

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DOS EFEITOS DA PERMEABILIDADE VARIÁVEL EM ELEMENTOS POROSOS  
SOBRE A PERFORMANCE DE BOMBAS CAPILARES

por

Andrei Lima Schmitt

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Schmitt, Andrei Lima  
ESTUDO DOS EFEITOS DA PERMEABILIDADE VARIÁVEL EM  
ELEMENTOS POROSOS SOBRE A PERFORMANCE DE BOMBAS  
CAPILARES / Andrei Lima Schmitt. -- 2019.  
21 f.  
Orientador: Cirilo Seppi Bresolin.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Permeabilidade variável. 2. Capillary pumped  
loop. 3. Bomba capilar. I. Bresolin, Cirilo Seppi,  
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Andrei Lima Schmitt

ESTUDO DOS EFEITOS DA PERMEABILIDADE VARIÁVEL EM ELEMENTOS POROSOS  
SOBRE A PERFORMANCE DE BOMBAS CAPILARES

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Cirilo Seppi Bresolin

Comissão de Avaliação:

Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof. Paulo Smith Schneider

Prof. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, dezembro de 2019

## DEDICATÓRIA

Este trabalho de pesquisa é dedicado à minha família, em especial aos meus pais, Ana e Lairton. O carinho, afeto, dedicação, confiança e cuidado que me deram durante esta jornada foram essenciais.

Agradeço aos colegas de graduação pelo companheirismo durante os momentos difíceis do curso.

Agradeço à minha namorada Cristina pelo companheirismo e compreensão durante o período de elaboração deste trabalho.

EPÍGRAFE

*O peso da evidência.  
de uma afirmação extraordinária  
deve ser proporcional  
à sua estranheza.*

***Pierre Simon Laplace***

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2019

ESTUDO DOS EFEITOS DA PERMEABILIDADE VARIÁVEL EM  
ELEMENTOS POROSOS SOBRE A PERFORMANCE DE BOMBAS  
CAPILARES

**Schmitt, Andrei Lima**

andreischmitt@hotmail.com

**Resumo.** *O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo teórico dos efeitos da utilização de evaporadores com porosidade variável em bombas capilares (Capillary Pumped Loop - CPL). O estudo foi desenvolvido a partir de um modelo termo hidráulico de um CPL composto por um reservatório bifásico, um condensador, uma linha de líquido, uma linha de vapor e um evaporador poroso. A partir do modelo teórico aplicou-se diferentes intervalos de porosidade ao evaporador e quantificou-se os efeitos dessa variação sobre o sistema. Como resultado, observa-se que a porosidade é a propriedade que governa o sistema e que grandes variações da mesma ao longo do evaporador não desenvolveram maiores taxas de remoção de calor em comparação com porosidades maiores submetidas a variações menores. Assim, é recomendável a aplicação de porosidades maiores ao longo do evaporador.*

**Palavras-chave:** *Capillary Pumped Loop, porosidade variável, bomba capilar*

**Abstract.** *The aim of this paper is to present a theoretical study of the effects of the use of variable porosity evaporators in Capillary Pumped Loop (CPL). The study was developed from a thermohydraulic model of a CPL composed by a biphasic reservoir, a condenser, a liquid line, a vapor line and a porous wick evaporator. From the theoretical model, different range of porosity were applied to the evaporator wick and the effects of this variation on the system were quantified. As a result, it is observed that porosity is the property that governs the system and that large variations of it throughout the evaporator did not develop higher heat removal rates compared to larger porosities subjected to minor variations. Thus, it is recommended to apply larger porosities along the evaporator.*

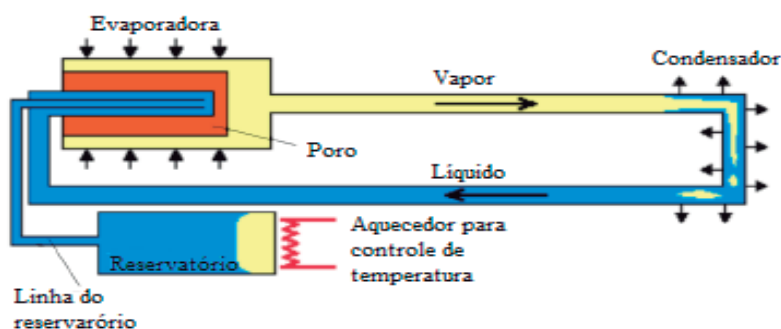
**Keywords:** *Capillary Pumped Loop, variable porosity, capillary pump*

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, sistemas de resfriamento bifásicos, especificamente do tipo *Capillary Pumped Loop* (CPL) começaram a ser utilizados na indústria aeroespacial, de acordo com (MAIDANIK; FERSHTATER; SOLODOVNIK, 1994). Sua grande vantagem consiste na operação passiva, sem necessidade de bombeamento mecânico. A circulação do fluido de trabalho pelo sistema se dá pelo ganho de pressão na estrutura porosa do evaporador por efeito capilar. Os CPL's são muito versáteis, podendo operar através de longas distâncias entre a fonte quente e a fonte fria, com pequena diferença de temperatura entre elas.

O design básico de um CPL, apresentado na Fig. 1, é composto por um evaporador poroso, um condensador, um reservatório bifásico e linhas de líquido e de vapor.

Fig. 1 – Design básico de um sistema CPL (Adaptado de (CHEN *et al.*, 2016)).



O calor é absorvido pelo fluido de trabalho no evaporador, fazendo-o mudar de fase. A diferença de pressão capilar entre as fases líquida e vapor no meio poroso gera o efeito de bombeamento, que desloca o fluido pelo sistema. Ao chegar no condensador o fluido volta à fase líquida. O reservatório é usado para definir a temperatura de operação. O reservatório deve ser construído para que a temperatura máxima de operação da CPL possa compensar a expansão térmica do fluido de trabalho. O sistema opera sem partes móveis. O fluido deve estar em seu estado puro, sem contaminantes que possam obstruir o sistema.

