funciona em uma frequência de base com todos os núcleos ativos de acordo com uma carga de trabalho de alta complexidade definida pela Intel. Segundo Intel (2016), para garantir o desempenho do processador I7-6700K, é necessário controlar a temperatura máxima permitida no dispersor de calor integrado do processador, que é chamada de temperatura de gabinete e para este processador não deve ultrapassar 64 °C. Considerando que o processador tem um encapsulamento de 37,5 mm x 37,5 mm, pode-se estimar que o fluxo térmico de PDT que precisa ser removido é ao redor de 64.700 W/m2. Esta alta demanda de resfriamento é um exemplo típico da demanda de resfriamento e serve de justificativa para que estes sistemas sejam continuamente repensados e novos métodos sejam pesquisados.

Os sistemas de resfriamento de componentes eletrônicos mais simples utilizam o ar como fluido de trabalho e são compostos por um trocador de calor de aletas acoplado ao componente eletrônico e ventiladores axiais, conhecidos como coolers, que fornecem a vazão de ar necessária para a remoção de calor. Novas técnicas que aumentam o fluxo térmico removido do componente eletrônico já se encontram em uso, como tubos de calor, placas de microcanais de resfriamento líquido e fluidos especiais. (Etemoglu, 2007). Independente do desempenho destes sistemas novos, a quantidade de calor removida do componente eletrônico ainda precisa ser rejeitada ao ambiente externo, o que geralmente ainda é realizada através de trocadores de calor de aletas e coolers. A principal vantagem do uso de coolers são a simplicidade da utilização do ar como fluido de trabalho e o relativo baixo custo operacional e de produção dos dispositivos. Por outro lado, a utilização de ar é limitada pela baixa capacidade térmica do mesmo quando comparada a resfriamento líquido ou com processos de mudança de fase.

Jatos sintéticos produzidos pela oscilação de uma membrana em uma cavidade possuem um alto nível de turbulência inerente. Por este motivo, as aplicações de jatos sintéticos, especialmente em combinação com trocadores de calor, oferecem a possibilidade de um aumento na troca térmica capaz de compensar a baixa capacidade do ar como fluido trabalho. As características do jato sintético dependem de uma série de variáveis geométricas e fluidodinâmicas que também influenciam seu desempenho térmico dependendo da sua orientação em relação à superfície aquecida. Sendo assim, este trabalho propõe apresentar o estado da arte sobre as principais características conhecidas de jatos sintéticos e os principais resultados de sua aplicação como dispositivo de resfriamento. São apresentadas as influências dos métodos de oscilação do fluido na cavidade, fatores de geometria e fatores operacionais, assim como os parâmetros adimensionais de análise. A aplicação de jatos sintéticos para resfriamento é separada conforme as duas configurações básicas de orientação da pluma do jato e seus principais resultados experimentais e numéricos são apresentados.

Definição e características de jatos sintéticos

Diferente de um jato contínuo, o jato sintético é nomeado desta maneira por ser produzido sem nenhum tipo de fluido externo adicionado, utilizando apenas o ar do ambiente extero, que circula pelo elemento que proporcionará o deslocamento de ar. Zhang, Wang e Feng (2008) nomeiam como dispositivo ZNMF, que vem do termo inglês Zero-Net-Mass-Flux que traduzido para o português recebe o nome de "fluxo de massa líquido zero". Já Smith e Glezer (1998) nomeiam tanto o fluido ejetado como o dispositivo gerador como syntethic jets, que traduzido para o português é encontrado como "jatos sintéticos". A pesquisa por Mallinson, Kwok e Reizes (2003) utiliza o termo SJA que vem do termo em inglês Syntethic Jet Actuator, que traduzido para o português é chamado de "atuador de jato sintético".

Os jatos sintéticos são gerados através da vibração periódica, com uma determinada frequência, de uma membrana oscilatória cercada por paredes rígidas. A pluma do jato sintético se forma através do fluido sendo ejetado através de um orifício na parede da cavidade seguido pela sucção de fluido circundante ao orifício conforme mostra a Figura 1. Sendo assim, o fluido ejetado não é aspirado de volta à cavidade e o fluido que sai do jato é o mesmo que circula no ambiente de trabalho, ou seja, não é necessária a utilização de tubulações e/ou fluidos adicionados para circulação e refrigeração. A formação de vórtices do jato depende de variáveis que serão conhecidas ao longo deste trabalho, bem como do formato do orifício de passagem do jato. Na Figura 1 mostra-se um gerador utilizando um condutor piezelétrico na cavidade, que é apenas uma das maneiras de se gerar o jato sintético. (Iwana et al., 2015; Munhoz, Lee e Alves, 2012; Lehnen, Lee e Alves, 2015; Smith e Glezer, 1998; Xia e Zhong, 2012).

O jato sintético pode ser gerado basicamente de três formas de oscilação na cavidade, conforme observa-se pela Figura 2. Na Figura 2(a) uma membrana flexível oscila, fazendo com que o ar seja expulso da região da cavidade formando os anéis de vórtices. Já na Figura 2(b) a compressão do cilindro exerce uma pressão sobre o ar existente na cavidade e o expulsa formando os anéis de vórtices. Na Figura 2(c) ocorre a excitação da membrana através de excitação acústica, novamente exercendo uma pressão sobre o ar existente na cavidade que forma os anéis de vórtices. (Mallinson et al., 2004).



Figura 1. Diagrama teórico de demonstração e uma imagem real do jato sintético. Fonte: Adaptado de Smith e Glezer (1998); Xia e Zhong (2012).



