

---

# OTIMIZAÇÃO DA ETAPA DE PRÉ-AQUECIMENTO DA CARGA DE UMA UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO, FAZENDO USO DA PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA E DA METODOLOGIA “PINCH” DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA EM REDES

**Luciano Fernando dos Santos Rossi**

Universidade Federal Tecnológica do Paraná

**Antonio Carlos Bannwart**

UNICAMP

## Resumo

Este trabalho busca a melhor integração energética no estudo de caso da otimização do pré-aquecimento da carga do reator catalítico, de uma refinaria de petróleo (REPLAN), fazendo uso da Programação Matemática, e de conceitos da “Metodologia Pinch” de recuperação energética. Em uma primeira etapa, otimizam-se as trocas térmicas da unidade, de maneira a conseguir-se a mínima intervenção de utilidades de aquecimento e de resfriamento, através da formulação do Transporte, da Programação Linear. Procura-se, então, o menor número de trocadores de calor que atende aos requisitos energéticos mínimos. Isto caracteriza um problema linear inteiro, passível de relaxação a um problema apenas linear. Nota-se, também, que o problema energético é dividido em duas regiões distintas, separadas por um determinado ponto, pelo qual não se verifica a transferência de energia (“pinch point”). Mostra-se, então, que a estrutura de grafos permite a delimitação dessa região de separação e, portanto, a determinação do “pinch point”.

**Palavras-chaves:** programação linear; formulação do transporte; programação inteira; grafos; metodologia “pinch”; otimização energética; trocadores de calor.

## Abstract

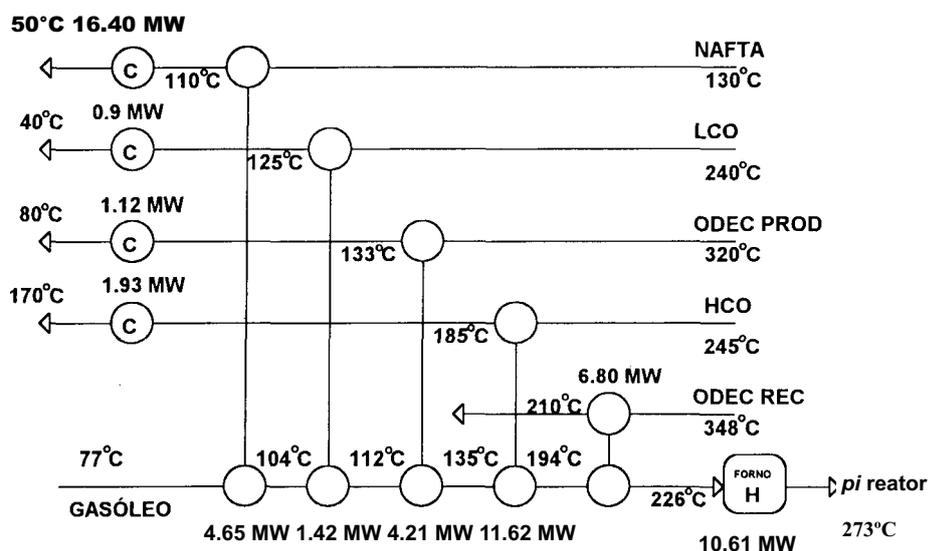
This work looks for the best energetic integration in the case study of the catalytic reactor’s charge heating optimisation, at an oil refinery (REPLAN), using the Mathematical Programming and concepts from the “Pinch” Methodology. The first task is to optimise the heat exchanges of the unity. In doing so, the minimum energetic intervention is claimed, through the Linear Programming Transport Formulation. The task now, is to find the minimum number of thermal equipment’s to carry out the best energetic integration. This problem is like an integer linear programming problem, which can be transformed into a linear problem by an adequate relaxation. One can realise, also, the existence of two distinct regions which are separated by a determined point by which there is not heat transfer. This point is called the “Pinch Point” of the plant. One can show that the Graph structure can be used for the “Pinch Point” determination.

**Keywords:** Linear Programming; Transport Formulation; Integer Programming; Graphs, “Pinch” Methodology; Energetic Optimisation; Heat Exchangers.