Houveram grandes esforços para expandir os campos de atuação do CPL para o meio terrestre. Accorinti, Ayel e Bertin (2019) desenvolveram um estudo da partida de um CPL ambientado no meio terrestre, sob a ação da gravidade e obteve-se um melhor entendimento dos complexos fenômenos que ocorrem nessa fase. No estudo de Boubaker e Platel (2016) foi desenvolvida a validação um modelo matemático transiente 2D de um CPL para ambiente terrestre, que considera a existência de bolsas de vapor dentro dos poros do evaporador. No trabalho de Wang *et al.* (2008), foi desenvolvido o projeto de um Micro CPL (MCPL), sem uma fonte externa de calor, voltado ao resfriamento de eletrônicos de alta potência.

A performance dos *Capillary Pumped Loops* é afetada por diversos parâmetros, como elevação (RIEHL, 2004), temperatura de operação, fluido de trabalho (JOUNG *et al.*, 2016), material do meio poroso (BERTI *et al.*, 2008) e principalmente pela porosidade do elemento poroso.

Atualmente desenvolvem-se estudos sobre meios porosos baseados na impressão 3D, como no trabalho de Esarte *et al.* (2019), onde um elemento poroso, através do método SLM (*Selective Laser Melting*), foi construído com propriedades de permeabilidade duas ordens maiores do que por métodos de sinterização.

Devido aos recentes avanços nas tecnologias de impressão 3D surgiu a questão: - “Construir uma evaporador poroso de um CPL sujeita à porosidade variável geraria benefícios à performance do sistema?”

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é verificar a questão acima levantada tendo como base o modelo termo hidráulico e bancada experimental, ambos desenvolvidos no trabalho de Margaris *et al.* (2007).

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O projeto de um CPL é definido de forma que a pressão capilar no evaporador seja maior que as perdas de carga nos demais componentes do sistema. Assim, pode-se definir a pressão efetiva  $D_{p,eff}$  como:

$$D_{p,eff} = D_{p,c,max} + D_{p,b} - D_{p,total} \quad (1)$$

O ganho de pressão  $D_{p,c,max}$ , [Pa], é gerado pela tensão superficial do fluido de trabalho escoando através da estrutura porosa e é definido pela equação de Young-Laplace dada por:

$$D_{p,c,max} = \frac{2\cdot\gamma}{r_c} \quad (2)$$

onde  $\gamma$  é a tensão superficial [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ] do fluido de trabalho e  $r_c$  corresponde ao raio do poro [m].

O ganho de pressão  $D_{p,b}$ , [Pa], gerado pelo empuxo devido às diferenças de fase ao longo do ciclo é dado por:

$$D_{p,b} = (\rho_l - \rho_v) \cdot g \cdot h \quad (3)$$

onde  $g$  é a aceleração gravitacional [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ],  $h$  é altura relativa [m] e  $\rho_l$  e  $\rho_v$  são as massas específicas da fase líquida e vapor [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ], respectivamente.

A perda de carga total no sistema  $D_{p,total}$  [Pa], é a soma das perdas de carga das linhas de líquido e vapor, condensador, evaporador poroso e pela coluna de líquido, dada por:

$$D_{p,total} = D_{p,w} + D_{p,l} + D_{p,v} + D_{p,cd} + D_{p,g} \quad (4)$$

A velocidade do líquido  $u_l$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] através do elemento poroso, segundo a Lei de Darcy, é dada por:

$$u_l = -\frac{K_w dp}{\mu_l dx} \quad (5)$$

onde  $\mu_l$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ] é a viscosidade da fase líquida e  $K_w$  a permeabilidade do evaporador [ $\text{m}^2$ ].

Sendo assim, a vazão mássica  $\dot{m}$  [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ] pode ser descrita por:

$$\dot{m} = -\frac{\rho_l \cdot A_w \cdot K_w dp}{\mu_l dx} \quad (6)$$

onde  $A_w$  é a área transversal do elemento poroso [ $\text{m}^2$ ].

Se o meio poroso possui espessura  $L_w$ , ao integrar a Eq.(6) ao longo de  $x$  e assumindo a permeabilidade e área transversal constantes, obtêm-se a seguinte expressão para a perda de carga  $D_{p,w}$  no elemento poroso:

$$D_{p,w} = \frac{\mu_l \cdot \dot{m} \cdot L_w}{\rho_l \cdot A_w \cdot K_w} \quad (7)$$

No entanto, se a permeabilidade variar ao longo da espessura do evaporador, a seguinte expressão geral é obtida, em substituição à Eq.(7):

$$D_{p,w} = \frac{\mu_l \cdot \dot{m}}{\rho_l \cdot A_w} \int_0^{L_w} \frac{1}{K_w(x)} dx \quad (8)$$



onde  $L_w$  é o comprimento do elemento poroso [m] e  $K_w(x)$  é a função que descreve a variação da permeabilidade ao longo do evaporador [m<sup>2</sup>]. A permeabilidade pode ser relacionada à porosidade através da equação de Karman-Cozeny, dada por:

$$K_w(x) = \frac{4 \cdot r_c^2 \cdot E(x)^3}{150 \cdot (1 - E(x))^2} \quad (9)$$

onde  $E(x)$  é a porosidade do elemento poroso ao longo da espessura.

A perda de carga no condensador  $D_{p,cd}$  [Pa] do CPL, a qual foi extraída do trabalho de Margaris *et al.* (2007), é dada por:

$$D_{p,cd} = \frac{16}{\pi^2 \cdot d_{cd,h}^4} \cdot \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right) \cdot \rho_l \cdot Q_l^2 \quad (10)$$

onde  $d_{cd,h}$  é o diâmetro hidráulico do condensador [m] e  $Q_l$  é a vazão volumétrica da fase líquida [m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>].

