2011 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011
Belo Horizonte,MG, Brazil, October 24-28, 2011
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR - ABEN
ISBN: **978-85-99141-04-5**

ANALISE EXPERIMENTAL DO FENÔMENO DE CIRCULAÇÃO NATURAL NO SISTEMA MONOFÁSICO

Thiago A. dos Santos[1],Giovanni Laranjo de Stefanni[1] ,Thadeu das Neves Conti[1]

1

[1] Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)
Av. Professor Lineu Prestes 2242
05508-000 São Paulo, SP
tsantos@ipen.br
gstefanni@ipen.br
tnconti@ipen.br

RESUMO

O presente trabalho visa estudar a fenomenologia da circulação natural, que nada mais é do que a circulação do fluído sem auxilio de qualquer dispositivo mecânico. Esta circulação surge por causa da diferença de densidade entre a fonte quente e a fonte fria (sistema de remoção de calor). Com o auxilio do circuito de circulação natural do Centro de Engenharia Nuclear (CEN/ IPEN – SP). Através deste aparelho é possível estudar o fenômeno acima. Este faz o fluído circular por canos, que o conduzem a fonte quente e a fria sendo assim muito útil para este estudo. Uma das possíveis aplicações deste estudo seria uma nova forma de refrigerar reatores nucleares, pratica que é fundamental para a sua manutenção e, sobretudo, sua segurança. Para este estudo, foi feito um balanço térmico no circuito, que consiste em uma forma de avaliar o comportamento do circuito, observando se não existem perdas demasiadas de energia. O balanço foi feito apenas para valores de potência considerados pequenos (até 4000 W) onde o fluído está no estado monofásico, ou seja, quando o fluído tem apenas um estado físico. Esta metodologia é muito importante e muito para a avaliação do equipamento determinando assim se a energia é conservada para desta forma poder se trabalhar com um sistema mais complexo como bifásico.

1. INTRODUÇÃO

A Circulação natural de um fluído consiste em sua circulação sem auxilio de qualquer dispositivo mecânico. Esse fenômeno ocorre graças à diferença de densidades, geralmente relacionada com a variação de temperatura de certos pontos de um fluído.

Para acontecer tal fenômeno, três condições devem ser respeitadas e mantidas:

1. Existir diferença de temperatura
2. A fonte quente tem que estar numa parte mais baixa do que a fonte fria
3. Os fluídos têm que estar em contato uns com os outros.

Podemos ver na figura 1 um circuito fechado que mostra o funcionamento da circulação natural. Neste circuito há uma fonte quente na parte inferior e uma fonte fria na parte diagonal superior, a fonte quente causa a diminuição da densidade do fluído, fazendo com que o fluído suba e a fonte fria provoca exatamente o processo inverso. O equilíbrio hidrostático entre os ramais verticais do circuito é desfeito, o que gera uma vazão no sentido horário.

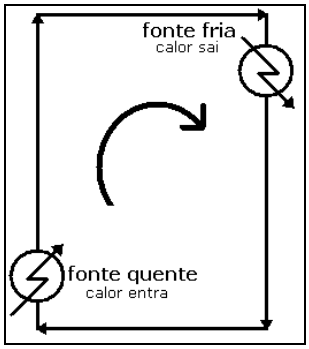

Figura 1. Circuito fechado onde há o fenômeno de circulação natural.

As aplicações da circulação natural são inúmeras e vão desde a remoção de calor em reatores nucleares, o aquecimento de água em placas coletoras de energia solar, a dissipação de calor em processos químicos, o resfriamento de dispositivos eletrônicos até o setor ambiental (movimentos do oceano e da atmosfera).

No fenômeno da circulação natural, o fluido pode se comportar de diversas maneiras e estar em diversas fases. No CCN, o fluido pode se comportar de maneira monofásica ou bifásica. No regime monofásico o fluído está apenas em um estado (quando se utiliza água, no estado liquido, por exemplo). No regime bifásico, existem dois estados no mesmo fluido (liquido – sólido líquido – gás ou até sólido – gás). Este trabalho é um primeiro estudo através de um regime monofásico, por ser uma abordagem mais simples, para se chegar em um sistema mais complexo futuramente com varias aplicações como sistemas de resfriamento de reatores nucleares.