## 1. Introdução

Uma parte da unidade de craqueamento catalítico da refinaria de Paulinia (REPLAN), da PETROBRÁS, tem uma bateria de trocadores de calor para o aquecimento da carga de gasóleo, a fim de que a mesma alcance a temperatura de 273°C, antes de entrar em um reator catalítico. Para a etapa de aquecimento da carga, são utilizadas 5 correntes quentes de produtos que necessitam transferir energia a fim de sofrerem uma redução em suas temperaturas finais. Um forno está colocado antes do reator catalítico, para fornecer à carga de gasóleo, um complemento energético no caso de a troca de energia com as 5 correntes não levá-la à temperatura pré-reator desejada. O objetivo da otimização energética, na etapa de pré-aquecimento da carga da unidade, é tirar vantagem do conteúdo energético das correntes quentes, de modo a minimizar a intervenção do forno [7]. Uma representação esquemática da unidade é apresentada na figura abaixo.

**Figura 1:** Esquema da bateria de pré-aquecimento, na Unidade de Craqueamento Catalítico da REPLAN



Na Fig. 1, as unidades com índice "C" representam resfriadores ("coolers"). Pode-se notar que, na situação observada na unidade, a carga térmica suprida pelo forno à corrente de gasóleo é de 10,61 MW. É essa carga que pretende-se minimizar através da otimização da transferência de energia no processo. Os dados térmicos para todas as correntes de processo, se encontram na Tabela 1.

**Tabela 1:** Dados Térmicos, para o Aquecimento do Gasóleo

CORRENTE	Ti (°C)	Tf (°C)	d (20°C/4°C)	CP médio (kW/°C)	Q (m3/dia)
GASÓLEO	77.	273.	0,93	204,374	7.800.
NAFTA	130.	50.	0,75	274,074	13.680.
LCO	240.	40.	0,97	11,753	520.
ODEC-PROD	320.	80.	1,10	22,298	950.
HCO	245.	170.	1,00	183,082	5.200.
ODEC-REC	348.	210.	1,10	50,129	1.800.

## 2. O Problema do Transporte e a Metodologia "Pinch"

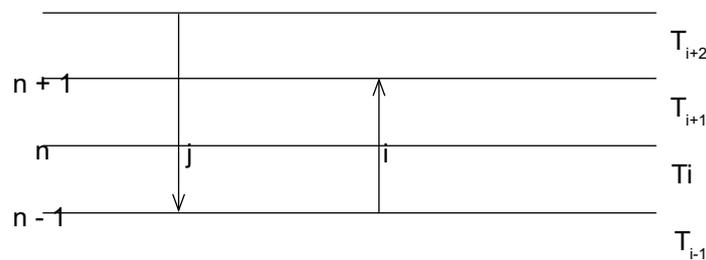
Na modelagem do problema da REPLAN, como um problema adequado à formulação do transporte [1], será necessário caracterizá-lo em termos de "origens" e "destinos" (ou centros produtores e consumidores) de certa atividade que se deseja transportar (neste caso, a atividade a ser "transportada" é a energia excedente das correntes de processo "quentes"). Na busca pelo mínimo consumo de utilidades, tomará parte o parâmetro  $\Delta T_{\min}$  representando a menor diferença de temperaturas permitida para a rede de trocadores de calor da unidade.

Esse parâmetro é originário da metodologia de integração energética em redes, conhecida como Metodologia "Pinch" [5]. Tomando-se as temperaturas terminais das correntes quentes, subtrai-se o valor de  $\Delta T_{\min}$ . Às temperaturas terminais das correntes frias adiciona-se o valor de  $\Delta T_{\min}$ . Todas as temperaturas são então ordenadas, eliminando-se repetições.

Esse procedimento é conhecido como o Método dos Intervalos de Temperatura [S], e representa uma maneira simples de se considerar a Segunda Lei da Termodinâmica, no problema da análise da integração energética [4].

