



## ESTUDO DE VIABILIDADE DA MODIFICAÇÃO DOS FEIXES TUBULARES DOS MANCAIS GUIAS DAS TURBINAS

João Maria Marra

Rodrigo Vivarelli

Itaipu Binacional

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Brasil

Brasil

### Resumo

Os trocadores de calor do MGT apresentam uma forte retenção de *bio-fouling* e de cascas do mexilhão dourado nas extremidades do feixe tubular. Um dos fatores responsável por este fenômeno é proporcionado pelo pequeno diâmetro interno adotado para os tubos destes trocadores. O convívio com este fenômeno obriga a necessidade de uma limpeza anual nestes trocadores, porém não elimina o risco de falhas ou defeitos decorrentes da obstrução parcial ou total dos trocadores.

O trabalho mostra o estudo da viabilidade da alteração do feixe tubular destes trocadores por tubos de maior diâmetro, mantendo-se o mesmo casco. Pretende-se com esta modificação reduzir a retenção de sujeira (*bio-fouling*) e de cascas do Mexilhão Dourado junto aos espelhos, as quais interferem no rendimento do trocador, e consequentemente, na temperatura de saída do fluido resfriado, o óleo.

O trabalho ressalta a apresentação da modelagem térmica e geométrica utilizadas na estudo feito e os resultados obtidos, os quais embasaram a viabilidade da modificação pretendida e proporcionaram a aquisição de um conjunto de feixes tubulares protótipos.

### Palavra-Chave

Feixe tubular, Trocador de calor, Modelagem térmica, Bio-fouling

## 1. INTRODUÇÃO

Trocador de calor é um dispositivo usado para realizar o processo da troca térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas, sendo comum em muitas aplicações da Engenharia. No caso do sistema de troca de calor do mancal da turbina é utilizado para resfriamento do óleo lubrificante.

O sistema de troca de calor do mancal guia das turbinas é composto de 4 trocadores de calor Água-Óleo, que retiram o calor gerado pelo atrito fluido-dinâmico do escoamento do óleo em todo o circuito hidráulico do óleo lubrificante. Essa troca de calor é fundamental para o bom funcionamento do mancal, mantendo a temperatura do mancal, óleo e metais, em níveis aceitáveis ou pré-estabelecidos.

Os trocadores em questão são classificados como trocadores Casco/Tubo. Portanto, são de contato indireto, onde os fluídos permanecem separados e o calor é transferido continuamente através de uma parede, pela qual se realiza a transferência de calor. No caso, a água passa pelo interior dos tubos e o óleo pelo casco.

O sistema de troca de calor do mancal da turbina encontra-se prejudicado devido à retenção, nas tampas de seus trocadores de calor, de cascas de Mexilhão Dourado mortos, barro, fibras orgânicas (*bio-fouling*) e de larvas do Mexilhão Dourado, as quais encontram neste substrato um ambiente propício para o seu desenvolvimento até a fase adulta e cujo resultado final é a obstrução parcial ou total da passagem de água nos tubos, conforme Figura 1.