O jato sintético necessita basicamente de dois estágios para o seu perfeito funcionamento. Na Figura 3(a) o sistema está estático e sem excitação por variação de frequência. No momento em que é excitado (Figura 3(b)) a membrana flexível contrai e acontece a entrada do ar na cavidade de captação. No próximo instante (Figura 3(c)) ocorre a expulsão do ar da cavidade formando os anéis de vórtices. Em nenhum momento forças externas atuam para geração da excitação na membrana, apenas a frequência gerada pelo controle que faz a captação e expulsão do ar da cavidade. (Glezer et al., 2003).



Figura 3. (a) componentes básicos do dispositivo; (b) representação da sucção; (c) representação da ejeção e formação de vórtices.

A Figura 4, de Mallinson, Kwok e Reizes (2003), apresenta um esquema teórico de comportamento dos vórtices do jato sintético próximos às regiões de saída do jato. Smith e Glezer (1998) relatam que durante a fase de ejeção a pressão estática média do fluido que está saindo do orifício é maior que a pressão que está sendo exercida pelo fluido que está externo à cavidade. O

contrário também é verdadeiro quando ocorre a sucção do ar pela região da cavidade. Essa variação de pressão, principalmente durante a sucção pode ocasionar o vórtice de suspiro transversal, conforme observa-se pela Figura 4. Mallinson, Kwok e Reizes (2003) também comprovam que se o orifício possuir uma área de seção transversal elevada o jato pode ser gerado de forma desorganizada, o que reduz a intensidade da vorticidade da pluma e prejudica a eficiência da troca térmica desejada, consequentemente diminuindo o poder de resfriamento.



Figura 4. Tipos de vórtices presentes em um jato sintetico. Fonte: Adaptado de Mallinson, Kwok e Reizes (2003).

Parâmetros adimensionais e seus efeitos na formação do jato sintético

Independente se o estudo é numérico ou experimental, a análise necessita de pelo menos dois números adimensionais: número de Reynolds (*Re*) e número de Strouhal (*St*). Estes parâmetros não são completamente independentes em estudos experimentais, pois alterando a frequência de pulsação (número de Strouhal) ocorre a variação da velocidade do jato e por consequência influencia o número de Reynolds.

Conforme Smith e Glezer (1998), a velocidade média do jato sintético é medida no plano do orifício de saída do jato. Para isso, deve-se considerar apenas o meio-período de ejeção do jato, já que a inclusão do período completo resultaria em uma média essencialmente zero devido ao balanço líquido de massa através do plano. Define-se o comprimento de uma coluna de fluido do meio período de ejeção conforme a Equação (1),

$$L_0 = \int_0^{\frac{1}{2}T} u(t) dt \quad (1),$$

onde T trata-se do período de atuação do jato e u(t) é a velocidade transiente no plano de saída do jato em um instante no tempo. A velocidade média do jato, conforme Smith e Glezer (1998) é calculada então conforme a Equação (2),

$$U_0 = \frac{L_0}{T} \quad (2)$$

A definição de velocidade média do jato de Smith e Glezer (1998) necessita de instrumentos de sondas precisos e compactos suficientes para serem posicionados exatamente no plano de saída do gerador de jatos sintéticos. Por esta razão, o estudo de Trisch (2015) optou por realizar uma média contínua da velocidade média do jato a uma distância de um diâmetro hidráulico (*d*) do plano do orifício de saída, de modo que a velocidade média é definida conforme a Equação (3),

$$U_{0,Tr} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{Tr}(t) dt \quad (3),$$

onde $u_{Tr}(t)$ é a velocidade transiente na posição mais próxima do orifício. Estudos numéricos de Lee e Goldstein (2002) e experimentos de Smith e Glezer (1998) demonstraram que a velocidade na linha de centro do jato se mantém em uma faixa de ±10% do valor de U_0 em uma distância de até 10 diâmetros hidráulicos de modo que a aproximação de U_0 por $U_{0,Tr}$ pode ser considerada aceitável.

Número de Reynolds

No campo da mecânica dos fluidos, o número de Reynolds é amplamente utilizado para normalização e similaridade de escoamentos. Para escoamentos de jatos sintéticos, utiliza-se o Re_{U_0} , calculado com base na velocidade média do jato e diâmetro hidráulico do orifício conforme a Equação (4) (Smith e Glezer, 1998),

$$\operatorname{Re}_{U_0} = \frac{\rho U_0 d}{\mu} \quad (4)$$

onde ρ trata-se da massa específica do fluido de trabalho; U_0 trata-se da velocidade média do jato; d trata-se do diâmetro hidráulico do orifício e μ trata-se da viscosidade dinâmica do fluido de trabalho.

No estudo de Lee e Goldstein (2002), variou-se μ objetivando obter uma variação de *Re* sem afetar o número de Strouhal (*St*). Com a variação apenas de *Re*, foi possível constatar que, com aumento de *Re*, ocorre um aumento na vorticidade que por consequência proporciona um jato com maior alcance quando comparado a um menor *Re* no mesmo intervalo de tempo. Isto pode ser observado nos contornos de vorticidade instantânea da Figura 5. Estudos semelhantes de Valiorgue et

al. (2009), Smith e Swift, (2001) Xia et al. (2014) também comprovaram a mesma influência de *Re* na estrutura da pluma do jato sintético.



Figura 5. Vorticidade instantânea com St = 0,0628 para (a) Re = 104,2 e (b) Re = 416,6. Fonte: Adaptado de Lee e Goldstein (2002).

Número de Strouhal

O número de Strouhal (*St*) é utilizado em fenômenos oscilatórios para determinar a frequência característica adimensional. Para um jato sintético, a sua definição é conforme a Equação (5),

$$St = \frac{f d}{U_0} \quad (5).$$

onde f é a frequência de oscilação do mecanismo que causa o deslocamento de fluido na cavidade.