Em cada intervalo de temperatura pode-se transferir energia de correntes quentes para correntes frias, uma vez que garante-se, com a disposição em intervalos (Fig. 2), a existência de uma adequada força motriz para o processo de transferência de energia, sempre satisfazendo à Segunda Lei da Termodinâmica.

**Figura 2:** Representação dos Intervalos de Temperatura, da Metodologia "Pinch"



Deve-se agora, tentar quantificar a capacidade de transferência de energia entre as correntes de processo, para cada intervalo de temperatura. Pode-se imaginar que as correntes de processo foram subdivididas em  $n$  partes, onde  $n$  é igual ao número de intervalos de temperatura, obtidos. Dessa forma, cada sub-corrente é caracterizada por dois sub-índices sendo o primeiro, o que identifica a corrente de origem e o segundo o intervalo de temperatura analisado. Assim, pode-se escrever para o cálculo das necessidades de aquecimento da corrente fria  $i$ , no intervalo de temperatura  $k$ ,  $a_{i,k}$ :

$$a_{i,k} = C_{P_{i,k}} (T_{i+1} - T_i) \quad (1)$$

onde  $C_{P_{i,k}}$  representa a capacidade calorífica média da corrente fria  $i$ , no intervalo  $k$  (em unidades de energia / temperatura).

De um modo semelhante, o cálculo das necessidades térmicas das correntes quentes  $j$ , no intervalo de temperatura  $l$ ,  $b_{j,l}$  pode ser calculado por:

$$b_{j,l} = C_{P_{j,l}} (T_{j+1} - T_j) \quad (2)$$

onde  $C_{p,i,j}$  representa a capacidade calorífica média da corrente quente  $j$ , no intervalo de temperatura  $l$ . Cada sub-corrente fria  $c_{i,k}$  deverá satisfazer sua necessidade energética, trocando energia com sub-correntes quentes  $h_{j,l}$  situadas em intervalos de temperatura não inferiores ao seu ( $k \leq l$ ) ou trocando energia diretamente com as utilidades quentes.

Analogamente, cada sub-corrente quente  $h_{j,l}$  deverá transferir energia para sub-correntes frias situadas em intervalos de temperatura inferiores ou iguais ao seu, ou transferir energia diretamente para as utilidades frias (para tanto, dispõe-se de água de refrigeração à pressão e temperatura ambiente).

### 3. A Formulação do Problema do Transporte, Aplicada ao Processo de Pré-Aquecimento da carga de Gasóleo

A formulação do problema do transporte, quando aplicada ao processo de pré-aquecimento do gasóleo, seguirá a mesma notação empregada na literatura [3]. No modelo do transporte, o objetivo é minimizar o uso da energia proveniente das utilidades de processo (no caso, água de refrigeração e energia para aquecimento, proveniente do forno), uma vez que deveremos necessariamente incorrer em custos. Desta forma, o problema a ser analisado transforma-se em:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^H \sum_{k=1}^L \sum_{l=1}^L C_{ik,jl} q_{ik,jl} \quad (3)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{j=1}^H \sum_{l=1}^L q_{ik,jl} = a_{i,k}, \quad i=1,\dots,C; \quad k=1,\dots,L \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^L q_{ik,jl} = b_{j,l}, \quad j=1,\dots,H; \quad l=1,\dots,L \quad (5)$$

onde:

$$q_{ik,jl} \geq 0, \quad \forall (i, j, k, l) \quad (6)$$

e,

$$C_{ik,jl} = \begin{cases} M, & \text{para } k > l, \\ 1, & \text{para } j = H \text{ e } i \neq C \\ 1, & \text{para } j \neq H \text{ e } i = C \\ 0, & \text{em todos os outros casos} \end{cases} \quad (7)$$

A equação (3), que representa a função objetivo do problema da REPLAN, direciona o processo de otimização no sentido de minimizar a transferência de energia, entre correntes de processo (quentes ou frias) e utilidades (água de refrigeração ou a intervenção do forno) sendo  $q_{ik,jl}$  a variável de decisão que representa a quantidade de energia que uma corrente de processo fria  $i$  pode receber, em seu intervalo de temperatura  $k$ , proveniente de uma corrente de processo quente  $j$ , em seu in-

intervalo de temperatura  $l$ . A equação (4), significa que a corrente de processo fria  $i$ , no intervalo de temperatura  $k$ , requer uma demanda energética ( $a_{i,k}$ ), que deve ser suprida pela transferência de energia das correntes quentes  $j$ , ( $j=1,\dots,H$ ) nos intervalos de temperatura  $l$ , tais que  $l > k$ .

