

PROJETO DE ADEQUAÇÃO DOS FORNOS L-1A/B PARA ATENDIMENTO A DEMANDA AMBIENTAL E AUMENTO DE CARGA

Rodrigo Penha Andrade Rocha
Laudemiro Nogueira Júnior
Renato Vianna Chagas
Paulo Henrique Ferraz do Amaral Filho

RESUMO

Com o objetivo de adequar os fornos da Unidade C de destilação atmosférica da RPBC a um aumento de carga térmica e aos requisitos ambientais impostos pela legislação, foi realizada a troca dos queimadores convencionais existentes por modelos de baixa emissão de óxidos de nitrogênio (*low-NOx*). Em virtude das diferentes dimensões envolvidas e diferentes requisitos técnicos particulares aos novos queimadores quando comparados aos queimadores convencionais, foi necessário o projeto de uma nova câmara plena, de um novo piso e de um novo trecho final do duto de alimentação de ar preaquecido. A complexidade geométrica, o espaço reduzido e a necessidade de uma distribuição igualitária do ar de combustão entre os queimadores suscitaram a elaboração de um projeto multidisciplinar, envolvendo análise por fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*), análise estrutural por elementos finitos e modelagem geométrica 3D por maquete eletrônica. Após a implementação deste projeto no campo, foram constatados o enquadramento das emissões de NOx aos níveis desejados, o bom comportamento das chamas e uma melhoria substancial nas condições de conforto térmico e de segurança na região sob os fornos.

Palavras-chave: Fornos. Sistema de preaquecimento. Redução de emissões. CFD. Elementos finitos.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de aumento de produção de derivados, as demandas ambientais restritivas e a premissa de minimização de investimentos têm exigido das unidades de refino da Petrobras a avaliação criteriosa e, eventualmente, a adequação de seus equipamentos de forma a cumprir com esses desafios. A Unidade C da Refinaria Presidente Bernardes (RPBC) é a principal unidade de destilação atmosférica da refinaria, que atualmente processa cerca de 12500 m³/d de cru. Um cenário de aumento desta capacidade para 15000 m³/d, aliado à demanda ambiental para redução de emissões de óxidos de nitrogênio (NOx),

levaram a RPBC a solicitar a substituição dos queimadores convencionais dos fornos L-1A/B (os dois principais fornos desta unidade) por modelos de baixa emissão de NOx (*low-NOx*) e com maior liberação de calor. Para viabilizar tal substituição, foi necessária a elaboração do projeto de um novo trecho do sistema de preaquecimento de ar, incluindo dutos e câmara plena, e de um novo piso para os referidos fornos.

Queimadores *low-NOx* trabalham com excesso de ar menor do que o utilizado em queimadores convencionais, sendo a distribuição de ar entre os queimadores um fator crítico para a qualidade da combustão e, conseqüentemente, para a garantia do nível de emissões de poluentes. A criticidade deste tipo de equipamento no que diz respeito à distribuição de ar entre queimadores, aliada às restrições físicas da área e à necessidade de uma solução para a suportaçãõ do conjunto formado pelo piso e pela câmara plena demandaram um projeto multidisciplinar, com análise de fluidodinâmica computacional (CFD) para concepção da geometria e o uso do Método dos Elementos Finitos na verificação mecânica dos componentes, sendo ambos suportados pela modelagem 3D do sistema.

Os fornos L-1A/B operam desde dezembro de 2016 com o novo arranjo, sendo constatado o enquadramento das emissões de NOx aos limites especificados pela RPBC. Somam-se a isso considerável redução da temperatura ambiente sob o piso do forno e do descongestionamento dessa região, tornando-a bem mais segura e confortável para o operador.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar o projeto multidisciplinar elaborado para a adequação dos fornos L-1A/B da Unidade C da RPBC, de forma a atender à demanda descrita, em alinhamento às diretrizes de Segurança, Meio Ambiente e Saúde (SMS) da Petrobras não só no que se refere à redução de emissões atmosféricas, mas também trazendo benefícios em aspectos de segurança e saúde.