A perda de carga na linha de líquido  $D_{p,l}$  [Pa] e na linha de vapor  $D_{p,v}$  [Pa] são dadas por:

$$D_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \quad (11)$$

Devido à baixa vazão volumétrica do sistema, o fator de atrito considerado para os cálculos foi o de regime laminar, cuja equação é dada por:

$$f(Re) = \frac{64}{Re} \quad (12)$$

onde  $Re$  é o número de Reynolds do escoamento ao longo de cada componente.

Ao realizar-se a substituição da Eq.(12) na Eq.(11), obteve-se as seguintes relações para as perdas de carga na linha de líquido e de vapor:

$$D_{p,l} = \frac{128 \cdot \mu_l \cdot L_l}{\pi \cdot d_{l,h}^4} \cdot Q_l \quad (13)$$

onde  $L_l$  é o comprimento da linha de líquido [m] e  $d_{l,h}$  é o diâmetro hidráulico da linha de líquido [m].

$$D_{p,v} = \frac{128 \cdot \mu_v \cdot L_v \cdot \rho_l}{\pi \cdot d_{v,h}^4 \cdot \rho_v} \cdot Q_l \quad (14)$$

onde  $\mu_v$  é a viscosidade do fluido na fase vapor,  $L_v$  é o comprimento da linha de vapor e  $d_{v,h}$  o diâmetro hidráulico da linha de vapor.

A perda de carga gerada pela coluna de líquido  $D_{p,g}$  [Pa] dentro do sistema foi considerada e é dada por:

$$D_{p,g} = \rho_l \cdot g \cdot h \quad (15)$$

Ao somar as equações (8), (10), (13), (14) e (15), obtêm-se a perda de carga total do sistema.

Para relacionar as grandezas hidrodinâmicas com as grandezas termodinâmicas, utilizou-se uma relação entre vazão mássica, velocidade do fluido, calor aplicado à evaporador e a entalpia de líquido-vapor.

A vazão mássica  $\dot{m}$  é dada pela razão da potência (ou carga térmica) do evaporador e a entalpia de mudança de fase líquido-vapor, na forma:

$$\dot{m} = \frac{P_e}{h_{l,v}} \quad (16)$$

onde  $P_e$  é a carga térmica do sistema [W] e  $h_{l,v}$  é a entalpia de mudança de fase [J. kg<sup>-1</sup>].

A velocidade do escoamento  $u$  [m. s<sup>-1</sup>] é então calculada através da área transversal definida pelo diâmetro hidráulico.

$$u = \frac{4.\dot{m}}{\rho_l.\pi.d_h^2} \quad (17)$$

Combinando as Eq.(16) e Eq.(17), tem-se que:

$$u = \frac{4.P_e}{\rho_l.\pi.d_h^2.h_{l,v}} \quad (18)$$

A partir da relação apresentada na Eq.(18), é possível rearranjar as Eq.(8), Eq.(10), Eq.(13), Eq.(14) e Eq.(15), juntamente com as Eq.(1), Eq.(2), Eq.(3) e Eq.(4) para determinar a expressão para a máxima potência de operação do sistema, que é dada por:

$$P_e = \frac{\frac{2.\gamma}{r_c}.\rho_l.g.h + (\rho_l - \rho_v).g.h}{\frac{\mu_l}{\rho_l.A_w.h_{l,v}}.\int_0^L \frac{1}{K_w(x)}.dx + \frac{16.Q_l}{\pi^2.d_{cd,h}^4.h_{l,v}}.\left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1\right) + \frac{128.\mu_l.L_l}{\pi.\rho_l.d_{lh}^4.h_{l,v}} + \frac{128.\mu_v.L_v}{\pi.\rho_v.d_{vh}^4.h_{l,v}}} \quad (19)$$

A Eq.(19) representa a quantidade máxima de calor que o sistema consegue transferir entre a evaporador e o condensador.

O modelo termo hidráulico adotado acima foi aplicado ao mesmo experimento realizado por Margaris *et al.* (2007), com os mesmos parâmetros construtivos: água como fluido de trabalho e propriedades de líquido a 25°C e de vapor a 100°C. A Tab. 1 apresenta os parâmetros utilizados no estudo citado:

Tab. 1 – Parâmetros construtivos e propriedades consideradas no sistema. (Margaris *et al.*, 2007).

$A_w$	Área do meio poroso	$3,1,131. 10^{-4} [m^2]$
$L_w$	Comprimento do meio poroso	$20. 10^{-3}[m]$
$L_l$	Comprimento da linha de líquido	3,67 [m]
$L_v$	Comprimento da linha de vapor	3,05 [m]
$d$	Diâmetro hidráulico	0.0127 [m]
$g$	Aceleração Gravitacional	9,81 [m. s <sup>-2</sup> ]
$h$	Entalpia	2442300 [J. kg <sup>-1</sup> ]
$rc$	Raio do poro	$3,17. 10^{-5}[m]$
$\mu_l$	Viscosidade do líquido	$1,206. 10^{-5}[\text{kg. m}^{-1}. \text{s}^{-1}]$
$\mu_v$	Viscosidade do vapor	$100,2. 10^{-5}[\text{kg. m}^{-1}. \text{s}^{-1}]$
$\rho_l$	Massa específica do líquido	998,2 [kg. m <sup>-3</sup> ]
$\rho_v$	Massa específica do vapor	0,595 [kg. m <sup>-3</sup> ]
$\gamma$	Tensão superficial	$71,97. 10^{-3} [\text{N. m}^{-1}]$
$K_{w,cte}$	Permeabilidade constante	$1,43. 10^{-11} [m^2]$

A partir dos parâmetros apresentados na Tab. 1 e do modelo termo hidráulico, iniciou-se a investigação do objetivo do trabalho.

### 3. METODOLOGIA

A partir do modelo termo hidráulico base para resolução do problema original, o qual adotou um evaporador com porosidade constante, desenvolveu-se o estudo dos efeitos da variação da permeabilidade ao longo do elemento poroso.