A equação (5) refere-se à capacidade da corrente quente  $j$ , no intervalo de temperatura  $l$ , em transferir energia para as correntes frias  $i$ , ( $i=1,\dots,C$ ) nos intervalos de temperatura  $k$ , tais que  $k < l$ . A equação (6) refere-se a não negatividade das variáveis de decisão (no caso, o fluxo de calor transferido entre correntes). Por fim, a equação (7) refere-se aos coeficientes de custo da função objetivo. O fato de se desejar priorizar as trocas de energia entre as correntes de processo se faz notar, pela escolha de um custo unitário nulo quando se prioriza a troca térmica entre correntes de processo.

Como os somatórios em (3) se estendem sobre todas as correntes e todos os intervalos de temperatura, torna-se necessário precaver-se contra a possibilidade de se tentar transferir energia entre uma corrente quente e uma corrente fria, estando a primeira situada em um intervalo de temperatura inferior ao da segunda (o que fere a Segunda Lei da Termodinâmica). Isto é feito, pela imposição ao modelo, de um custo extremamente elevado, o qual denomina-se  $M$ . Em outras palavras, com esse valor de  $M$ , para as associações (ou "matches") proibidos, força-se o modelo a procurar uma solução para o problema, que evite essas "rotas" proibidas (ou extremamente custosas).

A partir da definição do modelo, e de seu domínio (as equações de restrição), busca-se a solução do problema, que passa, necessariamente, por uma solução básica inicial factível. Quando procura-se uma solução básica inicial factível para iniciar-se a resolução do problema através do algoritmo Simplex para o problema do transporte, a solução obtida já é (ou está muito próxima dela) a solução ótima [3]. Utilizou-se nesta análise a Regra do Canto Noroeste [6], para a obtenção da solução básica inicial factível.

A solução ótima para o processo de aquecimento da carga de gasóleo, foi encontrada como sendo de 5,9 MW térmicos, para a intervenção necessária do forno, além da redução na necessidade de resfriamento, para 16,55 MW.

Conhecendo-se os valores mínimos para a energia a ser suprida à unidade, parte-se para a obtenção do menor número de equipamentos térmicos (no caso trocadores de calor ou "coolers") que atenda a esse mínimo energético alcançado.

#### **4. O Mínimo Número de Equipamentos que Atendem à Máxima Recuperação Energética**

A função objetivo neste caso, deve focar a minimização das associações possíveis entre as correntes de processo (alocação de equipamentos térmicos). Cada associação será representada pela variável  $y_{ij}$ , onde  $i$  é representativo das correntes frias ( $i = 1,\dots, C$ , onde  $C$  indica as utilidades de processo para resfriamento); e  $j$  é representativo das correntes quentes de processo, ( $j = 1,\dots, H$ , onde  $H$  indica utilidades de processo para aquecimento).

A variável  $y_{ij}$  é uma variável inteira do tipo binário, assumindo o valor unitário quando uma associação puder ser efetuada, e o valor nulo quando a associação é impossível.

Logo, pode-se escrever:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^H y_{ij} \quad (8)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^H \sum_{l=1}^L q_{ik,jl} = a_{i,k} \quad , \quad i=1,\dots,C \quad ; \quad k=1,\dots,L \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^H \sum_{k=1}^L q_{ik,jl} = b_{j,l} \quad , \quad j=1,\dots,H \quad ; \quad l=1,\dots,L \quad (10)$$

com:

$$q_{ik,jl} \geq 0 \quad , \quad \forall (i, j, k, l) \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^L b_{H,l} = (b_H)_{\min} \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^L a_{C,k} = (a_C)_{\min}$$