1.1. Circuito de Circulação natural (CCN – IPEN/POLI)

Em um reator nuclear, existem circuitos de circulação de fluído cuja função é a de estabilizar sua temperatura e resfria-lo. Esta circulação se dá através de um sistema forçado. Ou seja, existem bombas e diversas maquinas que movem o fluido quente para a fonte fria, forçando-o a trocar calor.

Porém, se algo impedir o funcionamento desses equipamentos como uma queda de energia, uma quebra no equipamento, uma interferência humana ou mesmo um desastre natural como o ocorrido em Fukushima, não haveria nada para impedir o aquecimento do reator e isso poderia provocar graves acidentes. Por este motivo, em projeto de reatores atuais (geração 3, 3+ e futuramente o 4), utiliza-se um circuito que o fluido se mova naturalmente, com o auxilio do fenômeno de circulação natural. Assim, o circuito tradicional seria substituído pelo de circulação natural minimizando muitos dos acidentes envolvendo aquecimento por acidentes, desastres ou falhas mecânicas.

No Centro de engenharia nuclear do Instituto de pesquisas energéticas e nucleares (CEN/IPEN) existe um modelo do circuito de circulação natural que foi emprestado pelo departamento de engenharia da escola politécnica da universidade de São Paulo (CCN – IPEN/POLI).

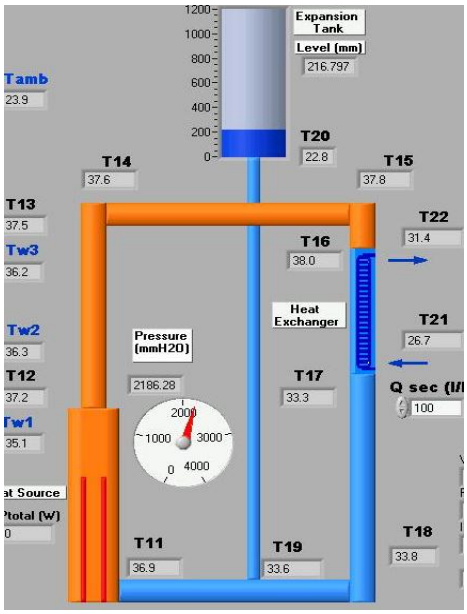

Figura 2. Esquema do CCN – IPEN/ POLI

Na figura acima podemos ver um esquema do CCN. Ele é um retângulo formado por tubos e equipamentos em vidro Pyrex da Corning, com 2,6 m de altura e 0,85 m de largura. A fonte quente é um aquecedor elétrico situado na parte inferior da seção vertical do circuito. A fonte fria é um trocador de calor com espiras helicoidais e encontra-se na parte superior da seção vertical oposta a do aquecedor. O volume total de água no circuito, incluindo tanque de expansão e linha de surto é de, aproximadamente, 12 litros. O tanque de expansão, previsto para absorver as variações de densidade do fluido no circuito é conectado em um ponto intermediário da seção horizontal inferior. O bocal superior do tanque de expansão permanece aberto, mantendo o circuito a uma pressão próxima à pressão ambiente. O circuito não possui isolamento térmico, a menos da base do aquecedor, possibilitando assim a visualização do escoamento.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho baseou-se em análises de dados obtidos através de testes feitos com outros técnicos. Com tais dados, foi possível criar condições de realizar os cálculos de balanço térmico. Inicialmente foi realizado um estudo teórico sobre a parte de circulação natural e de regimes de escoamento, mais especificamente o regime monofásico.

2.1. Balanço Térmico

O balanço térmico, ou balanço energético é uma forma de se avaliar as condições do Circuito consistindo em verificar se a energia é conservada (considerando as perdas). O balanço é feito tanto no aquecedor, quanto no trocador. Existem duas formas para o calculo: Utilizando o calor específico ou utilizando a entalpia, dadas pelas expressões a seguir (no apêndice tem-se a descrição de cada constante e símbolo utilizado):

$$Q = mc\Delta T \tag{1}$$

$$Q = m\Delta H \tag{2}$$

Os cálculos são feitos para cada potência, com os respectivos valores das temperaturas de cada um dos termopares. Além disso, a vazão volumétrica é mantida constante com o valor de 100 L/h.