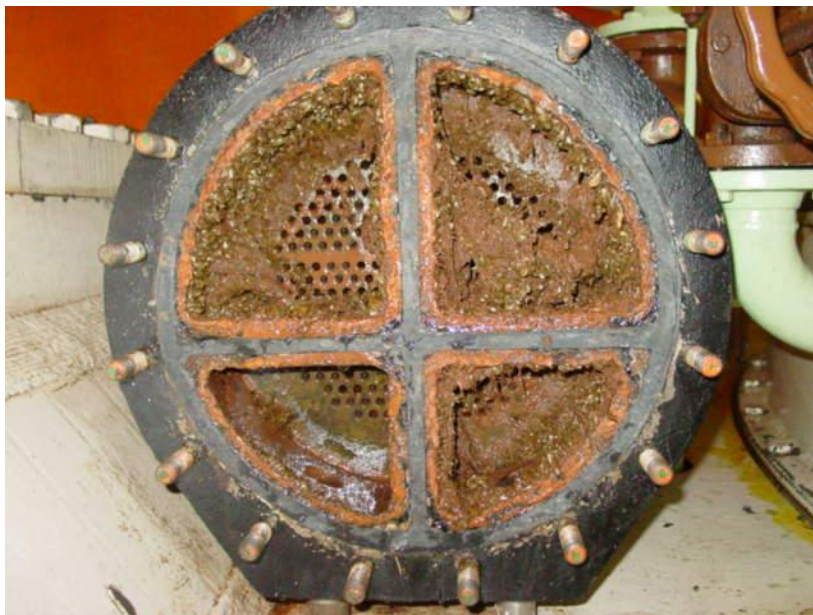


Figura 1: Retenção de fibras e Mexilhão Dourado no trocador de calor

As cascas de Mexilhões Mortos são basicamente provenientes do coletor geral, que é utilizado extraordinariamente para alimentação dos circuitos de resfriamento da unidade geradora na fase final de um Plano de Desligamento periódico. Nesta situação, o conduto forçado ainda está vazio e a alimentação via filtro Cuno-Flo fica impossibilitada através deste. Assim sendo, como o coletor geral encontra-se infestado de mexilhões vivos e mortos, é arrastada grande quantidade de cascas de mexilhões mortos durante a fase inicial desta manobra para alimentação extraordinária dos circuitos de resfriamento. Devido ao menor diâmetro dos tubos do feixe tubular dos trocadores de calor do MGT, estas cascas ficam retidas nas tampas destes trocadores, conforme indicado na Figura 2.

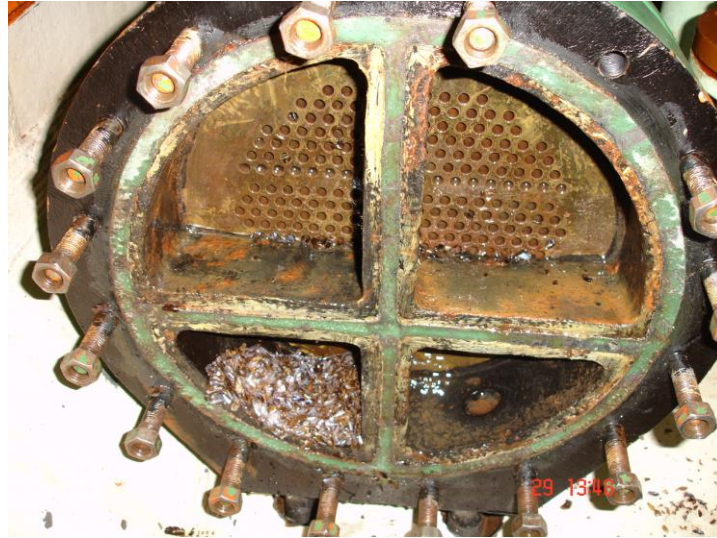


Figura 2: Retenção de cascas do Mexilhão Dourado no trocador de calor provenientes do coletor geral logo após a realização da limpeza periódica

Como forma de minimizar a problemática da retenção de cascas mortas do Mexilhão Dourado provenientes da alimentação pelo coletor geral, foi instalada uma drenagem na válvula 07GT, conforme indicado na Figura 3. Para tanto, quando da alimentação via coletor geral, a válvula 07GT de alimentação dos trocadores do MGT só é aberta após um flushing de aproximadamente meia hora no trecho até esta válvula. Quando se observa que cessou a vinda de cascas de mexilhões mortos, a válvula de drenagem é fechada e normalizado o fluxo pela válvula 07GT. Na Figura 3, observa-se as cascas de mexilhões drenadas nesta manobra, evitando seu alojamento nas tampas dos trocadores de calor logo após uma limpeza periódica.



Figura 3: Cascas de Mexilhão Dourado

Visando reduzir ainda mais a possibilidade de retenção de cascas do Mexilhão Dourado e de sujeira em geral, tanto durante a alimentação via coletor geral quanto durante a alimentação normal via filtro Cunoflo, decidiu-se realizar um estudo para analisar a viabilidade de alteração do feixe tubular dos trocadores do MGT por tubos de maior diâmetro, mantendo-se o casco original.