onde  $(b_H)_{\min}$  representará a mínima quantidade de energia transferida pela utilidade quente às correntes frias do processo, a qual é obtida quando da resolução do P.L. correspondente à máxima recuperação energética ( $b_H = 5,9$  MW, no caso); da mesma forma,  $(a_C)_{\min}$  representará a mínima energia transferida das correntes quentes à utilidade fria, também obtida na etapa da otimização da recuperação energética ( $a_C = 16,6$  MW, no caso); e ainda:

$$\sum_{k=1}^H \sum_{l=k}^L q_{ik,jl} \leq U_{ij} y_{ij} \quad \text{para } i=1, 2,\dots,C; \quad j=1, 2,\dots,H \quad (13)$$

$$y_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad \text{para } i=1, 2,\dots,C; \quad j=1, 2,\dots,H \quad (14)$$

onde  $U_{ij}$  representará a máxima quantidade de energia possível de ser transferida entre uma corrente quente  $h_j$  e uma corrente fria  $c_j$ ;

$U_{ij}$  pode ser definida pela aplicação da *regra do canto noroeste* [6] a um “tableau” de um problema de transporte padrão e que inclui apenas as “sub-correntes” quentes ( $h_{j,l}$  que representa as contribuições de energia, da corrente  $h_j$ , nos intervalos de temperatura  $l = 1,\dots,L$ ) e as “sub-correntes” frias ( $c_{i,k}$  que representa as demandas de energia, da corrente  $c_j$ , nos intervalos de temperatura  $k = 1,\dots,L$ )[3].

## 5. A Relaxação do Problema de Programação Linear Inteira

A solução para o problema da rede de trocadores de calor, como estabelecido anteriormente, não é tão simples de ser efetuada sem um procedimento computacional especial. Entretanto, pode-se

mostrar que existe a possibilidade de se transformar, sob certas condições, o P.L.I. em um P.L.I. relaxado, ou seja abrindo-se mão da integralidade das variáveis  $y$ , uma vez tendo um limitante para a transferência de calor entre as correntes de processo [3].

Dessa forma, toda solução para o P.L.I. será também uma solução para o P.L.I relaxado, mas o contrário não necessariamente é verdadeiro. Em outras palavras, a relaxação do P.L.I. proporciona um limitante inferior para o problema considerando a integralidade. Como será mostrado, esse procedimento também gera um problema bem mais simples de ser resolvido.

Da literatura [3], adota-se que  $(q_{ik,jl}, \bar{y}_{ij})$  é uma solução ótima para o problema estabelecido, apenas se:

$$\sum_{k=1}^H \sum_{l=k}^L q_{ik,jl} = U_{ij} \bar{y}_{ij} \quad \text{para } i=1,\dots,C; j=1,\dots,H \quad (15)$$

Se  $y_{ij} = 0$ , todos os  $q_{ik,jl}$  para  $k=1,\dots,L$  e  $l=k,\dots,L$ , são nulos, e a expressão acima permanece válida. Por outro lado, se  $y_{ij} > 0$  e

$$\sum_{k=1}^H \sum_{l=k}^L q_{ik,jl} \leq U_{ij} \bar{y}_{ij} \quad \text{para } i=1,\dots,C; j=1,\dots,H \quad (16)$$

então, como a restrição de integralidade foi retirada,  $\bar{y}_{ij} = y_{ij}$ .

Desta maneira, o valor da função objetivo do problema relaxado é também diminuído. O valor ótimo, então, ocorre quando o problema linear inteiro não relaxado tem como restrições, um conjunto de igualdades estritas. Este teorema foi proposto por Balinski em 1961 para o chamado Problema de Transporte de custos fixos, do qual o modelo de P.L.I. do mínimo número de equipamentos é um caso especial [3].

Então:

$$\bar{y}_{ij} = 1/U_{ij} \sum_{k=1}^H \sum_{l=k}^L q_{ik,jl} \leq U_{ij} \bar{y}_{ij} \quad \text{para } i=1,\dots,C; j=1,\dots,H \quad (17)$$

Essa expressão assegura que os valores de  $\bar{y}_{ij}$  serão nulos quando o "match"  $(c_i, h_j)$  não é implementado pela rede de trocadores.