O primeiro passo do balanço é o de justamente fazer a conversão da vazão volumétrica para vazão mássica. Para isso utiliza-se a equação

$$\overline{M} = \overline{V}\rho \tag{3}$$

Onde a densidade (ρ) é determinada através de tabelas termodinâmicas.

Para o calculo do balanço térmico foram utilizadas as expressões (1) e (2) separadamente, cujos resultados são mostrados no item 3 que se refere a analise de dados.

2.1.1. Balanço térmico a partir do calor específico

Com o valor da vazão volumétrica convertido na vazão mássica do circuito secundário os cálculos para o trocador e o aquecedor são dados respectivamente por:

$$\overline{M_P} c_P \left(T_{16} - T_{17}\right) = \overline{M_S} c_S \left(T_{22} - T_{21}\right) + hD_T L_T \pi (T_{W3} - T_{AMB}) \tag{4}$$

$$P_A = \overline{M_P} c_P (T_{11} - T_{12}) + h\pi L_A D_A (T_{W1} - T_{AMB}) \quad (5)$$

Com (4) é determinada a vazão mássica no circuito primário e a utilizando em (5) determina-se o valor da potência do aquecedor, assim concluindo o balanço térmico. O valor do calor específico para cada parte do circuito (primário e secundário) é retirado de tabelas termodinâmicas com base no valor das temperaturas [2].

2.1.2. Balanço térmico a partir da entalpia

Apesar das equações serem diferentes, a metodologia é bem similar e até mais simples que a anterior. Neste caso as temperaturas são utilizadas para a determinação de cada entalpia, também através de tabelas termodinâmicas. Da mesma forma, temos:

$$\overline{M_P}\Delta H_1 = \overline{M_S}\Delta H_2 + hD_T L_T \pi (T_{W3} - T_{AMB}) \quad (6)$$

$$P_A = \overline{M_P}\Delta H_2 + hD_A L_A \pi (T_{W1} - T_{AMB}) \quad (7)$$

A equação (6) é referente ao trocador e a equação (7) é referente ao aquecedor. Os valores de $\Delta H_1, \Delta H_2$ são determinados com base nos gradientes de temperaturas $(T_{16} - T_{17}), (T_{11} - T_{12})$, respectivamente.

Assim como no item 3.1, é utilizada a equação (6), do trocador, inicialmente para a determinação da vazão mássica no circuito primário e em seguida utilizando a equação (7), que a equação do aquecedor, encontra-se o valor da potencia deste, concluindo também o balanço térmico.

2.2. Coeficiente global de troca

O coeficiente global de troca avalia o quanto é trocado de energia entre um determinado fluído e o ambiente. Geralmente é utilizado em trocadores de calor, e por isso o utilizamos para fazer uma avaliação mais precisa do trocador de calor do circuito de circulação natural.

O coeficiente global de troca é dado pela expressão:

$$U = \frac{Q_{EF}}{A\Delta T} \quad (8)$$

Onde:

$$\Delta T = \frac{(T17 - T21) - (T16 - T22)}{Ln\left(\frac{T17 - T21}{T16 - T22}\right)} \quad (9)$$

2.3. Condutividade térmica

A Condutividade térmica é uma grandeza física que indica a capacidade de um corpo conduzir calor. Permite distinguir os bons e maus condutores de calor.
Pode-se determinar a condutividade térmica a partir da expressão:

$$K = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (10)$$

3. RESULTADOS E ANÁLISE

3.1 Resultados do balanço térmico a partir do calor específico.

A partir da metodologia descrita no item 3.1, foi feito o balanço térmico do CCN para potências entre 1000 W e 4500 W, variando esta potencia a cada 500 W. A tabela 1 mostra os resultados para este balanço.