Primeiramente, definiu-se o grau de variação da porosidade ao longo do evaporador como linear e dependente da espessura do elemento. A Tab. 2 apresenta o compilado de equações que descreve a porosidade ao longo do evaporador.

Tab. 2 - Equações que descrevem a variação linear da porosidade ao longo do elemento em função da espessura ( $x$ ).

Intervalo de Porosidade	Equação de variação
0,3~0,4	$E(x)=0,3 + 5 . x$
0,4~0,5	$E(x)=0,4 + 5 . x$
0,5~0,6	$E(x)=0,5 + 5 . x$
0,6~0,7	$E(x)=0,6 + 5 . x$
0,3~0,5	$E(x)=0,3 + 10 . x$
0,5~0,7	$E(x)=0,5 + 10 . x$
0,3~0,7	$E(x)=0,3 + 20 . x$

A partir das equações apresentadas na Tab. 2, realizou-se uma análise paramétrica da porosidade em função da espessura do meio poroso, que após foi correlacionada à permeabilidade através da Equação Karman-Cozeny. A Tab. 3 apresenta o processo de parametrização da permeabilidade ao longo da espessura para o intervalo de porosidade 0,3~0,7.

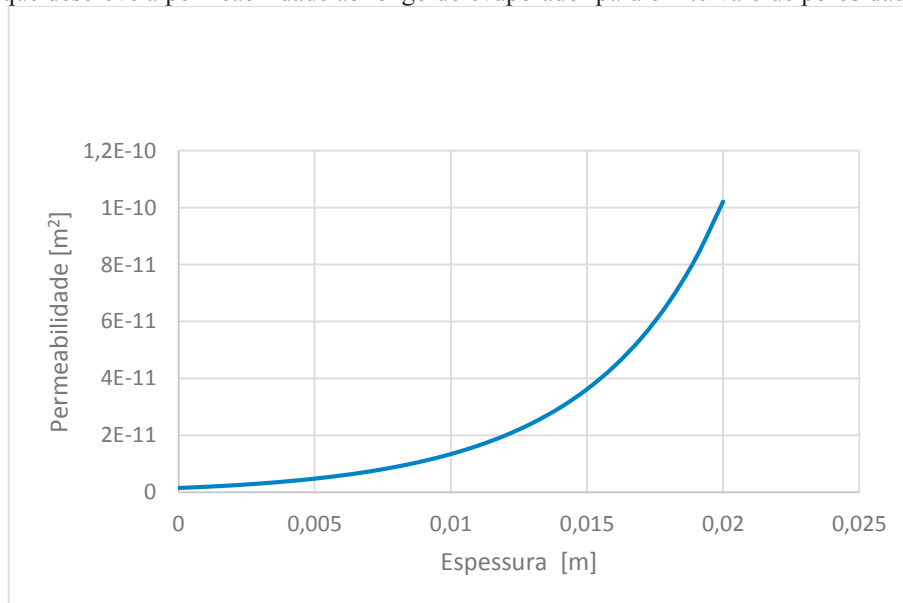
Tab. 3 – Processo de obtenção da permeabilidade ao longo do elemento poroso em função da espessura.

x	Porosidade Local $E(x)=0,3 + 5.x$	Permeabilidade Local Eq.(9)
0	0,3	$1,47657.10^{-12} [m^2]$
0,001	0,32	$1,89898.10^{-12} [m^2]$
0,002	0,34	$2,41789.10^{-12} [m^2]$
0,003	0,36	$3,05235.10^{-12} [m^2]$
0,004	0,38	$3,82520.10^{-12} [m^2]$
0,005	0,4	$4,76392.10^{-12} [m^2]$
0,006	0,42	$5,90173.10^{-12} [m^2]$
0,007	0,44	$7,27896.10^{-12} [m^2]$
0,008	0,46	$8,94485.10^{-12} [m^2]$
0,009	0,48	$1,09598.10^{-11} [m^2]$
0,01	0,5	$1,33985.10^{-11} [m^2]$
0,011	0,52	$1,63537.10^{-11} [m^2]$
0,012	0,54	$1,99413.10^{-11} [m^2]$
0,013	0,56	$2,43078.10^{-11} [m^2]$
0,014	0,58	$2,96396.10^{-11} [m^2]$
0,015	0,6	$3,61760.10^{-11} [m^2]$
0,016	0,62	$4,42278.10^{-11} [m^2]$
0,017	0,64	$5,42029.10^{-11} [m^2]$
0,018	0,66	$6,66440.10^{-11} [m^2]$
0,019	0,68	$8,22837.10^{-11} [m^2]$
0,02	0,7	$1,02127.10^{-10} [m^2]$

A partir da Tab. 3, foi possível construir o gráfico apresentado na Fig. 2.

Um exemplo do resultado da permeabilidade variando ao longo da espessura pode ser visto na Fig. 2, onde apresenta a curva que descreve a permeabilidade ao longo do evaporador para o intervalo de porosidade de 0,3 a 0,7. Os dados obtidos pela Fig. 2 foram ajustados por um polinômio de grau 6.

Fig. 2 – Curva que descreve a permeabilidade ao longo do evaporador para o intervalo de porosidade entre 0,3 a 0,7.



O procedimento para obtenção das funções permeabilidade em função da espessura foi repetido para todos os intervalos de porosidade investigados, o que resultou nos polinômios ajustados apresentados na Tab. 4.

Tab. 4 - Polinômios obtidos pelo ajuste das curvas permeabilidade em função da espessura.

