



## **O Uso do Método *Peak-Over-Threshold* (POT) e da Distribuição Generalizada de Pareto para Inspeção de Feixes de Trocadores de Calor**

*Iago Pereira Lemos<sup>1</sup>, Antônio Marcos Gonçalves Lima<sup>2</sup>*

**RESUMO:** Trocadores de calor do tipo casca e tubo são equipamentos amplamente utilizados em refinarias de petróleo, atuando na separação dos derivados do petróleo pelo mecanismo de destilação. Um dos principais problemas relacionados a estes trocadores se baseia na tomada de decisão relativas às suas condições físicas, devido à dificuldade e o alto custo de se inspecionar todos os tubos presentes em um trocador, o que ocasiona em falhas inesperadas. Neste contexto, este trabalho apresenta uma modelagem estatística por meio do método do Peak-Over-Threshold com ajuste na Distribuição Generalizada de Pareto, dos dados de espessura dos tubos inspecionados, obtidos por meio da técnica IRIS (*Internal Rotary Inspection System*), de alguns trocadores tipo casca e tubo. Por meio da modelagem estatística foi possível estimar os parâmetros da distribuição, além de verificar a adequação do ajuste e realizar a extrapolação dos dados para as áreas não inspecionadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Trocador de calor. Modelagem estatística. Peak-Over-Threshold. Distribuição Generalizada de Pareto. Técnica de extrapolação de dados.

## **The Use of the *Peak-Over-Threshold Method* (POT) and the Generalized Pareto Distribution for Inspection of Heat Exchangers Tube Bundles**

**ABSTRACT:** Shell and tube heat exchangers are equipment widely used in oil refineries, acting in the separation of oil derivatives by the distillation mechanism. One of the main problems related to these heat exchangers equipment is based on the decision making regarding their physical conditions, due to the difficulty and the high cost of inspecting all the tubes in an exchanger, which leads to unexpected failures. In this context, this work presents a statistical modelling methodology by means of the so-called Peak-Over-Threshold method in order to fit in the Generalized Pareto Distribution, on the thickness data of tubes of some heat exchangers obtained by the IRIS (*Internal Rotary Inspection System*) technique. Through the statistical modeling it was possible to estimate the parameters of the distribution, as well as to verify the adequacy of the fit and to perform the extrapolation of the data to the uninspected areas.

**KEYWORDS:** Heat Exchangers. Statistical Modeling. Peak-Over-Threshold. Generalized Pareto Distribution. Extrapolation technique.

### **INTRODUÇÃO**

Trocadores de calor do tipo casco e tubo são bastante utilizados em refinarias de petróleo para a separação dos derivados do petróleo pelo princípio físico da destilação (Schayer, 2008). Segundo Schayer (2008), a inspeção destes pode ser realizada de forma mais ágil por ensaios não destrutivos (END's) não convencionais, como por exemplo, o IRIS – *Internal Rotary Inspection System*, que é baseado no tempo de propagação de um pulso gerado no interior do tubo ao longo de sua espessura. Normalmente, os dados presentes nos relatórios de inspeção empregando IRIS constam a espessura remanescente mínima registrada por tubo.

Inspeccionar todos os tubos de cada feixe presente em uma planta é extremamente inviável. Neste contexto, este trabalho apresenta uma modelagem estatística dos dados de perda de massa e a extrapolação para áreas não inspecionadas, de forma a fornecer uma aproximação que facilite a tomada de decisão do operador com relação à obtenção de novos

dados, além de diminuir o custo das inspeções.

## MATERIAIS E MÉTODOS

- **Definições Amostrais**

Os dados de espessura utilizados são de dois trocadores de calor diferentes, os trocadores 1 e 2. O primeiro é formado por 1188 tubos com 2.1 *mm* de espessura, com um tamanho amostral de 329 tubos ensaiados, e o segundo contém 1023 tubos com 2.3 *mm* de espessura com tamanho amostral de 110 tubos. Os tubos de ambos os trocadores apresentam 6096 *mm* de comprimento e 19 *mm* de diâmetro.