Tabela 1. Valores do balanço térmico utilizando o calor específico

Potência (w)	Potência efetiva (W)	$\overline{M_S}$ (kg/s)	$\overline{M_p}$ (kg/s)	Pa (W)	Erro (%)
1000	943,435514	0,027686412	0,0367	812,0367	13,9277
1500	1432,353526	0,027683615	0,044054	1251,245	12,64415
2000	1943,258176	0,027682541	0,048878	1716,465	11,67078
2500	2411,155215	0,02767807	0,053937	2038,792	15,44334
3000	2730,399277	0,027707107	0,057805	2459,829	9,909543
3500	3317,574847	0,027678872	0,060071	2881,09	13,15673
4000	3725,45739	0,027702812	0,061473	3207,024	13,91598
4500	4152,432317	0,027705336	0,065679	3847,269	7,349037

O erro foi avaliado com base na potência efetiva, medida por um multímetro.

3.2 Resultados do balanço térmico a partir da entalpia.

Seguindo o mesmo procedimento do item anterior, porém utilizando as equações (6) e (7), foram obtidos os mesmos dados.

Tabela 2. Valores do balanço térmico utilizando a entalpia.

Potência (w)	Potência efetiva (W)	$\overline{M_S}$ (kg/s)	$\overline{M_p}$ (kg/s)	Pa (W)	Erro (%)
1000	943,435514	0,036699	0,027686412	814,7138	13,64393
1500	1432,353526	0,044053	0,027683615	1286,497	10,183
2000	1943,258176	0,048877	0,027682541	1721,809	11,39579
2500	2411,155215	0,053949	0,02767807	2047,436	15,08485
3000	2730,399277	0,057818	0,027707107	2470,268	9,527234
3500	3317,574847	0,060071	0,027678872	2892,644	12,80849
4000	3725,45739	0,061487	0,027702812	3220,655	13,55007
4500	4152,432317	0,065695	0,027705336	3863,636	6,954861

Da mesma forma que o item anterior, os valores da potência efetiva foram determinados com o auxilio de um multímetro.

3.3 Resultados da análise do coeficiente global de troca do trocador de calor do CCN.

Com base nos resultados, obteve-se o gráfico (1) utilizado para a determinação do coeficiente global de troca do trocador de calor do CCN. Nota: para esta primeira aproximação não foram levado em conta as incertezas por se tratar de apenas uma avaliação prévia do funcionamento do CCN.

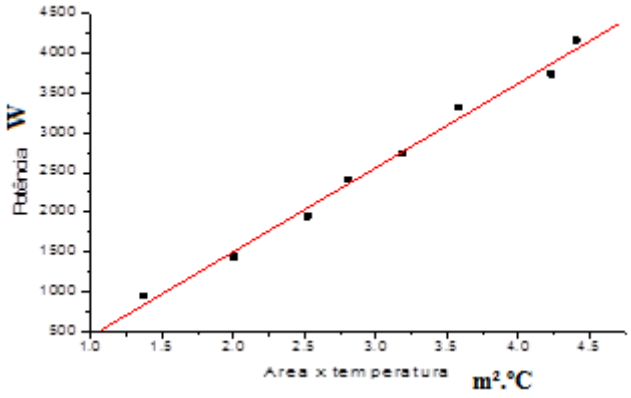

Gráfico 1. Determinação do coeficiente global de troca

Com base no Grafico 1 , foi feito um ajuste línear e a função obtida foi

$$Q(T) = (1057{,}19 \pm 42{,}30)T - 609{,}17 \pm 134{,}34 \qquad (11)$$

3.4 Resultados da análise da condutividade térmica do aquecedor do CCN.

Seguindo procedimento semelhante ao item anterior, foi determinado a função para a Condutividade térmica em função da temperatura.