## 2. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISE

Em função da importância de se ter o sistema de troca de calor operando adequadamente, e dos riscos inerentes à sua operação sob condições de falha ou defeito, salienta-se que a obstrução do trocador de calor pode diminuir a efetividade do trocador, comprometendo a troca de calor necessária pelo sistema, e impossibilitando a manutenção das temperaturas nos níveis previstos.

A partir da necessidade de solução do problema apresentado, decidiu-se analisar termicamente a modificação do feixe tubular do trocador. Esta solução consiste no aumento do diâmetro dos tubos, modificação do número dos passes e conseqüente alteração do número de tubos. Com relação ao casco e conexões do sistema, não será realizada nenhuma modificação, garantindo assim a reutilização do mesmo casco com menor custo na modificação.

Devido à análise ter considerado o recálculo dos coeficientes de convecção interno e externo, fez-se necessário à utilização de bibliografias avançadas, além de programas computacionais como o IHT (*Interactive Heat Transfer*) e um aplicativo de modelagem geométrica.

O aplicativo IHT foi amplamente utilizado para facilitar os cálculos e interações referentes às trocas de calor. Neste programa as equações e os dados de entrada foram dispostos e modificados adequadamente para obtenção de resultados.

Na modelagem geométrica o uso de um aplicativo foi de vital importância na determinação do número máximo de tubos que podiam ser introduzidos nos feixes tubulares de acordo com o diâmetro do tubo considerado, feixe e distância entre passes, conforme indicado nas Figuras 4 e 5.

Na modelagem do feixe tubular foram utilizados diâmetros comerciais de 3/8, 1/2 e 5/8 polegadas. O diâmetro original de 3/8", foi utilizado como comparativo e validação da modelagem de cálculo utilizada, cujos resultados eram conhecidos para este diâmetro na temperatura de entrada do óleo de 50°C.

Para o feixe original, constituído de tubos de 3/8", o diâmetro do envoltório do feixe de tubos é de 270mm. Com intuito de dispor de mais tubos no feixe tubular, o diâmetro do envoltório do feixe de tubos em 1/2 e 5/8", foi adotado como 280mm. A utilização do feixe tubular com mais de 280mm, limitado ao diâmetro interno do casco ( $D_i=355,6$  mm), fica impossibilitada devido à existência de furos para acoplamento da tampa do trocador na parte mais externa do espelho.

Tendo-se em conta que a geração de calor no mancal é de aproximadamente de 79000 W, e que existem quatro trocadores de calor casco/tubo no sistema de resfriamento do mancal guia da turbina, cada trocador deve realizar a troca de 19720 W. De forma a manter esta capacidade de troca de calor, foram realizados cálculos para tubos de diâmetros 1/2" e 5/8", numa faixa da temperatura de entrada do óleo (Teo) entre 50 e 58 °C. Estes valores correspondem à temperatura de operação e de alarme do sistema, respectivamente. Com o cálculo, obtiveram-se as trocas de calor e a temperatura de estabilização do sistema.

Em todas as interações realizadas foram utilizados 6 passes nos tubos, conforme projeto original. Esta configuração foi mantida para evitar modificação das tampas do trocador, além de que a alteração do número de passes reduz a troca de calor.

Com as equações e dados requeridos, iniciou-se o processo de modelagem térmica do novo feixe tubular, seguindo o procedimento de cálculo do item seguinte. Como validação do procedimento, primeiramente efetuou-se o cálculo para o trocador original, ou seja, com tubos de 3/8", para o quais os resultados foram similares aos dados originais indicados na Tabela 1. Este mesmo procedimento foi repetido para tubos de diâmetro 1/2" e 5/8", no material original cobre-níquel 90/10 e em aço inoxidável.



**IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

Após a modelagem térmica, passou-se à etapa de modelagem geométrica. Nesta etapa, buscou-se dispor o número de tubos indicados pelo cálculo térmico para os novos diâmetros considerados. Para a alternativa com tubos de diâmetro 5/8" fez-se necessária uma alteração na tampa do lado do espelho flutuante. Esta alteração possibilitou o aumento do diâmetro útil do feixe tubular, de modo a acomodar o número de tubos necessários para esta alternativa. Sem esta alteração o número de tubos ficaria abaixo do necessário para a alternativa em diâmetro 5/8". Para esta modelagem geométrica, o uso de um aplicativo foi de grande valia.

Tabela 1 – Dados dos Trocadores Originais do MGT

<b>Parâmetro</b>	<b>Lado do Casco</b>	<b>Lado dos Tubos</b>
Fluido Circulado	Óleo	Água
Vazão de Fluido	1,003 Kg/s	2,393 Kg/s
Densidade do Fluido	868,75 Kg/m <sup>3</sup>	995,57 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade Dinâmica	49,024E-2 Kg/(m.s)	8,78E-4 Kg/(m.s)
Calor Específico	1966 J/Kg °C	4186 J/Kg °C
Temperatura de Entrada	50°C	30 °C
Temperatura de Saída	40 °C	32 °C
Pressão de Operação	50 KPa	1000 KPa
Número de Passes	1	6
Queda de Pressão	1,4 KPa	18 KPa
Pressão de Projeto	1 bar	10 bar
Pressão de Teste	1,5 bar	15 bar
Temperatura de Projeto	100°C	100 °C
Tubos	Material: CuNi10Fe	Nº:288 Diâmetro: 3/8" BWG
Casco	Material: St 35.8	Diâmetro: 355,6mm
Chicanas	Tipo: Transversais	Nº:3 Espessura: 3,2mm
Tipo do Trocador	PTFH TEMA C BET	
Função	Resfriador de Óleo	
Fabricante	FUNKE	

**3. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO**

A modelagem térmica e geométrica foi feita de modo a possibilitar a verificação da influência das seguintes variáveis nos parâmetros indicados na Tabela 2.

- Temperatura de entrada do óleo;
- Diâmetro dos tubos;
- Material dos tubos
- Número de tubos
- Vazão da água de resfriamento

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

Os parâmetros determinantes na análise dos resultados para a verificação da viabilidade de alteração do feixe tubular foram os indicados na Tabela 2 seguinte:

Tabela 2 – Parâmetros Determinantes na Análise de Viabilidade

Principais	Auxiliares
Calor trocado (q)	Efetividade do trocador (efe)
Temperatura de saída da água (Tsa)	Coefficiente de convecção interno (hi)
Temperatura de saída do óleo (Tso)	Coefficiente de convecção externo (hc)
Temperatura de equilíbrio p/ manter a troca original (Teq)	Número de passes (nt)

O número de tubos foi determinado com base na modelagem geométrica, buscando-se dispor o maior número possível de tubos na carcaça existente para um dado diâmetro dos tubos considerados, seguindo um arranjo triangular. Assim sendo, chegou-se a conclusão que para tubos de 1/2" o número de tubos seria 230 unidades e para tubos de 5/8" o número de tubos seria 140 unidades, mantendo-se o número de passes originais. Na Figura 4 encontra-se indicado o arranjo para tubos de 1/2", permitindo a utilização de 230 tubos no total para seis passes.