Substituindo  $\bar{y}_{ij}$  pela expressão (17), a função objetivo do problema linear inteiro relaxado pode ser escrita como:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^H \frac{1}{U_{i,k}} \sum_{k=1}^L \sum_{l=1}^L q_{ik,jl} \quad (18)$$

Adotando valores muito elevados para os coeficientes de custo da função objetivo (para se evitar associações proibidas do ponto de vista termodinâmico), o somatório pode ser estendido a todas as rotas possíveis.

Agora, o problema linear inteiro relaxado pode ser escrito como um problema de transporte passível de ser resolvido pelos métodos da Programação Linear, como o método Simplex:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^H \sum_{k=1}^L \sum_{l=1}^L C_{ik,jl} q_{ik,jl} \quad (19)$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^H \sum_{l=1}^L q_{ik,jl} = a_{i,k} \quad , \quad i=1,\dots,C \quad ; \quad k=1,\dots,L \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^H \sum_{k=1}^L q_{ik,jl} = b_{j,l} \quad , \quad j=1,\dots,H \quad ; \quad l=1,\dots,L \quad (21)$$

com:

$$q_{ik,jl} \geq 0 \quad , \quad \forall(i,j,k,l) \quad (22)$$

e onde

$$C_{ik,jl} = \begin{cases} M, & \text{se } i = C \text{ e } j = H \text{ ou se } k > l \\ \frac{1}{U_{ij}} & \text{em todos os outros casos} \end{cases} \quad (23)$$

De acordo com a literatura [3], Tiplitz, em 1973, sugeriu que uma solução muito satisfatória para o problema **P.L.I.**, pode ser derivada da solução ótima obtida do problema de transporte fazendo-se:

$$y_{i,j} = 1, \quad \text{se} \quad \sum_{k=1}^L \sum_{l=1}^L q_{ik,jl} > 0 \quad (24)$$

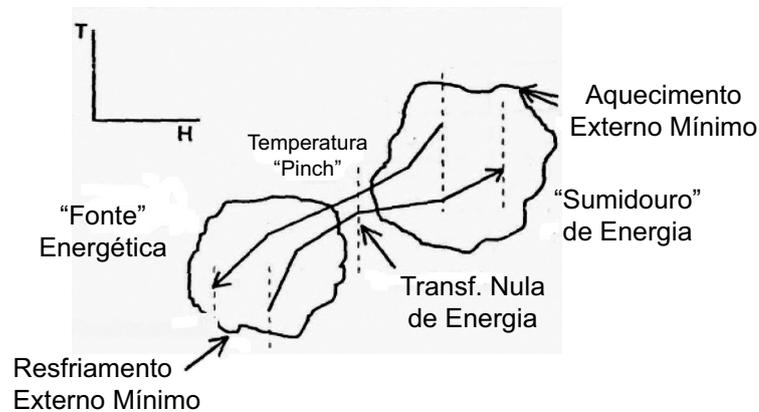
ou

$$y_{i,j} = 0, \quad \text{se} \quad \sum_{k=1}^L \sum_{l=1}^L q_{ik,jl} = 0$$

## 6. A Utilização de Grafes na Determinação do Pinch Point

Um dos pontos chaves da Metodologia “Pinch” de recuperação de energia em redes [6], é a determinação do “pinch-point” que identifica as mínimas necessidades de aquecimento e de resfriamento, para um determinado processo industrial. Este ponto denota a separação do problema energético em duas regiões distintas (Fig.2). Acima do chamado “pinch-point”, só há intervenção de utilidades para aquecimento, sendo esta região denominada “sumidouro energético”. Abaixo do “pinch-point”, só existe a intervenção de utilidades de processo para resfriamento, daí ser esta região, denominada “fonte energética” [7].

**Figura 2:** Características da Recuperação de Energia “Pinch”.



Para a determinação dos mínimos consumos energéticos, tanto de aquecimento quanto de resfriamento para o processo na unidade de craqueamento catalítico da REPLAN, é de fundamental importância, a determinação do “pinch-point”, para o qual se faz uso neste trabalho, da estrutura de grafos.