Intervalo de Porosidade	$K_w(x)$
0,3~0,4	$y = 0,0000674488983349875 \cdot x^6 + 0,0000029777957024635 \cdot x^5 + 0,0000004271798275113 \cdot x^4 + 0,0000000377621520720 \cdot x^3 + 0,0000000025115406144 \cdot x^2 + 0,000000000949220928 \cdot x + 0,000000000014765731$
0,4~0,5	$y = 0,0002735926536843180 \cdot x^6 + 0,0000080157860793406 \cdot x^5 + 0,0000012153698776274 \cdot x^4 + 0,0000000942784819102 \cdot x^3 + 0,0000000062047229091 \cdot x^2 + 0,0000000002580436567 \cdot x + 0,000000000047639233$
0,5~0,6	$y = 0,0014542118879035100 \cdot x^6 + 0,0000201920338440686 \cdot x^5 + 0,0000041680090134832 \cdot x^4 + 0,0000002648852746034 \cdot x^3 + 0,0000000160889935749 \cdot x^2 + 0,0000000006699128628 \cdot x + 0,0000000000133985354$
0,6~0,7	$y = 0,0116790514439344000 \cdot x^6 - 0,0000235679763136432 \cdot x^5 + 0,0000196099099412095 \cdot x^4 + 0,0000008853739892345 \cdot x^3 + 0,0000000472115723182 \cdot x^2 + 0,0000000018086632760 \cdot x + 0,0000000000361760610$
0,3~0,5	$y = 0,0089569992269389300 \cdot x^6 - 0,0001055785469361580 \cdot x^5 + 0,0000101820410236542 \cdot x^4 + 0,0000002758425838856 \cdot x^3 + 0,0000000101406134583 \cdot x^2 + 0,0000000001897205075 \cdot x + 0,0000000000014765921$
0,5~0,7	$y = 0,2811330289114270000 \cdot x^6 - 0,0076840952096972600 \cdot x^5 + 0,0002083461031361370 \cdot x^4 + 0,0000009882583178467 \cdot x^3 + 0,0000000684860300831 \cdot x^2 + 0,0000000013343441210 \cdot x + 0,0000000000133993961$
0,3~0,7	$y = 3,8323751005809700000 \cdot x^6 - 0,1541354413348020000 \cdot x^5 + 0,0028241173813512400 \cdot x^4 - 0,0000197231458614056 \cdot x^3 + 0,0000001228582045404 \cdot x^2 + 0,0000000002675403770 \cdot x + 0,0000000000014948391$

A partir das funções de permeabilidade  $K_w(x)$  apresentados na Tab. 4, realizou-se a integração numérica de cada uma das funções através do Método dos Trapézios com os parâmetros indicados abaixo:

$$\int_0^{0,02} \frac{1}{K_w(x)} dx \quad (20)$$

Os resultados das integrais numéricas para cada um dos intervalos avaliados estão apresentados na Tab. 5.

Tab. 5 - Resultados das integrais numéricas para os intervalos de porosidade estudados.

Intervalo de Porosidade	$\int_0^{0,02} \frac{1}{K_w(x)} dx$
0,3~0,4	$7,848403547711539 \cdot 10^9$
0,4~0,5	$2,598370613847593 \cdot 10^9$
0,5~0,6	$9,461185000485812 \cdot 10^8$
0,6~0,7	$3,466120510335911 \cdot 10^8$
0,3~0,5	$5,223395992429532 \cdot 10^9$
0,5~0,7	$6,463700905344838 \cdot 10^8$
0,3~0,7	$2,942949373173306 \cdot 10^9$

A partir dos resultados da Tab. 5, utilizou-se o modelo termo hidráulico para substituir o valor da integral numérica obtida para o respectivo intervalo na Eq.(8), deduzida a partir da Lei de Darcy para a perda de carga do evaporador e na Eq.(19) que caracteriza a potência máxima do sistema.

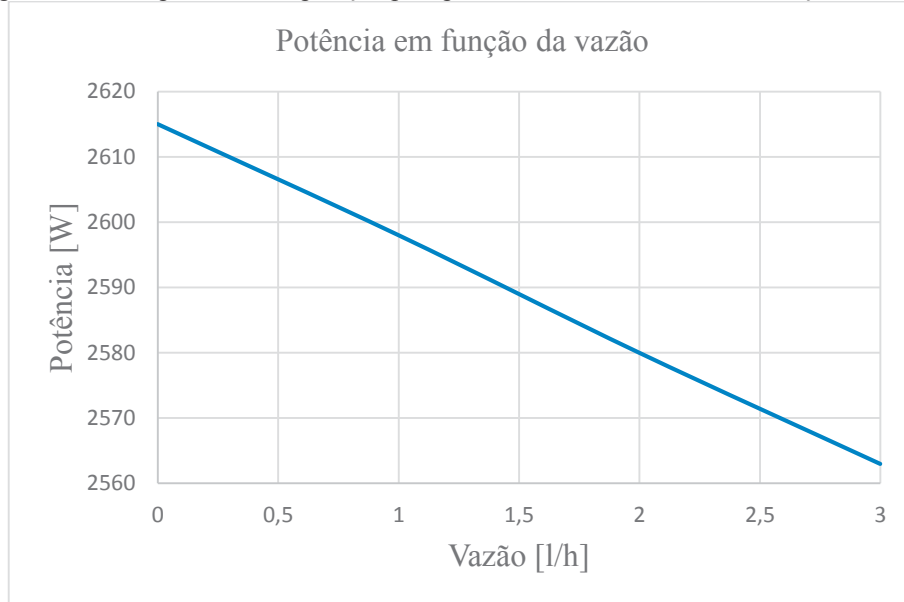
#### 4. RESULTADOS

Primeiramente, foi realizada a validação do modelo utilizado através da repetição do experimento de Margaris *et al.* (2007), para que a investigação dos efeitos da porosidade variável se iniciasse. A

permeabilidade adotada pelo estudo original é de  $1,43 \cdot 10^{-11} \text{ [m}^2\text{]}$ , constante ao longo do evaporador.

A Fig. 3 apresenta a repetição dos dados de potência  $P_e$  do experimento de Margaris *et al.* (2007), para permeabilidade constante.