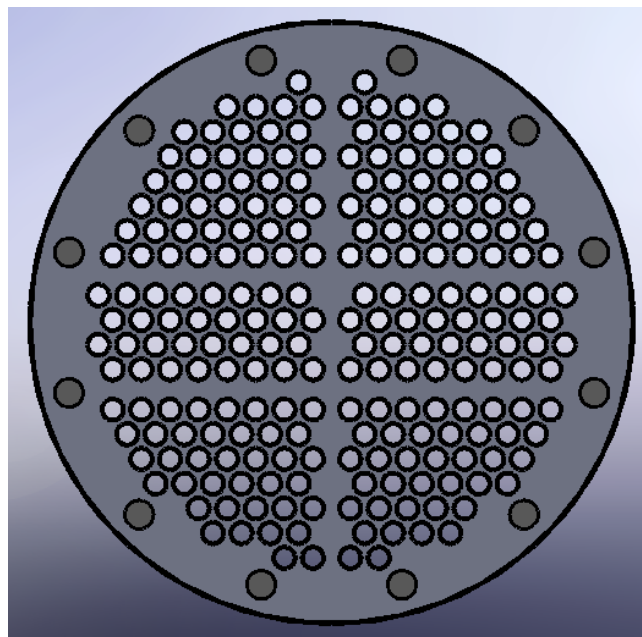


Figura 4: Espelho do trocador para tubos de 1/2", N = 230

Para acomodar os 140 tubos de 5/8" na carcaça existente fez-se necessário ampliar o diâmetro externo do círculo disponível para alocação dos tubos nos espelhos. Em função disto, a tampa do lado do espelho flutuante do trocador, ou seja, na câmara de retorno deve ser modificada, conforme Figura 5.

Por ser bastante extenso, o procedimento do cálculo térmico utilizado não será mostrado neste artigo. No entanto, tal procedimento encontra-se indicado de forma completa no Parecer Técnico 5215-67-19501-R0, indicado na bibliografia, o qual foi elaborado com base nas referências de GOLDSTEIN, Projeto Termo-Hidráulico de Trocadores de Calor Casco e Tubo Sem Mudança de Fase, e CIEM, Calculation of water-water heat exchanger.

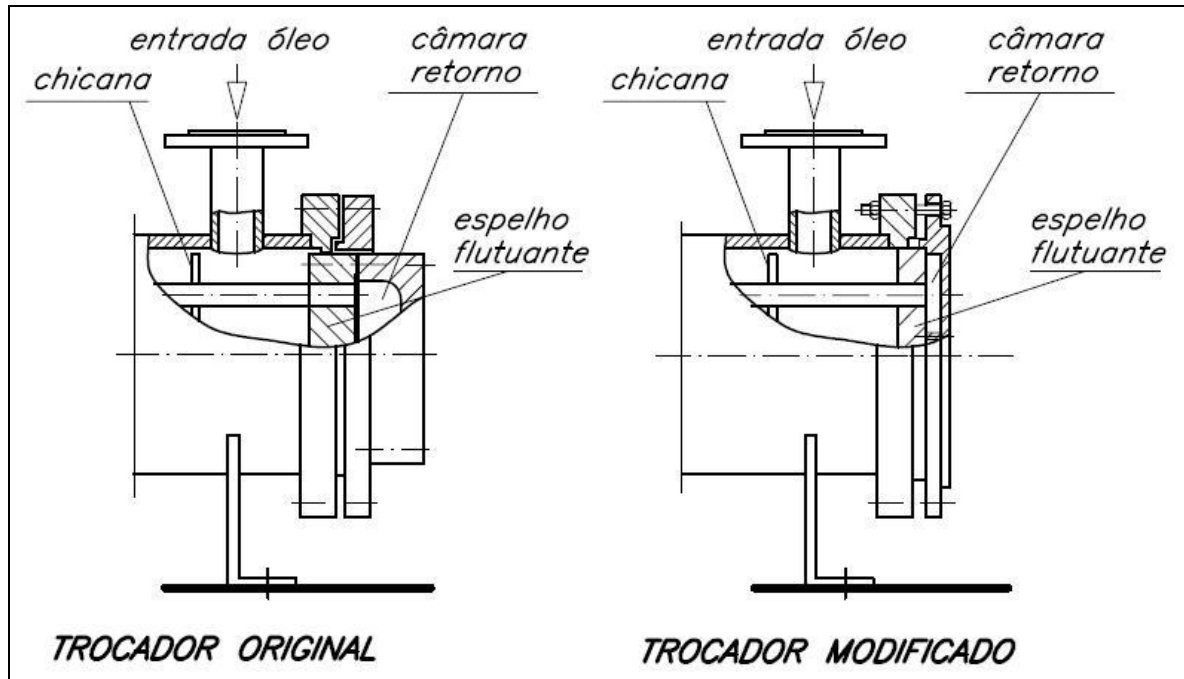


Figura 5 – Modificação na tampa da câmara de retorno do trocador do MGT

Na Figura 6 encontra-se indicado uma vista isométrica do feixe tubular para o caso de tubos de 1/2".