O estudo de Lee e Goldstein (2002) examinou o efeito da variação da frequência de pulsação mantendo constante um valor de Re = 104,2. Foram examinados valores de St = 0,2512 a St = 0,0157. É possível observar pelos contornos de vorticidade instantânea da Figura 6(a) que, para o St maior, uma pequena quantidade de fluido é ejetada em cada ciclo de oscilação e o jato tem um formato de esteira contínua. Já no caso da Figura 6(b) com o St menor, a quantidade de fluido ejetada é grande suficiente para que os vórtices gerados praticamente não interagem um com o outro.



Figura 6. Vorticidade instantânea com Re = 104,2 para (a) St = 0,2512 e (b) St = 0,0157. Fonte: Adaptado de Lee e Goldstein (2002).

Os resultados de Lee e Goldstein (2002) são condizentes com outros estudos que examinaram as condições necessárias para a formação de um jato sintético. Rediniotis et al. (1999) determinaram que um jato circular é produzido para St = 4, mas a um valor de St = 40, o fluido ejetado era arrastado de volta para dentro da cavidade na fase de sucção sem a formação do jato. Holman et al. (2005) determinaram analiticamente que a formação de um jato ocorre para St < 12.57 – resultado confirmado posteriormente por experimentos de Shuster e Smith (2007).

Influência da Compressibilidade do Fluido

A princípio, o deslocamento de fluido que produz o jato sintético aparenta ser um fator limitante pois sugere que uma cavidade excessivamente pequena não conteria um volume de fluido suficiente. No caso de o fluido de trabalho ser o ar, a compressibilidade e o efeito de ressonância produz um efeito de magnificação que permite a formação de um jato mesmo com dimensões de cavidade reduzidas. Conforme já citado anteriormente, o jato sintético pode ser gerado através da oscilação da pressão em um campo acústico gerado pela vibração de um alto-falante. Porém, é necessário que a ressonância seja considerável ao ponto de produzir vórtices que consigam ultrapassar a barreira imposta pelas reduzidas dimensões da abertura de passagem do fluido, bem como as forças que são geradas pela sucção no momento da captação do ar na membrana. (Glezer e Amitay, 2002; Bhapkar, Srivastava e Agrawal, 2013).

O estudo de Smith e Glezer (1998), gerou imagens utilizando uma câmera de CCD com tempo de exposição de 100 µs para visualização dos vórtices que formam o jato, conforme Figura 7. Observase na Figura 7que há um par de vórtices bem definido gerado próximo a região de saída do jato, ou seja, próximo ao orifício. Na região mais distante há uma região de turbulência onde ocorre a dispersão do jato. Esse resultado demonstra que, devido à natureza oscilatória e a presença de vorticidade, o jato apresenta zonas de escoamento laminar e turbulento. Smith e Glezer (1998) determinaram que a região laminar ocorre na fase de ejeção (0 < t/T < 0.5), a uma distância de até 10 diâmetros hidráulicos do orifício do jato. A pluma do jato entra em transição na fase de sucção (0.5 < t/T < 1) e a distâncias superiores a 10 diâmetros hidráulicos, o jato é completamente turbulento. Smith e Glezer (1998) também observaram a evolução transiente da pluma do jato. Tomando um período de oscilação representativo, constatou-se que o fluido ejetado começa a formar vórtices ao redor de $t/T \approx 0.11$. A pluma cresce conforme a vorticidade aumenta entre 0.15 < t/T < 0.41 e, ao redor de $t/T \approx 0.48$, a esteira dos vórtices se destaca e a vorticidade se desloca para o ambiente externo.



Figura 7. Visualização por técnica de Schlieren de jato sintético emitido por um orifício retangular. Fonte: Smith e Glezer (1998).

Mallinson, Kwok e Reizes (2003) construíram um atuador com orifício de saída do jato com formato quadrado com dimensões de 200 μ m e testaram variações da frequência do sinal para o condutor piezelétrico da cavidade. As combinações testadas de frequência média de oscilação e amplitude máxima de deflexão da membrana são apresentadas na Tabela 1. O resultado de cada combinação de parâmetros é apresentado através de imagens capturadas no mesmo instante de tempo na Figura 8. Observa-se pela Figura 8 que a variação da frequência influencia diretamente na distância de alcance do jato e consequentemente em uma maior difusão da vorticidade. Ao comparar as imagens da Figura 8 em forma de linha: (a)x(b)x(c), (d)x(e)x(f) e (g)x(h)x(i), é possível observar que com o aumento da deflexão da membrana há notável aumento da intensidade do jato mesmo com a frequência de pulsação sendo mantida constante. A intensidade do jato também é aumentada quando fixa-se a deflexão da membrana e dobra-se os valores de frequência, observável quando comparamos os casos em forma de coluna (a)x(d)x(g), (b)x(e)x(h) e (c)x(f)x(i). *Revisão: Jatos Sintéticos e sua Aplicação para Resfriamento* Adriano Menezes da Silva, Conrad Yuan Yuen Lee



Figura 8. Condições do jato para variação do sinal de frequência e deflexão da membrana. Fonte: Mallinson, Kwok e Reizes (2003).

Tabela 1: Parâmetros	variados em estudo experimental d	le Mallinson, I	Kwok e Reizes (2003).	
Fonte: Adaptado de Mallinson, Kwok e Reizes (2003).				