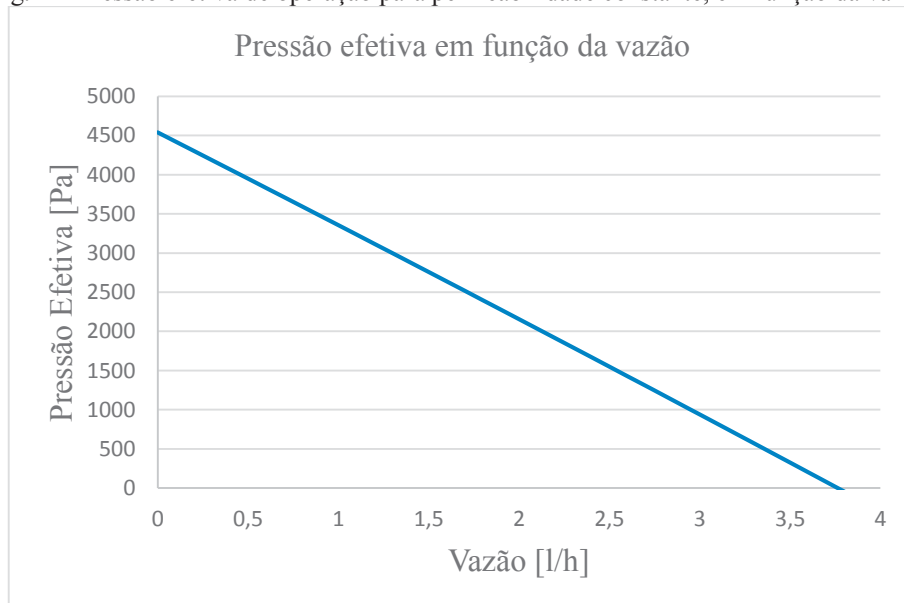
Fig. 3 – Máxima potência de operação para permeabilidade constante, em função da vazão.



O resultado obtido na repetição do experimento através do modelo utilizado apresentou alto grau de semelhança com os dados obtidos por Margaris *et al.* (2007) em seu artigo.

A Fig. 4 apresenta a repetição dos dados de pressão efetiva  $D_{p,eff}$  do experimento de Margaris *et al.* (2007), para permeabilidade constante.

Fig. 4 – Pressão efetiva de operação para permeabilidade constante, em função da vazão.



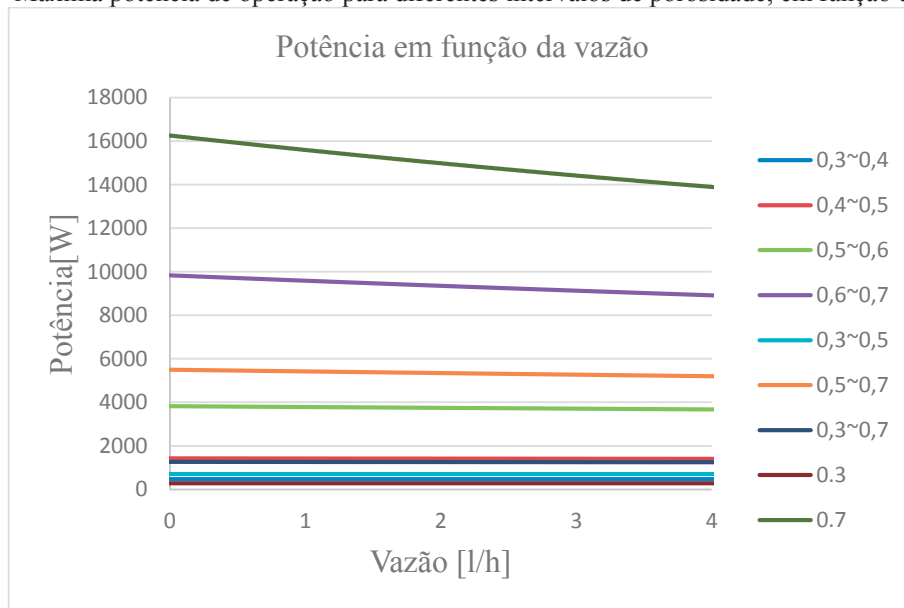
O resultado obtido na repetição do experimento através do modelo utilizado apresentou alto grau de semelhança com os dados obtidos por Margaris *et al.* (2007) em seu artigo.

Os dados que foram apresentados nas Fig. 3 e Fig. 4 demonstraram a reprodução com sucesso dos resultados obtidos por Margaris *et al.* (2007) em seu artigo, validando o modelo utilizado para os cálculos neste trabalho.

#### 4.1 POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA VAZÃO VOLUMÉTRICA

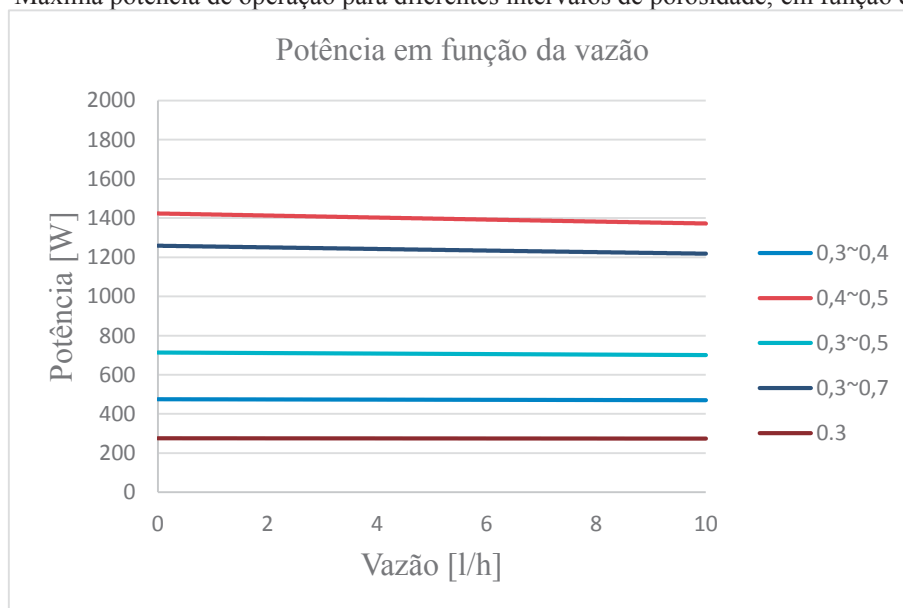
A partir dos resultados das integrais numéricas obtidas da Eq.(8) para um meio poroso de área constante e porosidade variável, aplicados ao modelo matemático, obteve-se os seguintes dados, apresentados na Fig. 5, para a máxima potência do sistema sob diferentes intervalos de porosidade.