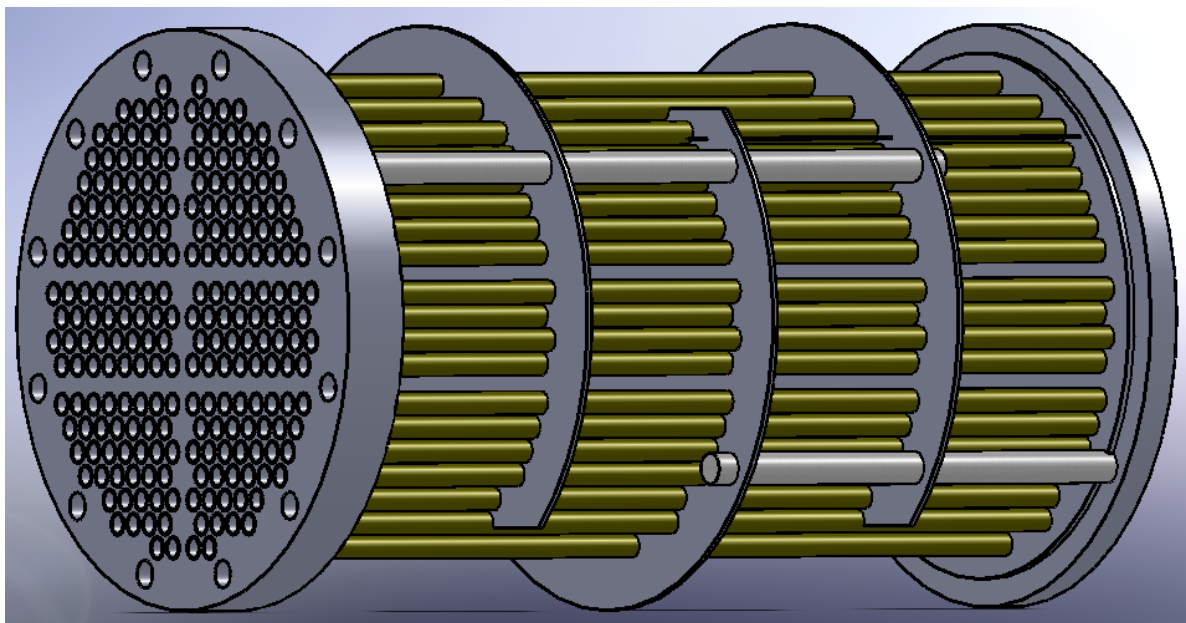


Figura 6: Desenho isométrico do feixe tubular do trocador de calor

#### 4. RESULTADOS

Com a resolução do equacionamento, obteve-se os resultados indicados na Tabela 3 para dois valores singulares para a temperatura de entrada do óleo no trocador, quais sejam, 50°C e 58°C:

Tabela 3: Resultados para Teo de 50°C e 58°C

Teo (°C)	50			58		
Material	CuNi10Fe	CuNi10F	CuNi10Fe	CuNi10Fe	CuNi10F	AISI 304
Diâmetro dos tubos	3/8”(origina	1/2”	5/8”	1/2”	5/8”	5/8”
Número de Tubos	288	230	140	230	140	140
Tsa (°C)	31,97	31,93	31,6	32,7	32,24	32,2
Tso(°C)	40	40,2	41,86	44,28	46,61	46,7
q (W)	19720	19326	16045	27057	22462	22275
efe	0,5	0,49	0,4068	0,49	0,4068	0,4034
hi (W/m <sup>2</sup> °C)	5094	3338	3260	3338	3260	3260
hc (W/m <sup>2</sup> °C)	324,6	302,7	303,7	302,7	303,7	303,7
Teq (°C)	50	50,7	54,9	50,7	54,9	55,2

Para verificação da influência da vazão de água na temperatura do óleo, encontra-se indicado na Figura 7 um diagrama de variação da eficiência de troca do calor em função da vazão de água e da temperatura do óleo, com um ponto de operação indicado para o novo trocador. Por este diagrama, verifica-se que para um aumento de 100% na vazão de água a eficiência de troca aumentaria apenas em torno de 2%. Assim sendo, do ponto de vista térmico, um aumento nesta vazão seria pouco relevante.