3 METODOLOGIA

Uma vez definidas as condições de processo e as limitações de emissões a serem atendidas, foi adotada a seguinte metodologia para a execução do projeto:

- a) **consulta à documentação:** nesta etapa, os diversos documentos referentes ao projeto original e às modificações ocorridas até então no equipamento são estudados de forma a tomar ciência da configuração vigente do equipamento, bem como das suas condições de projeto;
- b) **visita técnica à unidade:** nesta etapa é realizada uma visita ao equipamento no campo com os objetivos de (i) dirimir incertezas em relação às informações contidas na documentação, principalmente referentes a dimensões; (ii) observar as diversas restrições geométricas a serem atendidas; (iii) verificar condições de operação, como a qualidade da combustão; (iv) verificar as condições de acesso para desmontagem e montagem do novo trecho;
- c) **especificação dos novos queimadores:** nesta etapa, alguns fornecedores de queimadores são consultados para especificação de modelos de queimadores que atenderão às demandas de liberação térmica e de emissões atmosféricas. A especificação dos novos modelos de queimadores traz consigo a necessidade da definição do novo círculo de queimadores para os fornos L-1A/B, que são do tipo cilíndrico vertical, e o consequente projeto de um novo piso e de uma nova câmara plena;
- d) **projeto fluidodinâmico:** esta etapa consiste na concepção geométrica do conjunto formado pelo trecho final do sistema de preaquecimento de ar do forno (sistema de PAF) e pela câmara plena. Aqui faz-se necessária a integração entre a modelagem de maquetes eletrônicas em 3D com simulações de CFD, de forma que o arranjo final não só promova uma distribuição de ar adequada entre os diversos queimadores, mas também atenda às diversas restrições geométricas levantadas através da documentação e da visita técnica. Esta etapa é iterativa e demanda um tempo relativamente longo, uma vez que diversos modelos geométricos 3D e simulações computacionais podem ser necessários até que se chegue à solução considerada como a mais adequada. Também nesta etapa é especificado o isolamento térmico visando a uma temperatura de chaparia adequada;
- e) **projeto mecânico:** uma vez concebido o arranjo

pelo projeto fluidodinâmico, é realizado o projeto mecânico dos dutos, do piso e da câmara plena, visando respeitar o mais fielmente possível o arranjo definido, sendo o método dos elementos finitos empregado para o cálculo de tensões e deformações. Além disso, devem ser observadas as restrições geométricas e de acesso. Os aspectos de desmontagem e montagem são considerados visando sempre maximizar os trabalhos pré-parada e minimizar os trabalhos a serem realizados durante a parada;

- f) **emissão da documentação e pós-projeto:** por fim, são emitidos todos os documentos necessários para as etapas de engenharia de detalhamento, construção e montagem, além da prestação do devido apoio a todas estas etapas.

4 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Segue um breve descritivo dos fornos e de seu sistema de preaquecimento de ar.

4.1 FORNOS

Os dois fornos em questão são os L-1A/B, cujo serviço é o aquecimento e a vaporização parcial do petróleo, carga da torre de destilação atmosférica. Tais fornos são do tipo cilíndrico vertical, com dupla fileira de tubos na parede, com seção de convecção vertical e com sistema de preaquecimento de ar de combustão (sistema de PAF) compartilhado entre os dois fornos. Cada forno possui oito queimadores distribuídos em arranjo circular em seu piso.

4.2 SISTEMA DE PRAQUECIMENTO DE AR DE COMBUSTÃO (SISTEMA DE PAF)

Os fornos L-1 A/B utilizam um sistema de PAF compartilhado, ou seja, utilizam os gases de combustão de ambos os fornos para aquecer o ar de combustão, que será destinado aos queimadores dos mesmos. O sistema consiste em: (i) um trocador de calor rotativo (PAF), (ii) dois ventiladores, (iii) uma rede de dutos de gases e de ar; (iv) duas câmaras plenas, uma para cada forno; (v) chaminé independente. A Figura 1 traz o esquema do sistema de PAF dos fornos L-1A/B.

4.2.1 CÂMARA PLENA E SISTEMA DE COMBUSTÃO

Cada forno possui oito queimadores situados em seu piso, cujas entradas de ar se encontram inseridas no interior da câmara plena. Na câmara plena, o ar preaquecido é

conduzido até a admissão de ar dos queimadores para ser utilizado na combustão. Essa câmara situa-se imediatamente abaixo do piso do forno e tem o objetivo de receber o ar preaquecido vindo do PAF e distribuí-lo da forma mais uniforme possível entre os queimadores.

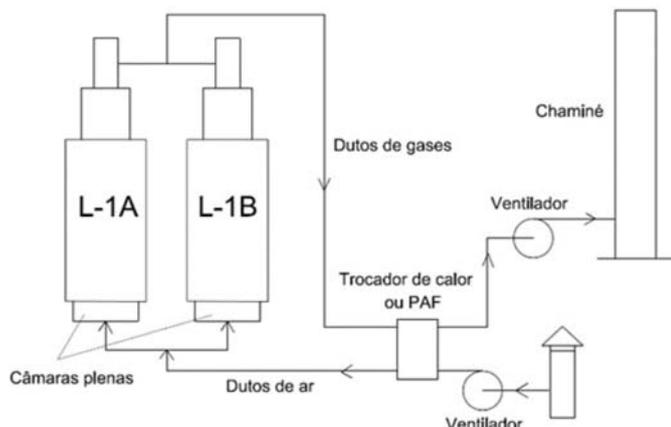


Figura 1 – Esquema do sistema de preaquecimento de ar de combustão dos fornos L-1A/B.