Fig. 5 – Máxima potência de operação para diferentes intervalos de porosidade, em função da vazão.



A Fig. 6 mostra em detalhes a faixa de potência de 0 a 2 kPa presente na Fig. 5.

Fig. 6 – Máxima potência de operação para diferentes intervalos de porosidade, em função da vazão.



De acordo com os dados apresentados na Fig. 5 e Fig. 6, grandes variações de porosidade não geraram um desempenho benéfico ao sistema CPL, como pôde ser observado nos dados da curva

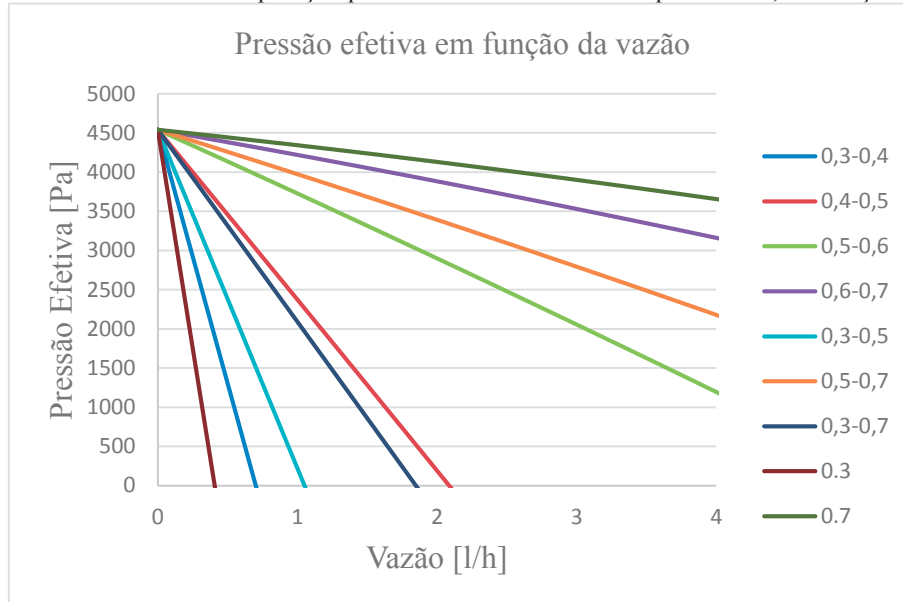
0,3~0,7; o qual desempenhou taxas de remoção de calor inferiores se comparado com intervalos de variação menores, mas com porosidades maiores, como em 0,5~0,6 e 0,6~0,7.

Ao analisar as Fig. 5 e Fig. 6, conforme os níveis inferiores de porosidade analisados foram incrementados, a quantidade de calor removido pelo CPL aumentou rapidamente, demonstrando que porosidades maiores ao longo do evaporador, como 0,5~0,6 e 0,6~0,7; são mais interessantes do ponto de vista termo-hidráulico, frente à grandes variações no intervalo de porosidade ao longo do corpo, como visto na Fig. 5 para o intervalo 0,3~0,7.

#### 4.2 PRESSÃO EFETIVA EM FUNÇÃO DA VAZÃO VOLUMÉTRICA

A partir dos resultados das integrais numéricas obtidas da Eq.(8) para um meio poroso de área constante e porosidade variável, aplicados ao modelo matemático, obteve-se os seguintes dados, apresentados na Fig. 7, para a pressão efetiva do sistema sob diferentes intervalos de porosidade.

Fig. 7 – Pressão efetiva de operação para diferentes intervalos de porosidade, em função da vazão.



A partir da Fig. 7, observou-se que independentemente do intervalo de porosidade analisado, todas as situações partiram da pressão efetiva de 4500 Pa, valor governado pela tensão superficial da água obtido da equação de Young-Laplace (Eq.(2)) aplicada à um elemento poroso de raio  $3,17 \cdot 10^{-5}$  [m], na situação de vazão volumétrica zero e consequente perda de carga nula.

Para pressões efetivas inferiores a 0 Pa, o sistema é considerado inoperante.

Para baixas porosidades o sistema rapidamente se torna inoperante em pequenas vazões, o que equivale a pequenas potências (Eq.16). Para altas porosidades o sistema é capaz de operar a altas vazões e potência.

Sendo assim, a partir da Fig. 7, notou-se que a porosidade é a propriedade que governa o sistema.

Na Fig. 7 nota-se que grandes variações de porosidade, como 0,3~0,7; não geraram grandes pressões efetivas, se comparado com variações menores, mas de porosidades maiores, como 0,5~0,6 e 0,6~0,7. Sendo assim, para maiores variações de porosidade, o sistema operou em vazões menores.

#### 4.3 PERDA DE CARGA NO EVAPORADOR POROSO EM FUNÇÃO DA VAZÃO

A partir dos resultados das integrais numéricas obtidas da Eq.(8) para um meio poroso de área constante e porosidade variável, aplicados ao modelo matemático, obteve-se os seguintes dados,



apresentados na Fig. 8, para a perda de carga do evaporador poroso sob diferentes intervalos de porosidade.

Fig. 8 – Perda de carga no evaporador poroso para diferentes intervalos de porosidade, em função da vazão.