Os dados de espessura foram obtidos por meio do ensaio IRIS, retornando um valor de espessura mínima de cada tubo, denotados  $z_1, \dots, z_n$ . Estes são parametrizados de forma a obter a perda de massa máxima por tubo, dada pela Eq. (1).

$$x_n = e_{nominal} - z_n \quad (1)$$

onde  $e_{nominal}$  é a espessura nominal dos tubos em estudo.

- **Peak-Over-Threshold (POT)**

O POT consiste em obter, a partir de um conjunto de amostras  $x_1, \dots, x_n$ , um novo conjunto chamado de  $y_{excedente}$ , dado pela Eq. (2) (Tan, 2017).

$$y_{excedente} = x_{(k)} - u, \forall x_{(k)} > u, \quad (2)$$

onde  $u$  é o limiar ótimo obtido graficamente, obtendo a conhecida *função da média amostral dos excessos*, dada pela Eq. (3), onde  $n$  é o número de excedências. O valor esperado de  $u$  é obtido com base na abscissa em que a função passa a ter crescimento ou decrescimento aproximadamente linear (Belitsky e Moreira, 2007).

$$\hat{e}(u) = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^k (x_{(k)} - u) \quad (3)$$

Pelo Teorema de Picklands-Balkema-de Haan (Belitsky e Moreira, 2007), o conjunto  $y_{excedente}$ , pode ser ajustado à uma Distribuição Generalizada de Pareto. Além disso, o  $y_{excedente}$  pertence ao domínio das Distribuições de Valores Extremos (Belitsky e Moreira, 2007).

- **A Distribuição Generalizada de Pareto (GPD)**

A função de distribuição acumulada (FDA) é dada pela Eq. (4) (Belitsky e Moreira, 2007), onde  $\xi$  e  $\beta$  são os parâmetros de forma e de escala, respectivamente.

$$G_{\xi, \beta}(y) = 1 - \left(1 + \xi \frac{y_{excedente}}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\xi}} \quad (4)$$

O valor de retorno associado à um período de retorno  $N = \frac{1}{p}$ , para a probabilidade

dada por  $0 < p < 1$  é dado pela Eq. (5) (Tan, 2017).

$$y_p = \frac{\beta}{\xi} (p^{-\xi} - 1) \quad (5)$$

onde  $y_p$  é interpretado como sendo o valor que se espera ser igualado ou excedido uma vez a cada  $N$  dados que excedem o limiar ótimo. A corrosão máxima é dada por  $y_p + u$ . Para verificar a adequação do ajuste foi obtido o gráfico Quantil-Quantil (Q-Q), com o intuito de comparar os quantis teóricos, previstos pelo ajuste, com os quantis da amostra. Isto permite quantificar a qualidade do ajuste.

- **Relações Para a Extrapolação**

Se  $N_s$  denota o número de excedências em relação ao limiar ótimo em uma superfície  $S$ , então o valor esperado de  $N_s$  é dado pela Eq. (6) (Tan, 2017).

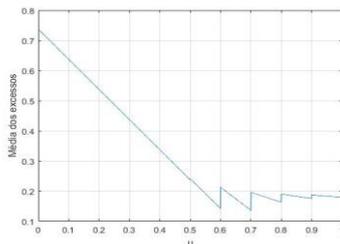
$$E(N_s) = \lambda \times |S| \quad (6)$$

onde  $\lambda$  é a taxa de excedências por unidade de área de  $S$  e  $|S|$  é a área da superfície. Neste caso, para a área da superfície não inspecionada, a relação entre a probabilidade  $p$  e o período de retorno é dada por  $p = \frac{1}{\lambda \times |S|}$ , sendo  $|S|$  a área da superfície não inspecionada.

## RESULTADOS PRELIMINARES

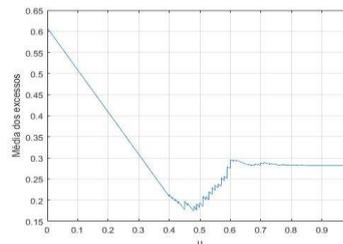
Com a Eq. (2) foram obtidos os gráficos do valor esperado de  $u$  para cada trocador. Os gráficos podem ser observados nas Figs. 1 e 2. Para o Trocador 1, o valor de  $u$  escolhido foi **0.6** e para o Trocador 2 foi **0.45**.