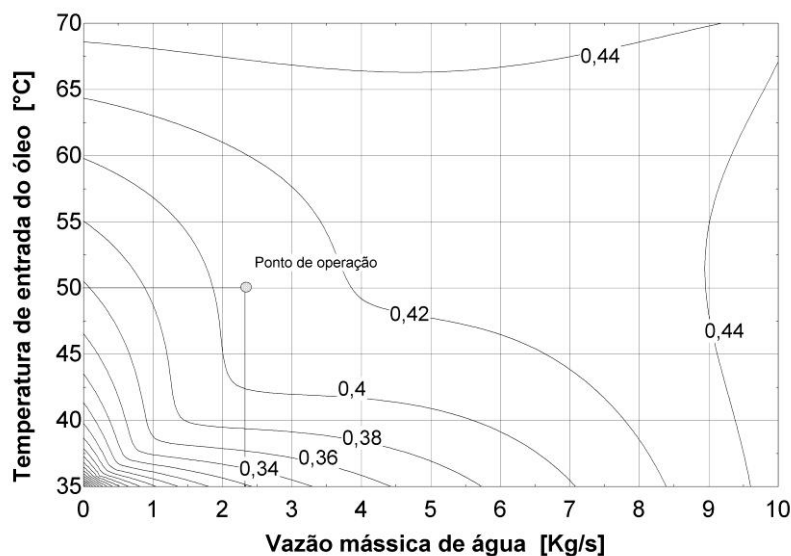


Figura 7 – Variação da Efetividade do Trocador



## 5. CONCLUSÕES

Na Tabela 4 encontra-se indicada a dependência de parâmetros relevantes do trocador de calor com algumas variáveis de interesse na modelagem térmica e geométrica efetuada e também a tendência global de variação destes parâmetros.

Tabela 4 - Influência em Parâmetros Relevantes do Trocador

Parâmetro	Dependência	Tendência
Efetividade do trocador de calor	<ul style="list-style-type: none"><li>- Decresce com a diminuição do número de tubos e do números de passe de tubos.</li><li>- Cresce com o aumento do diâmetro dos tubos.</li></ul>	Em uma análise global, a efetividade diminui com o aumento do diâmetro dos tubos, pois o número de tubos tem maior influência sobre a efetividade.
Calor Trocado	<ul style="list-style-type: none"><li>- Decresce com a diminuição do número de tubos e do número de passes de tubos.</li><li>- Cresce com o aumento do diâmetro dos tubos.</li></ul>	Em uma análise global, o calor trocado decresce com o aumento do diâmetro dos tubos, pois o número de tubos tem maior influência sobre o calor trocado.
Coefficiente de convecção interno	<ul style="list-style-type: none"><li>- Decresce com o aumento do diâmetro dos tubos e do número de passes de tubos.</li><li><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> - Cresce com a diminuição do número de tubos.</li></ul>	Em uma análise global, o Coeficiente de convecção interno decresce com o aumento do diâmetro dos tubos, pois o diâmetro dos tubos e o número de passes de tubos têm maior influência sobre o calor trocado, mantendo-se a mesma vazão de resfriamento.
Coefficiente de convecção externo	<ul style="list-style-type: none"><li>- Cresce com a diminuição do número de tubos e do número de passes de tubos.</li><li>- Decresce com o aumento do diâmetro dos tubos</li></ul>	Em uma análise global, o Coeficiente de convecção externo decresce com o aumento do diâmetro dos tubos, pois o diâmetro dos tubos de tubos têm maior influência sobre o calor trocado.
Temperaturas	<ul style="list-style-type: none"><li>- São influenciadas por todos os parâmetros mencionados anteriormente.</li></ul>	

A partir dos resultados obtidos através do cálculo das trocas de calor nos feixes tubulares modelados, nota-se que a modificação do mesmo para o diâmetro dos tubos de 1/2" é viável, pois a troca de calor à temperatura de 50°C é de 19326 W, portanto muito próxima da troca de calor original do sistema. Para manter a troca de calor de calor original, a temperatura de equilíbrio do sistema será de 50,7°C, inferior à temperatura de alarme do óleo do MGT.