Para a utilização da estrutura de grafos, na determinação do “pinch point”, para a obtenção da máxima recuperação energética, é necessária a utilização do método dos intervalos de temperatura da Metodologia “Pinch” [6]. Esse método, garante ao processo que sempre haverá obediência à Segunda Lei da Termodinâmica, quando da transferência de energia entre correntes quentes de processo quentes e frias. Essa garantia é dada pela introdução de um potencial térmico mínimo para a transferência de energia no processo (o  $\Delta T_{\min}$ ), que pode ser um valor observado ou estimado com base em informações sobre o processo (observou-se um  $\Delta T_{\min} = 12^{\circ}\text{C}$ , na unidade de craqueamento catalítico da REPLAN). Como mencionado anteriormente, procedimento consiste em: somar, às temperaturas terminais das correntes frias de processo, o valor de  $\Delta T_{\min}/2$ ; subtrair das temperaturas terminais das correntes de processo quentes, esse mesmo valor de  $\Delta T_{\min}/2$ ; em seguida, ordenam-se todas as temperaturas, de forma crescente, eliminando-se repetições.

Com os dados da Tabela 1, pode-se construir o esquema de intervalos como aparece na Figura 3.

**Figura 3:** Intervalos de temperatura, para o processo da REPLAN.

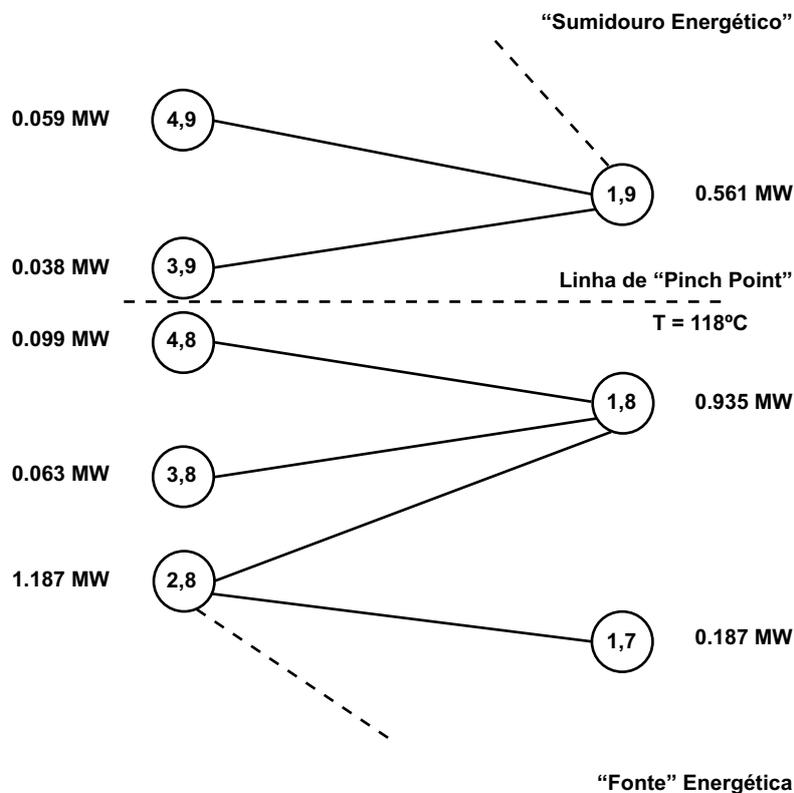
		348				Intervalos	
342							
314				320			11
279	273						10
239		(6)	2.45				9
234	(1)		(5)		240		8
204		↓210		(4)			7
164			↓170		(3)		6
124						130	5
83	↓77					(2)	4
74				↓80			3
44						↓50	2
34				↓40			1

## 7. A Estrutura de Grafos e o “Pinch Point”

Pela solução do problema do transporte, obtêm-se as cargas térmicas a serem transferidas entre as correntes de processo (caracterizando a máxima recuperação energética) e aquelas a serem transferidas pelas (ou para) utilidades.