CASO	Deflexão da membrana (µm)	Frequência média (Hz)
Α	0,5	725
В	1,0	725
С	2,0	725
D	0,5	1450
Ε	1,0	1450
F	2,0	1450
G	0,5	2900
Н	1,0	2900
Ι	2,0	2900

Experimentos de Chaudari et al. (2009) indicam que um dispositivo deve utilizar uma faixa de frequência próxima à frequência de ressonância, pois somente assim é produzida uma velocidade

substancial de jato. Os resultados de Chaudari et al. (2009) identificou duas frequências críticas, onde os valores de velocidade gerados possuem picos distintos, que foram identificados como a frequência de ressonância de Helmholtz e a frequência de ressonância do diafragma. A frequência de Helmholtz é vastamente conhecida, porém não muito associada com o nome. Trata-se do efeito do ar passando por uma cavidade e, devido a isso, ressoa, e tem como exemplo o som gerado ao soprar o gargalo de uma garrafa vazia. A frequência de Helmholtz pode ser estabelecida pela solução da equação de Helmholtz, levando em consideração fatores geométricos, bem como propriedades do fluido. Por outro lado, a frequência de ressonância do diafragma depende das propriedades elásticas dos materiais utilizados para sua fabricação, bem como a geometria. Esta pode ser calculada teoricamente para casos específicos ou medida de forma experimental, pois corresponde à maior velocidade obtida no jato com o menor consumo de energia. O estudo de Chaudari et al. (2009) também determinou que a diferença entre as duas frequências tende a diminuir para diâmetros maiores de orifício. Adicionalmente, a profundidade da cavidade tem efeito significativo por volta da 2ª frequência de ressonância quando utilizado orifícios com diâmetros menores. Assim, é possível se trabalhar perto da frequência de ressonância do diafragma utilizando uma membrana de baixa frequência natural pois, ao reduzir o volume da cavidade, é possível deslocar o segundo pico de frequência para valores mais altos.

O experimento de Pavlova e Amitav (2006) realizou a comparação entre jatos contínuos e jatos sintéticos. A uma frequência 420 Hz foram obtidos melhores resultados de eficiência do jato em menores distâncias axiais enquanto que a 1.200 Hz, obteve-se melhor desempenho para maiores distâncias axiais. Este resultado é condizente com o experimento de Smith e Swift (2001) utilizando orifício retangular. Foram examinadas variações de frequência e seu efeito nas velocidades médias em função da distância em relação à saída do jato. A Figura 9 mostra a diferença na estrutura do jato com frequências de 20 Hz e 100 Hz. O jato a 20 Hz (Figura 9(a)) possui estruturas de vorticidade muito mais coerentes do que a 100 Hz (Figura 9(b)), o que evidencia uma maior eficiência do jato em uma distância próxima ao orifício à baixas frequências.



Figura 9. Efeito da variação de frequência na geração do jato sintético para (a) 20 Hz e (b) 100 Hz. Fonte: Smith e Swift (2001).

Efeito da geometria do orifício

A Figura 10, adaptada de Celik e Edis (2009) apresenta as variáveis das dimensões básicas de um gerador de jato sintético. Definem-se: D como a largura ou diâmetro da cavidade, H_c como a altura da cavidade, d como o diâmetro hidráulico do orifício, h como o comprimento do orifício, A como a deflexão da membrana e H_i é a distância da saída do jato até a superfície aquecida no caso de um problema de resfriamento.



Figura 10. Geometria básica na cavidade e as variáveis envolvidas. Fonte: Adaptado de Celik e Edis (2009).

A altura da cavidade H_c e a largura da cavidade D influenciam na quantidade de ar que será armazenada durante a sucção e consequentemente afetam a estrutura da pluma do jato sintético. O formato do orifício também tem influência, pois o jato que utiliza um orifício retangular apresenta certa instabilidade nos cantos, fato que é evitado e minimizado num orifício circular ou até mesmo elíptico. Observa-se pela Figura 11 que no caso (a) e caso (d) o jato produzido com orifícios circulares ou elípticos sai com maior intensidade do que orifícios com arestas dos casos (b), (c) e (e). (Hashiehbaf e Romano, 2014).

No estudo de Jain, Puranik e Agrawal (2011) realizaram-se validações numéricas de pesquisas experimentais de diversos autores onde foi provado que o diâmetro do orifício influencia diretamente no fluxo de massa, número de Reynolds e nos campos de pressão. Porém, este não é fator determinante e único de alteração de um projeto para efetuar tal aumento de forma significativa. Comprovou-se também que ao dobrar a altura do orifício de 1,50 mm para 3,00 mm houve uma redução do número de Reynolds na faixa de 8%. Realizou-se também neste experimento, montagem na qual era possível a troca do formato da cavidade circular, elíptico ou cônico. Jain, Puranik e Agrawal (2011) citam que as cavidades de formatos cônico e elíptico apresentaram melhores resultados na velocidade média do jato, tendo o formato elíptico uma sensível diferença de desempenho, conforma observa-se na Figura 12. A

suavidade na passagem do jato pela cavidade elíptica faz com que a velocidade do jato seja aumentada, devido a não geração de turbulência na parte interna da cavidade e somente na saída do orifício.



Figura 11. Variação da geometria e efeito no jato sintético: (a) orifício circular – (b) orifício quadrado – (c) orifício triangular – (d) orifício elíptico – (e) orifício retangular. Fonte: Hashiehbaf e Romano (2014).



Figura 12. Influência dos formatos de cavidade na velocidade média do jato. Fonte: Adaptado de Jain, Puranik e Agrawal (2011).