Fonte: OS AUTORES, 2018.

Antes das modificações propostas neste projeto, a câmara plena possuía geometria complexa, com área de seção livre variável, onde a alimentação do ar se dava por duas entradas laterais e por um duto de seção circular com entrada no centro da câmara plena. O arranjo 3D desta configuração pode ser visto nas Figuras 2 e 3. Na Figura 2, com observador situado em posição acima do arranjo, são representados os dutos de ar quente, o conjunto formado pelo piso do forno e pela câmara plena com os furos ocupados pelos queimadores, as colunas de concreto presentes na área e a câmara de radiação do forno, esta última representada transparente para visualização do piso e da câmara plena. Na Figura 3, com o observador situado num nível abaixo da elevação do arranjo, podem ser visualizadas as entradas laterais e central de ar na câmara plena.

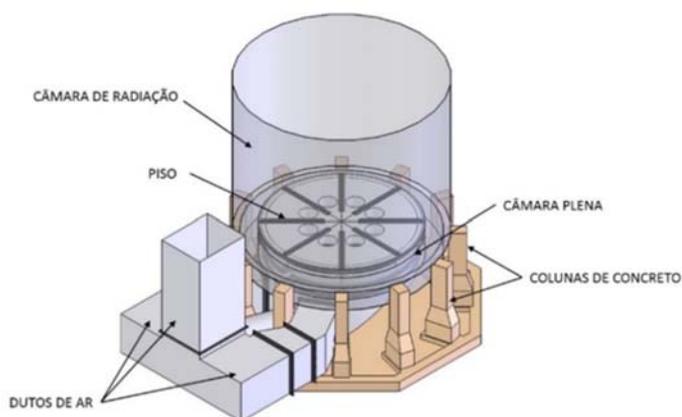


Figura 2 – Maquete 3D da configuração antes das modificações - observador acima do arranjo.

Fonte: OS AUTORES, 2018.

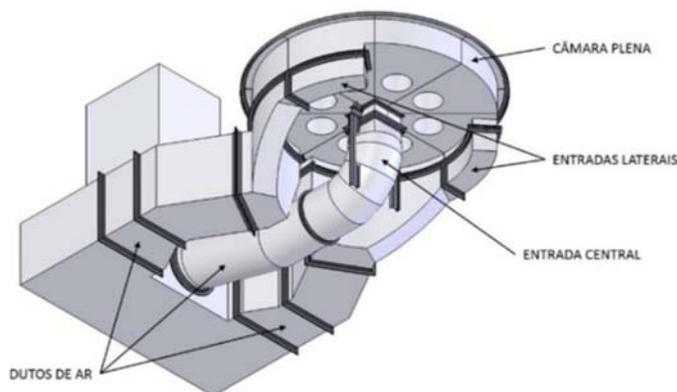


Figura 3 – Maquete 3D da configuração antes das modificações - observador abaixo do arranjo, mostrando as entradas de ar na câmara plena.

Fonte: OS AUTORES, 2018.

O conjunto formado pela complexa câmara plena e pelo duto circular deixava a região sob o piso do forno demasiadamente congestionada, o que dificultava a evasão do operador em caso de emergência. Esse congestionamento, aliado ao isolamento pouco eficiente, contribuía para a elevada temperatura ambiente nessa região, levando a falhas constantes de componentes eletrônicos dos módulos de ignição, além de grande desconforto térmico. Soma-se a isso o fato de que não se verificava visualmente uma qualidade de combustão uniforme entre os queimadores.

5 PROJETO DAS MODIFICAÇÕES

5.1 ESCOPO DO PROJETO

A necessidade da substituição dos queimadores convencionais por modelos de baixa emissão de NO_x (*low-NO_x*) levou à definição de um novo círculo de queimadores pelo fato desses modelos terem dimensões diferentes dos queimadores utilizados até então nos fornos L-1A/B. A modificação do círculo de queimadores demanda, então, o seguinte escopo:

- o projeto de uma nova câmara plena, que comportará os novos queimadores;
- o projeto de um novo trecho final do duto de ar preaquecido, que alimentará a nova câmara plena;
- o projeto de um novo piso.

Apesar da situação mais crítica que a original (queimadores maiores e com maior liberação de calor), perseguiu-se um projeto que proporcionasse distribuição de ar uniforme entre os queimadores e descongestionasse a região sob o piso do forno, possibilitando o trânsito e a permanência de pessoas nessa área. Além disso, o projeto deveria contemplar as restrições físicas existentes na área e ter sua montagem exequível.