A partir da Fig. 8, observou-se que a perda de carga no elemento poroso do sistema é dominante sobre a perda de carga total, quando comparada com os dados da Fig. 7.

De acordo com os dados apresentados na Fig. 8, grandes variações de porosidade não geraram um desempenho benéfico ao sistema CPL, ocasionando em grandes perdas de carga, como pôde ser observado nos dados da curva 0,3~0,7.

Ao comparar as os dados gerados pela variação de porosidade de 0,3~0,7 com as variações de 0,5~0,6 e 0,6~0,7, verificou-se que conforme os níveis inferiores de porosidade aumentaram, a perda de carga no elemento poroso diminuiu rapidamente. Verificou-se que maiores níveis de porosidade ao longo do corpo poroso são mais interessantes do ponto de vista termo-hidráulico, frente à grandes variações ao longo do evaporador.

## 5. CONCLUSÃO

A partir dos dados levantados ao longo do trabalho, concluiu-se que a aplicação de grandes variações de porosidade em elementos porosos que atuam como bombas capilares não gerou incrementos na performance térmica e hidráulica do sistema, preferindo-se a aplicação de maiores porosidades ao longo do evaporador.

Foi constatado que a porosidade é a propriedade que governa o sistema. A perda de carga no evaporador se mostrou muito dependente dessa propriedade, sendo ela dominante sobre a perda de carga total do sistema. Dessa forma, pequenos valores de porosidade levaram o sistema rapidamente à inoperância. Em contrapartida, maiores valores de porosidade propiciaram grandes vazões e altas taxas de remoção de calor.

Ficou demonstrado que a tensão superficial, propriedade do fluido de trabalho, também exerce papel importante sobre o desempenho do sistema CPL, atuando como fator limitante para a pressão efetiva desenvolvida.

Como sugestão de trabalhos futuros, indica-se o estudo de fluidos de trabalho com melhores propriedades de tensão superficial, para utilização em sistemas CPL.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ACCORINTI, Flavio; AYEL, Vincent; BERTIN, Yves. Steady-state analysis of a Capillary Pumped Loop for Terrestrial Application with methanol and ethanol as working fluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 137, p. 571–583, 2019.

BERTI, Lucas F; RAMBO, Carlos R; REIMBRECHT, Eduardo G. Produção e caracterização de elementos porosos cerâmicos para evaporadores capilares. **São Paulo**, v. 6, n. 1, p. 9, 2008.

BOUBAKER, Riadh; PLATEL, Vincent. Dynamic model of capillary pumped loop with unsaturated porous wick for terrestrial application. **Energy**, v. 111, p. 402–413, 2016.

CHEN, Xianping; YE, Huaiyu; FAN, Xuejun. A review of small heat pipes. 2016.

ESARTE, Jesús; BLANCO, Jesús M.; BERNARDINI, Angela. Performance Assessment of a Three-Dimensional Printed Porous Media Produced by Selective Laser Melting Technology for the Optimization of Loop Heat Pipe Wicks. **Applied Sciences**, v. 9, n. 14, p. 2905, 2019.

JOUNG, Wukchul; LEE, Jinho; LEE, Sanghyun. Derivation and Validation of a Figure of Merit for Loop Heat Pipes With Medium Temperature Working Fluids. **Journal of Heat Transfer**, v. 138, n. 5, p. 052901, 2016.

MAIDANIK, Yury F.; FERSHTATER, Yury G.; SOLODOVNIK, Nikolay N. Loop Heat Pipes: Design, Investigation, Prospects of Use in Aerospace Technics. *In*: [s.l.: s.n.], 1994, p. 941185. Disponível em: <<https://www.sae.org/content/941185/>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

MARGARIS, Dionissios P.; DIAMANTIS, Zisis G.; PHOTEINOS, Dionysios I. Performance of heat pipes as capillary pumps: modelling and comparison with experimental results. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 2, n. 2, p. 149–161, 2007.

RIEHL, Roger R. Comparing the Behavior of a Loop Heat Pipe With Different Elevations of the Capillary Evaporator. *In*: [s.l.: s.n.], 2004, p. 2004-01–2510. Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2004-01-2510/>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

WANG, Chin-Tsan; LEU, Tzong-Shyng; LAI, Tsai-Ming. Micro capillary pumped loop system for a cooling high power device. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 32, n. 5, p. 1090–1095, 2008.

## NOMENCLATURA

$A_w$	Área do meio poroso	$[m^2]$
$d$	Diâmetro hidráulico	$[m]$
$E$	Porosidade	$[-]$
$f$	Fator de atrito	$[-]$
$g$	Aceleração Gravitacional	$[m \cdot s^{-2}]$
$h$	Altura Relativa	$[m]$
$h_{l,v}$	Entalpia de troca de fase	$[J \cdot kg^{-1}]$
$K_w$	Permeabilidade do meio poroso	$[m^2]$
$\dot{m}$	Vazão Mássica	$[kg \cdot s^{-1}]$
$P_e$	Máxima potência do sistema	$[W]$
$Q$	Vazão volumétrica	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Re$	Numero de Reynolds	$[-]$
$rc$	Raio do poro	$[m]$
$u$	Velocidade	$[m \cdot s^{-1}]$
$\mu$	Viscosidade	$[kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$
$\rho$	Massa específica	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\gamma$	Tensão Superficial	$[N \cdot m^{-1}]$
$D_p$	Perda de carga	$[Pa]$
$L_w$	Comprimento do meio poroso	$[m]$
$L_l$	Comprimento da linha de líquido	$[m]$
$L_v$	Comprimento da linha de vapor	$[m]$
<i>Subscritos</i>		
$b$	Empuxo	
$c$	Capilar	
$cd$	Condensador	
$w$	Evaporador	
$eff$	Efetiva	
$h$	Hidráulico	
$l$	Fase líquida	
$max$	Máxima	
$v$	Fase vapor	
$cte$	Constante	