Jatos sintéticos em configuração tangencial

Em uma configuração tangencial, a evolução da pluma do jato e sua interação com o ambiente externo são diferentes de um jato livre. Mahalingan et al. (2007) demonstra na Figura 13 que o jato tangencial ejetado ao longo da superfície de um canal induz um movimento do fluido à jusante dentro do canal. Quando a membrana da cavidade inverte de direção e o jato entra em modo de sucção, o fluido deslocado à jusante tende a estar longe suficiente e não é re-ingerido na cavidade: na realidade o fluido próximo à entrada do canal é arrastado para dentro do canal e cavidade. A operação sequencial da membrana da cavidade resulta no desenvolvimento do jato sintético tangencial e na indução de um escoamento médio no canal.

O experimento de Trisch (2015), apresentado na Figura 14, utilizou uma bancada de teste jato sintético tangencial com o elemento de aquecimento. O elemento de aquecimento tem comprimento limitado e não engloba toda a base do canal mas pode ser reposicionado em distâncias regulares em relação ao orifício de saída do jato. Apesar da configuração de Trisch (2015) conter apenas um gerador de jato sintético, enquanto que os estudos de Mahalingan et al. (2007) continham dois geradores, a pulsação do jato sintético único também resultou no desenvolvimento de um escoamento médio ao longo do canal. A formação do escoamento médio também foi observada com o topo do canal aberto ou fechado.



Figura 13. Ejeção e sucção de um jato tangencial em um canal horizontal. Fonte: Adaptado de Mahalingan et al. (2007).

Munhoz, Lee e Alves (2012) realizaram estudo semelhante via simulação numérica onde a posição do elemento de aquecimento podia ser variada ao longo do canal. A particularidade da simulação numérica desenvolvida por Munhoz, Lee e Alves (2012) é que esta não incluía a geometria da cavidade e uma velocidade oscilante era aplicada diretamente na fronteira do duto do jato, conforme observa-se na Figura 15. Esta simplificação era aceitável pelo fluido da simulação ser definido como incompressível e consequentemente não haver frequências de Helmholtz associadas à uma cavidade. Mesmo assim, variações na amplitude de oscilação e a frequência de pulsação da velocidade foram incluídas e observou-se a formação de um escoamento médio no canal conforme os ensaios experimentais.



Figura 14. Bancada experimental de Trisch (2015) para jato sintético tangencial.



Figura 15. Esquema geométrico de simulação numérica de jato tangencial desenvolvida por Munhoz, Lee e Alves (2015). Fonte: Munhoz (2015).

Aplicação de jatos sintéticos em resfriamento

Devido a sua natureza oscilatória, jatos sintéticos contém altos níveis de turbulência, apresentando então um bom potencial de aumentar a troca térmica de uma superfície. As pesquisas realizadas utilizam os mais variados recursos, seja experimental ou numérico, para aprimorar as

pesquisas e chegar a resultados satisfatórios. Sabe-se por Mcguinn et al. (2008) que os jatos sintéticos estão em constante pesquisa para estabelecer as melhores condições de funcionamento, parâmetros geométricos e de controle. Trisch (2015) cita que o jato sintético permite uma elevada taxa de arrefecimento principalmente de componentes eletrônicos, pois em muitas vezes ele pode ser construído em microescala. Chen et al. (1999) cita que o jato sintético também é preferido por se tratar de equipamento de baixo custo e que pode ser fabricado com micro usinagem e até mesmo com metais sinterizados.

Resfriamento de jatos sintéticos em configuração de impactação

Em uma configuração de impactação, a dissipação da turbulência da pluma no impacto auxilia na própria troca térmica com a superfície. Testes de aquecimento de uma superfície através de um jato aquecido foram realizados por Jambunathan et al. (1992). Nesse caso, o fato do ar quente ejetado se misturar com o ar do ambiente mais frio faz com que o efeito de aquecimento na superfície impactada seja menor. Esta perda de eficiência na troca térmica tende a aumentar quando a diferença de temperatura entre o jato quente e o ar ambiente é maior. Um efeito semelhante pode ocorrer no caso de jatos sintéticos em resfriamento caso o ar quente resultante do impacto do jato com a superfície aquecida seja reinserido para dentro da cavidade do gerador.

Etemoglu (2007) realizou experimentos analisando a influência da temperatura e a velocidade do fluido, bem como a forma do orifício e a distância da saída do jato do orifício até o impacto na superfície aquecida. Nos resultados obtidos foi possível concluir que a distância de impacto do jato influencia diretamente no coeficiente de convecção. Medições indicaram que o nível máximo de turbulência é atingido em distâncias relativamente próximas ao orifício de saída do jato, o que representaria uma posição recomendada para o posicionamento de um elemento a ser resfriado. Esta distância ótima é influenciada então pelo diâmetro hidráulico e coeficiente de descarga do orifício.

Quando o resfriamento é obtido com jato por impactação, os jatos sintéticos têm apresentado melhores eficiências quando comparados aos jatos contínuos. No estudo de Pavlova e Amitay (2006), que foi concebido experimentalmente com uma frequência de 420 Hz, obtiveram-se melhores eficiências no arrefecimento para maiores distâncias entre a saída do jato e a superfície aquecida. Em contrapartida, utilizando a frequência 1200 Hz obteve-se melhores resultados para distâncias menores. Pela conclusão do estudo, utilizando mesmo número de Reynolds, a melhora na eficiência de jatos sintéticos se dá pela criação dos vórtices que conseguem com maior eficiência remover o calor da superfície que está aquecida.