Essas cargas térmicas são dispostas numa estrutura de grafos [2], tal como aparece na Fig. 4 (a figura mostra apenas a parte principal, uma vez que se estende para cima e para baixo, além do mostrado

**Figura 4:** Estrutura de grafos para o problema da REPLAN.



Observa-se que para os valores que permitem uma máxima recuperação energética do processo (aquecimento = 5,9 MW, quando o real observado na unidade foi 10,61 MW; e resfriamento = 16,6 MW, quando o real observado foi 21 MW) oriundos da resolução do problema do transporte da Programação Linear, o “pinch point” do processo localiza-se ao redor de 118°C.

## 7. Conclusões

O processo de aquecimento da carga de gasóleo mostrou-se adequado ao tratamento do problema através da formulação do Transporte e, estando o problema termodinamicamente bem posto (respeitando-se a Segunda Lei da Termodinâmica), sua solução pode ser tomada como a própria (ou muito

próxima dela) solução básica inicial factível, a qual pode ser obtida através de um procedimento como a Regra do Canto Noroeste.

Quanto ao menor número de equipamentos para a unidade, que atendam à máxima recuperação energética, foram encontrados nove equipamentos térmicos. Destes, cinco fazem a transferência de energia entre correntes de processo (são denominados permutadores de calor), três são resfriadores (denominados "coolers"), para resfriar as correntes de processo quentes e uma associação refere-se à carga térmica fornecida à corrente de gasóleo, pelo forno.

Em especial, a comparação com a unidade real mostrou que o número de coolers seria reduzido de quatro para três. Nota-se que a metodologia envolvida na resolução desse problema específico, pode ser um grande estímulo para o pessoal envolvido com a reestruturação da unidade ou mesmo, para o projeto de uma nova.

Mostrou-se também, que as regiões características nas quais o problema energético pode ser dividido (e que são fundamentais no uso da Metodologia "Pinch"), podem ser encontradas através da localização do "pinch point". Esta determinação é possível através da simples colocação da solução ótima do problema (obtido via formulação do transporte) numa estrutura de gratos, onde percebe-se que na região do "pinch point", não existem arcos ligando a região superior à inferior do problema, caracterizando uma distinção entre as duas regiões energéticas básicas do problema.

### **Agradecimentos**

Os autores gostariam de agradecer ao PCRAQ da REPLAN, Refinaria de Paulínia da PETROBRÁS, pela seção dos dados para este estudo, em especial ao Eng<sup>o</sup> Geraldo Márcio.

### **Referências bibliográficas**

1. BANNWART, A. C. and ROSSI, L. F. S.; "Maximum Heat Recovery in a Brazilian Oil Refinery Using a Transportation Problem Formulation". *Proceedings of the Florence World Energy Research Symposium*, pg 1017, presented at Florence, Italy, 6-8 July, 1994.
2. BAZARAA, M.S., JARVIS, J.J. and SHERALI, H.D.; "Linear Programming and Network Flows". John Wiley & Sons, 1990.
3. CERDA, J., WESTERBURG, A. W., MASON, D. and LINNHOFF, B. ; "Minimum Utility Usage in Heat Exchanger Network Synthesis - A Transportation Problem". *Chemical Engineering Science*, vol. 38, nº 3, 1983.
4. DOUGLAS, J. M.; *Conceptual Design of Chemical Processes*. McGraw-Hill International Editions Chemical Engineering Series, 1988.
5. LINNHOFF, B. and FLOWER, J. R. ; "Synthesis of Heat Exchanger Networks: I. Systematic Generation of Energy Optimal Networks". *AIChE Journal*, vol. 24, nº 4, July, 1978.

6. LUENBERGER, D.G.; "Linear and NonLinear Programming", 2<sup>nd</sup> edition, Addison-Wesley Publ. Co, 1984.
7. ROSSI, L. F. S., Otimização Energética de Redes de Trocadores de Calor - Aplicações em Engenharia de Petróleo, Alimentos e Química. - Tese de Doutorado, DE/FEM/UNICAMP, 1995.

**Republicado de Pesquisa Operacional, v.15, n. 1 e 2, pp.35-47, 1995**