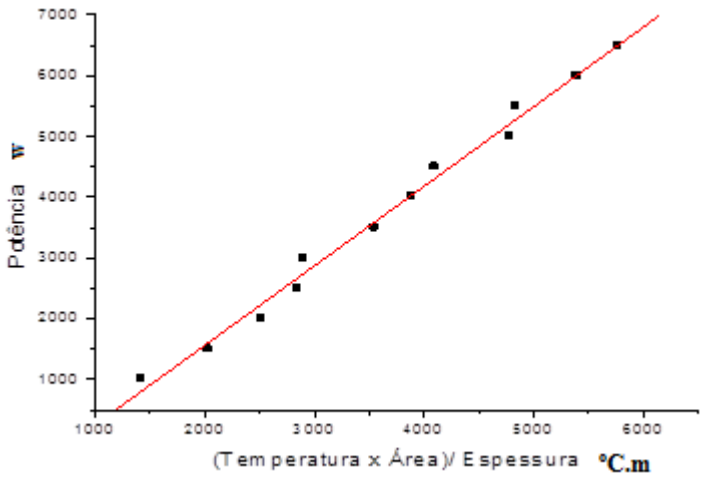

Gráfico 2. Análise da Condutividade Térmica

A partir do gráfico 2 , foi obtido a função abaixo:

$$F(T) = (-1054{,}36 \pm 159{,}43)T + 1{,}30 \pm 0{,}04 \qquad (12)$$

4. CONCLUSÕES

Foi possível verificar a fenomenologia da circulação natural, mais especificamente no escoamento monofásico, conseguindo avaliar em um primeiro estudo as ferramentas teóricas.

Tendo feito o balanço térmico utilizando os dois métodos citados acima, foi possível observar que os valores dos erros experimentais estão dentro de uma margem aceitável em vista de se tratar de uma primeira aproximação para a verificação da teoria envolvida (menores que 15%) o que mostra que o circuito está funcionando de maneira adequada dentro desta faixa de potência.

Além disso, como os dois métodos apresentaram resultados muito próximos, indicando que os dois métodos têm a mesma eficiência. Desta forma qualquer um dos métodos pode ser utilizado em um balanço térmico como este.

Os estudos posteriores, que se referem à determinação de coeficientes para o trocador de calor e para o aquecedor podem ser uteis para avaliações futuras do circuito, já que com as funções previamente calculadas, eles podem ser utilizados em simulações que otimizem os cálculos do circuito.

AGRADECIMENTOS

Ao CEN (Centro de Engenharia Nuclear) ao CNEN e ao CNPq cujas colaborações foram vitais para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. Bastos, J. L. F. e Rocha, R. T.V, Desenvolvimento de um Programa para a Modelagem do Fenômeno de Circulação Natural em Reatores Nucleares, IV General Congress on Nuclear Energy, p. 107-111, Abril 1992

2. Kern, D. Q., "Processos de Transmissão de Calor", LTC, 1980

3. Damy, O.L.A, Análise experimental do fenômeno de circulação natural, Relatório SemestraI de iniciação cientifica (IPEN/CNEN-SP) – 2007

4. Department on Energy of U.S.A , Doe Fundamentals Handbook – Thermodynamics, heat transfer and fluid flow – Vol 3
5. Santos, T.A. e Conti, T.N Análise Experimental do Circuito de Circulação Natural – Relatório de Iniciação Científica – IPEN/ CNEN – SP

APENDICE I - NOMENCLATURA E CONSTANTES UTILIZADAS

Símbolos

Q - Quantidade de Calor;

m - Massa;

$\overline{V}$ - Vazão Volumétrica;

$\overline{M}$ - Vazão Mássica;

T - Temperatura;

H - Entalpia;

c - Calor específico;

h - Constante térmica;

D - Diâmetro;

L - Comprimento;

ρ - Densidade;

Subscritos

p - Circuito primário;

s - Circuito secundário;

A - Aquecedor;

T - Trocador;

AMB - Ambiente;

11 – Termostato 11;

12 – Termostato 12;

16 – Termostato 16;

17 – Termostato 17;

21 – Termostato 21;

22 – Termostato 22;

W1 – Termostato W1;

W3 – Termostato W3;

Constantes utilizadas.

T_{AMB} = 25ºC

$h = 5 \frac{W}{m^2 C}$

D_A = 0,0768 m

L_A = 0,773 m

D_T =0,0565 m

L_T =0,61 m

$\rho = 90 \frac{L}{h}$