Nas análises do experimento de jato por impactação de Chaudari, Puranik e Agrawal (2010), verifica-se que o orifício de formato retangular com razão comprimento/largura de até 5,25 vezes

obteve melhor desempenho para distâncias reduzidas, o que possibilita uma aplicação prática quando houver restrição de espaço físico para instalação deste sistema de resfriamento. No mesmo experimento também foram realizadas medições com orifícios de formato circular e quadrado, onde ambos obtiveram melhores resultados de troca térmica em relação a um orifício retangular quando aplicados a distâncias maiores.

Múltiplos jatos impactantes em uma configuração com orifício central com diâmetro de 5 mm e mais 2, 4 ou 8 orifícios menores com diâmetros de 3 mm posicionados equidistantes de forma radial na periferia do orifício central também foram testados por Chaudari, Puranik e Agrawal (2011). Os testes também foram executados num sistema sem o furo central e somente com os furos radiais de 2, 4 ou 8 unidades. Os resultados obtidos para o coeficiente de convecção mostram que o sistema com furo central e mais 8 furos equidistantes obteve resultados na faixa de 10% mais elevados quando comparados aos outros sistemas. Porém, quando normalizadas as medições e plotadas em formato gráficos, os valores do número de Nusselt (*Nu*) não foram muito superiores ao ponto de serem considerados sem variação significante quando comparado aos demais testes com furos radiais. Em contrapartida a comparação com os testes realizados com a placa de furo único e central obteve um aumento de 2x de número de Nusselt com distâncias mais longas.

Lee, Woyciekoski e Copetti (2016), testaram uma configuração de impactação com variações nas dimensões da cavidade e distância da placa aquecida. Os resultados indicaram que cavidades muito rasas afetam negativamente o desempenho do jato sintético, mas que este efeito tende a desaparecer rapidamente a partir de um tamanho mínimo de cavidade. No mesmo estudo observou-se que a transferência de calor apresentou melhores resultados em superfícies aonde as distâncias axiais são menores e com orifícios de jato com razões de aspecto menores. Isto é apresentado na Figura 16, onde a Configuração 3 apresenta um orifício de razão de aspecto 4 enquanto que Configurações 1 2 e apresentam orifícios com razão de aspecto 8. Também é possível observar na Figura 16 que o número de Nusselt aumenta até uma razão de distância da placa aquecida por diâmetro hidráulico do orifício, H/D = 6. Este resultado é semelhante ao observado por Chaudari, Puranik e Agrawal (2010) onde foi constatado que os jatos sintéticos com formas retangulares tendem a ser melhores em locais com restrições de espaço.

Revisão: Jatos Sintéticos e sua Aplicação para Resfriamento Adriano Menezes da Silva, Conrad Yuan Yuen Lee



Figura 16. Variação de *Nu* médio pela distância axial para três configurações de Lee, Woyciekoski e Copetti (2016). Fonte: Lee, Woyciekoski e Copetti (2016).

Resfriamento de jatos sintéticos em configuração tangencial

No caso de uma configuração tangencial possui a vantagem de induzir uma corrente no canal de modo que há uma renovação constante do fluido de arrefecimento. O estudo de Mahalingam e Glezer (2005) realizou testes em sistemas com potências mais elevadas utilizando o jato sintético e comparou os resultados com um sistema com convecção forçada utilizando um ventilador. Observa-se pela Figura 17 que o sistema utilizando jato sintético possui um coeficiente de convecção bem mais elevado que o sistema simples com convecção forçada, se ambos induzem o mesmo número de Reynolds no canal contendo e elemento eletrônico.



Figura 17. Coeficiente de convecção de jato sintético tangencial (●) e convecção forçada (--). Fonte: Adaptado de Mahalingam e Glezer (2005).

O estudo de Munhoz, Lee e Alves (2015) demonstrou que com o uso de jatos sintéticos tangenciais houveram aumentos significativos no número de Nusselt chegando a 122% em relação a um escoamento turbulento em regime permanente no canal com a mesma vazão mássica. A dissipação

térmica ao longo do canal não é uniforme, sendo máxima próximo ao orifício de saída do jato e decaindo ao longo da superfície. A Figura 18 possibilita a visualização do campo de vorticidade média entre o escoamento do jato sintético e escoamento turbulento em regime permanente. O aumento da intensidade da vorticidade perto da parede é um indicativo do aumento de turbulência gerada no escoamento médio do jato sintético, o que explica a melhora significativa no coeficiente de convecção. O estudo também confirmou que o número de Nusselt não é uniforme mas decresce a partir de um valor máximo atingido no orifício de saída do jato.

Os experimentos de Trisch (2015) utilizaram um jato tangencial único em um canal aberto para realizar medições de transferência de calor com diversas variações de posicionamento do elemento de aquecimento. Condições de temperatura constante e fluxo térmico constante foram testadas no elemento de aquecimento e foi variada a frequência de atuação da membrana oscilatória. A Figura 19 apresenta os números de Nusselt obtidos para o caso de fluxo térmico constante no elemento de aquecimento. As distâncias de 50 mm até 200 mm representa a posição da borda do elemento de aquecimento em relação ao orifício de saída do jato. Pode-se observar pelos picos de número de Nusselt da Figura 19 que o conjunto da cavidade e gargalo do orifício possui uma frequência de Helmholtz ao redor de 60 Hz, e que, semelhante aos resultados de Munhoz, Lee e Alves (2015) a transferência de calor decresce conforme o elemento de aquecimento é posicionado mais distante do orifício do jato. Para fins de comparação, o desempenho do jato tangencial foi comparado em um canal fechado com diferentes modelos de coolers comumente utilizados em equipamentos eletrônicos. Diferente dos resultados experimentais de Mahalingam e Glezer (2005), foi possível obter um número de Nusselt equivalente, mas com um cooler com diâmetro hidráulico 6,6 vezes maior que o orifício do jato sintético. Este resultado indica que semelhante ao resfriamento de impactação direta de Chaudari, Puranik e Agrawal (2010), jatos sintéticos tangenciais também são mais recomendáveis em situações de restrição de espaço.