**Figura 1** - Média dos excessos para o Trocador 1



Fonte: O próprio autor.

**Figura 2** - Média dos excessos para o Trocador 2

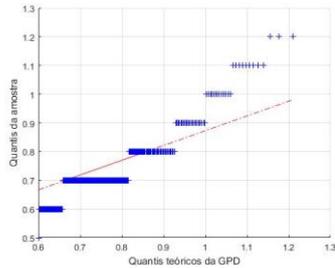


Fonte: O próprio autor.

Após a definição de  $u$ , pela Eq. (4) e pela função da máxima verossimilhança foram estimados os parâmetros  $\xi_1, \beta_1$  e  $\xi_2, \beta_2$  dos Trocadores 1 e 2, onde  $\xi_1 = -0,6105$  e  $\beta_1 = 0,2894$ ;  $\xi_2 = -0,3422$  e  $\beta_2 = 0,2343$ .

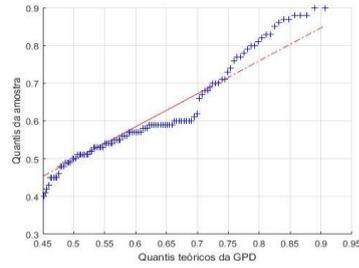
Após a definição dos parâmetros para cada Trocador, foram construídos os gráficos Q-Q mostrados nas Figs. 3 e 4. É possível observar que para Trocador 1 o gráfico Q-Q se assemelha às um gráfico de dados discretos. Isto se deve à resolução dos dados da amostra deste trocador, de 0.1, o que faz os dados se comportarem como discretos, o que não foi considerado, desde que a distribuição utilizada é para dados contínuos.

**Figura 3:** Gráfico Q-Q para o Trocador 1.



Fonte: O próprio autor.

**Figura 4:** Gráfico Q-Q para o Trocador 2.



Fonte: O próprio autor.

Pela Eq. (6) pode-se determinar o valor de  $\lambda$  para ambos os trocadores, utilizando a área da superfície relacionada aos tubos inspecionados e o número de excedências de cada um. Utilizando as relações para a extrapolação, apresentadas na seção anterior, determinou-se  $p_1$  e  $p_2$ . Aplicando estes valores na Eq. (5), a corrosão máxima obtida na área não inspecionada no Trocador 1 é de 1.2106 mm e no Trocador 2 é de 0.9163 mm, que são coerentes, levando em consideração que a perda de massa máxima foi de 1.2 mm e de 0.9 mm, para o Trocador 1 e o Trocador 2, respectivamente.

## CONCLUSÕES

Foi possível extrapolar os dados para as áreas não inspecionadas e apresentar uma estimativa da corrosão máxima nesta região para cada um dos trocadores. Os valores máximos obtidos são coerentes.

Ademais, observou-se que a resolução dos dados dita se os quantis se comportam como os de uma amostra contínua ou discreta, como verificado no gráfico Q-Q do Trocador 1, o que pode não interferir na extrapolação.

## REFERÊNCIAS

Belitsky, V.; Moreira, F. M. **Emprego do método “Peaks-over-Threshold” na estimação de risco; uma exposição abrangente, detalhada, mas simples.** Instituto de Matemática e Estatística – USP, 2007.

Tan Hwei-Yang. **Statistical methods for the analysis of corrosion data for integrity assessments.** Thesis of Doctor of Philosophy in Mechanical and Aerospace Engineering - Brunel University, London, 2017.

Schayer, Ricardo. **Inspeção de Feixes Tubulares de Trocadores de Calor.** Dissertação – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

<sup>1</sup>Graduando em Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Uberlândia,  
Uberlândia, MG

<sup>2</sup>Professor, Dr., Universidade Federal  
de Uberlândia, Uberlândia, MG