Para tubos de 5/8", a troca de calor à temperatura de 50°C é de 16045 W, portanto, inferior à troca de calor original do sistema. Devido a isto, a troca de calor se estabiliza com a temperatura de entrada do óleo de 55°C, aproximando-se da temperatura de alarme do sistema, porém ainda dentro dos limites. Considerando a menor possibilidade de retenção de sujeira, e temperatura ainda aceitável, esta alternativa é preferível à de tubos com 1/2". Se necessário, poderia-se reajustar os valores de referência para o alarme e o *trip*, os quais atualmente estão em 68°C e 73, respectivamente.

Para tubos de 5/8" em AISI 304, a temperatura de estabilização térmica do sistema passa de 54,9°C para aproximadamente 55,2°C, portanto ainda abaixo da temperatura de alarme. Portanto, a alteração do material dos tubos para Aço Inoxidável AISI 304 é viável do ponto de vista térmico e mecânico, garantindo assim a troca térmica necessária, e maior resistência a erosão. Propõe-se com caráter de teste, a construção de um feixe tubular com tubos de 5/8".

Como resultado deste estudo e considerando que no PD anual de 2008 da U01 um feixe tubular apresentou falha e os outros três feixes tubulares apresentaram graves defeitos, conforme erosões visíveis pela na Figura 8, decidiu-se pela aquisição de quatro feixes tubulares com tubos em aço inoxidável de 5/8”.

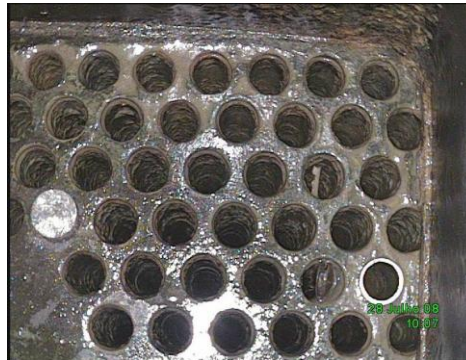


Figura 8 – Erosões na extremidade dos tubos de um trocador do MGT da U01

Em julho/2009 chegou à CHI os quatro feixes tubulares adquiridos. A Figura 9 mostra um exemplar do novo feixe tubular em aço inoxidável para o MGT. Em outubro/2010 foi instalado na U06 o primeiro protótipo.



Figura 9 – Feixe tubular em tubos de 5/8” em aço inoxidável

## REFERÊNCIAS

- INCROPERA, F.P., De Witt, D.P., Fundamentos de Transferência de Calor e Massa
- GOLDSTEIN Jr. Leonardo, Projeto Termo-Hidráulico de Trocadores de Calor Casco e Tubo, Sem Mudança de Fase, Instituto Brasileiro de Petróleo
- ITAIPU Binacional, Modificação do feixe tubular dos trocadores de calor casco/tubo do mancal guia da turbina. 2008. 5215-67-19501-P
- ITAIPU Binacional, Sistema de resfriamento mancal guia turbina – Trocador de calor feixe tubular. 2005. IB nº 5215-DC-19501-P
- ITAIPU Binacional, Tubulação 80-WR-15008-MGT-Dreno antes da válvula 07GT. 2008. IB nº 5239-DI-19529
- CIEM, Mancal de guia – Especificação do trocador de calor para o mancal guia da turbina. 1981. IB nº 5215-80-71458-I
- CIEM, Calculation of water-water heat exchanger. 1981. IB nº 6210-10-71019-I