Figura 19. *Nu* médios em relação a frequência de oscilação da membrana e posição do elemento de aquecimento no experimento de Trisch (2015). Fonte: Trisch (2015).

Conclusões

Jatos sintéticos são dispositivos produzidos a partir da oscilação de fluido dentro de uma cavidade e sua ejeção em um meio externo. Diferente de jatos contínuos, jatos sintéticos não necessitam de uma fonte externa de fluido e, devido a sua natureza oscilatória, contém um alto nível de turbulência inerente. A formação do jato requer um número de Strouhal baixo suficiente (entre 4 e 12,57) para que o fluido ejetado não seja reingerido pela cavidade e um número de Reynolds alto suficiente para a formação de vorticidade no meio externo. Apesar do alto nível de rotacionalidade, a pluma do jato mantém sua estrutura coerente e é considerado laminar em uma região inferior a 10 diâmetros hidráulicos de orifício. Para distâncias superiores, há a tendência da pluma do jato se decompor em um jato turbulento.

O desempenho do jato é influenciado pela compressibilidade do fluido. Velocidades médias do jato atingem picos nas frequências de ressonância de Helmholtz e do diafragma da cavidade. As duas frequências são distintas para pequenos orifícios de jato mas tendem as coincidir conforme o diâmetro hidráulico do orifício aumenta. O formato do orifício também induz variações no jato, com orifícios de formato circular ou elíptico atingindo velocidades médias mais altas. A cavidade tem uma baixa influência no desempenho do jato mas observou-se que cavidades com afunilamento elíptico em direção ao gargalo do orifício tendem a apresentar uma pequena melhora no desempenho do jato quando comparado a cavidades puramente cilíndricas.

A aplicação de jatos sintéticos para resfriamento ocorre em configuração de impactação ou tangencial. No primeiro caso a pluma do jato é direcionada perpendicular ou em um ângulo agudo

contra uma superfície aquecida enquanto que no segundo caso, o jato é direcionado paralelo de modo que a pluma desliza sobre a superfície aquecida. Jatos sintéticos em configuração de impactação apresentam efeitos de resfriamento 5,25 vezes superior ao obtido por um jato contínuo com o mesmo número de Reynolds. Variações da configuração dos orifícios do jato também determinaram que a combinação de um orifício central circundado por orifícios menores tem um desempenho 10% superior a um orifício único. Jatos sintéticos em configuração tangencial apresentaram aumentos de 2 vezes em resfriamento quando comparados com um escoamento em regime permanente com vazão volumétrica correspondente ao induzido pela presença do jato sintético. O desempenho da configuração tangencial pode ser reproduzido se o escoamento em regime permanente é gerado por um dispositivo com um alto valor de turbulência inerente, como o ventilador axial de um cooler. Mesmo assim, experimentos demonstram que seria necessário um cooler com diâmetro hidráulico muito superior ao jato sintético, o que demonstra a aplicabilidade dos jatos sintéticos para aplicações com restrição de espaço.

Referências

BHAPKAR, U. S.; SRIVASTAVA, A.; AGRAWAL, A. 2013. Acoustic and heat transfer aspects of an inclined impinging synthetic jet. *International Journal of Thermal Sciences*, **74**:145-155. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.06.007

CELIK, B.; EDIS, F. O. 2009. Micro-scale synthetic-jet actuator flow simulation with characteristicbase-split method. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, **81**(3):239-246. https://doi.org/10.1108/00022660910954754

CHAUDARI, M.; PURANIK, B.; AGRAWAL, A. 2010. Effect of orifice shape in synthetic jet based impingement cooling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **34**(2):246-256. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.11.001

CHAUDARI, M.; PURANIK, B.; AGRAWAL, A. 2011. Multiple orifice synthetic jet for improvement in impingement heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **54**(9-10):2056-2065. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.12.023

CHAUDARI, M.; VERMA, G.; PURANIK, B.; AGRAWAL, A. 2009. Frequency response of a synthetic jet cavity. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **33**(3):439-448. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.10.008

+++++CHEN, Y. J.; LIANG, S.; AUNG, K.; GLEZER, A.; JAGODA, J. 1999. *Enhanced mixing in a simulated combustor using synthetic jet actuators*. In: 37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings. https://doi.org/10.2514/6.1999-449

ETEMOGLU, A B. 2007. A brief survey and economical analysis of air cooling for electronic equipments. *International Communications in Heat and Mass Transfer* **34**(1):103–113. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.08.005

GLEZER, A., ALLEN, M. G., BRAND O., LEE, J. B., KERCHER D. S. 2003. Microjet Cooling Devices for Thermal Management of Electronics. *IEEE Transactions on components and packaging Technologies*. **26**(2):359-366. https://doi.org/10.1109/TCAPT.2003.815116

GLEZER, A., AMITAY, M. 2002. Synthetic Jets. Annu Rev Fluid Mech, **34**:503-529. https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.34.090501.094913 HASHIEHBAF, A.; ROMANO, G. P. 2014. Experimental investigation on circular and non-circular synthetic jets issuing from sharp edge orifices. *In:* International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisboa, 2014. Anais de Lisboa: International Symposium On Applications Of Laser Techniques To Fluid Mechanics, p. 56 – 65.

HOLMAN, R., UTTURKAR, Y., MITTAL, R., SMITH, B., CATTAFESTA, L. 2005. A formation criterion for synthetic jets. *AIAA Journal*. **43**(10):2110-2116. https://doi.org/10.2514/1.12033

INTEL, 2017. Disponível em: https://www.intel.com/content/www/us/en/products/processors/core/i7-processors/i7-6700k.html. Acesso em: 14/09/2017.

IWANA, T.; SUENAGA, K.; SHIRAI, K.; KAMEYA, Y.; MOTOSUKE, M.; HONAMI, S. 2015. Heat transfer and fluid flow characteristics of impinging jet using combined device with triangular tabs and synthetic jets. *Experimental Thermal And Fluid Science*, **68**:322-329. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.05.007

JAIN, M., PURANIK B., AGRAWAL A. 2011. A numeral investigation of effects cavity and orifice parameters on the characteristics of a synthetic jet flow. *Sensors and actuators A: Physical*. **165**(2):351-366. https://doi.org/10.1016/j.sna.2010.11.001

JAMBUNATHAN, K.; LAI, E.; MOSS, M. A.; BUTTON, B. L. 1992. A review of heat transfer data for single circular jet impingement. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **13**(2):106-115. https://doi.org/10.1016/0142-727X(92)90017-4

LEE, C. Y. Y.; WOYCIEKOSKI, M. L.; COPETTI, J. B. 2016. Experimental study of synthetic jets with rectangular orifice for electronic cooling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **78**:242-248. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.06.007

LEE, C.Y. Y., GOLDSTEIN, D.B. 2002. Two-dimensional synthetic jet simulation. *AIAA*, *Journal* **40**(3):510-516. https://doi.org/10.2514/2.1675

LEHNEN, M.V., LEE. C.Y.Y., ALVES, F.L.D. 2015. Nusselt number correlation for synthetic jets. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **38**(7):2161-2171 https://doi.org/10.1007/s40430-015-0337-1

MAHALINGAM, R.; GLEZER, A. 2005. Design and thermal characteristics of a synthetic jet ejector heat sink. *Journal of Electronic Packaging*, **127**(2):172-177. https://doi.org/10.1115/1.1869509

MAHALINGAM, R.; HEFFINGTON, S.; JONES, L.; WILLIAMS, R. 2007. Synthetic Jets for forced of electronics. *Electronics Cooling*, **13**(2):12-18.

MALLINSON, S. G.; KWOK, C.Y.; REIZES, J. A. 2003. Numerical simulation of micro-fabricated zero mass-flux jet actuators. *Sensors and Actuators A*, **105**(3):229-236. https://doi.org/10.1016/S0924-4247(03)00204-8

MALLINSON, S. G.; REIZES, J.A.; HONG, G.; WESTBURY, P. S. 2004. Analysis of hot-wire anemometry data obtained in a synthetic jet flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **28**(4):265-272. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2003.05.001

MCGUINN, A.; PERSOONS, T.; VALIORGUE, P.; O'DONOVAN, T. S.; MURRAY, D. B. 2008. Heat Transfer Measurements of an Impinging Synthetic Air Jet with Constant Stroke Length. *In:* 5th European Thermal-Sciences Conference, The Nederlands, 2008.

MUNHOZ, F., LEE, C. Y. Y., ALVES, F. L. D. 2015. Numerical study of cooling by tangential synthetic jet. *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*, **14**(1):47-53.

PAVLOVA, A.; AMITAY, M. 2006. Electronic cooling using synthetic jet impingement. *Journal of Heat Transfer*, **128**(9):897-907. https://doi.org/10.1115/1.2241889

REDINIOTIS, O.K.; KO, J.; YUE, X.; KURDILA, A.J. 1999. Synthetic jets, their reduced order modeling and applications to flow control. *In:* AIAA 37th Aerosp. Sci. Meet. 99-1000, Reno, Nev. 1999. https://doi.org/10.2514/6.1999-1000

SHUSTER, J. M.; SMITH, D. R. 2007. Experimental study of the formation and scaling of a round synthetic jet. *Phys Fluids*. **19**(4):45109-45121. https://doi.org/10.1063/1.2711481

SMITH, B. L.; SWIFT, G. W. 2001. Synthetic Jets at Large Reynolds Number and Comparison to Continuous Jets. *In:* The 31st AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Anaheim, 2001. https://doi.org/10.2514/6.2001-3030

SMITH, B. L.; GLEZER, A. 1998. The formation and evolution of syntethic jets. *Phys Fluids*. **10**(9):2281-2297. https://doi.org/10.1063/1.869828

TRISCH, M. 2015. *Resfriamento de componentes eletrônicos por jatos sintéticos tangenciais*. Dissertação Mestrado. São Leopoldo, RS. Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), 104 p.

VALIORGUE, P. PERSOONS, T.; MCGUINN, A. MURRAY, D. B. 2009. Heat Transfer mechanisms in an impinging synthetic jet for a small jet-to-surface spacing. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **33**(4):597-603, 2009. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.12.006

XIA, Q., ZHONG, S. 2012. An experimental study on the behaviours of circular synthetic jets at low Reynolds numbers. *Journal of Mechanical Engineering Science*. **226**:2686–2700. https://doi.org/10.1177/0954406212436454

XIA, Q.; LEI, S.; MA, J.; ZHONG, S. 2014. Numerical study of circular jets at low Reynolds numbers. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **50**:456-466. https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.10.019

ZHANG, P.; WANG, J.; FENG, L. 2008. Review of zero-net-mass-flux jet and its application in separation flow control. *Science in China Series E: Technological Sciences*. **51**(9):1315-1344. https://doi.org/10.1007/s11431-008-0174-x

Submetido: 06/07/2017 Aceito: 06/127/2017