5.2 DEFINIÇÃO DAS NOVAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Considerando as condições de processo para o forno referentes ao novo cenário de processamento de 15000 m³/d pela Unidade C, procede-se com simulações analíticas para a troca térmica no forno e com o balanço de energia do conjunto formado pelos fornos e pelo sistema de PAF. Chega-se assim às seguintes condições do ar preaquecido:

- a) vazão mássica de ar para cada forno: 10,34 kg/s;
- b) temperatura do ar preaquecido: 330°C.

Para as condições acima, a vazão por queimador é de 1,293 kg/s, caso a distribuição seja uniforme. Logo, deve-se perseguir uma configuração tal que minimize o desvio das vazões individuais de cada queimador em relação a esse valor médio.

5.3 CONCEPÇÃO GEOMÉTRICA COM ANÁLISE POR CFD

Com o intuito de conceber uma geometria da câmara plena que garantisse a desejada distribuição uniforme de ar entre queimadores e que atendesse às restrições físicas da área, foi realizada a simulação do escoamento do ar por fluidodinâmica computacional (CFD) em maquetes eletrônicas rigorosamente geradas em 3D com o programa SolidWorks. Para as simulações em CFD, foi utilizado o programa ANSYS Fluent, que é baseado no método dos volumes finitos.

5.3.1 MODELO COM DUAS ENTRADAS LATERAIS

Primeiramente, foi simulada uma configuração com duas entradas laterais e área de seção variável, semelhante àquela instalada na área, mas com algumas diferenças geométricas e sem o duto central adicional. O objetivo dessa simulação era entender como se daria o escoamento do ar quente nesse tipo de arranjo e verificar a distribuição entre os queimadores, já com as novas condições de operação. Foi considerada a simetria da geometria para a construção do domínio computacional, mostrado na Figura 4 (sem os queimadores para melhor visualização da posição dos mesmos). Devido à simetria, apenas quatro queimadores e uma entrada lateral de ar são representados. Esse domínio foi então discretizado por uma malha de volumes hexaédricos.

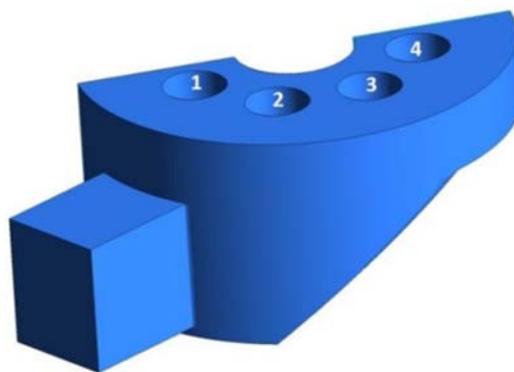


Figura 4 – Domínio computacional utilizado para a simulação de câmara plena com duas entradas laterais.

Fonte: OS AUTORES, 2018.

Nas simulações por CFD, foi adotado o modelo *k-ε* realizável para modelagem da turbulência, com tratamento de parede melhorado (*enhanced wall treatment - EWT*) para modelagem da equação para ϵ perto da parede (ANSYS, 2013). Os queimadores foram modelados como meios porosos com parâmetros ajustados de forma a prover a perda de pressão adequada, conforme dados do fabricante do queimador. A região da entrada do ar no queimador foi modelada conforme desenho do fabricante.

Os resultados numéricos da vazão mássica de ar por queimador, obtidos para a configuração descrita, são apresentados na Tabela 1. Os queimadores estão numerados de 1 a 4 conforme indicado na Figura 4. Os resultados indicam considerável desvio das vazões individuais dos queimadores em relação à média esperada para distribuição uniforme, chegando a aproximadamente 5 % de desvio. Se considerarmos o queimador que mais recebe ar e o que menos recebe, os resultados levaram a uma diferença superior a 8 % entre eles.

Na Figura 5, encontram-se as linhas de corrente obtidas com a simulação segundo a vista superior do domínio. Observa-se que o escoamento apresenta alguns caminhos preferenciais, além da presença de vórtices na região dos queimadores 1 e 3, que são os que menos recebem ar.

Em virtude da distribuição de ar não muito boa obtida pela análise por CFD, procurou-se investigar uma outra concepção geométrica que atendesse melhor a esse critério e que, se possível, trouxesse outros ganhos, como o descongestionamento da região sob o forno.

Tabela 1 – Resultados obtidos por CFD para a vazão mássica (kg/s) de ar em cada queimador e respectivo desvio em relação à média (1,293 kg/s), segundo geometria com duas entradas laterais.

Queimador	Vazão (kg/s)	Desvio
1	1,272	-1,6%
2	1,343	3,9%
3	1,230	-4,9%
4	1,326	2,6%

Fonte: OS AUTORES, 2015.

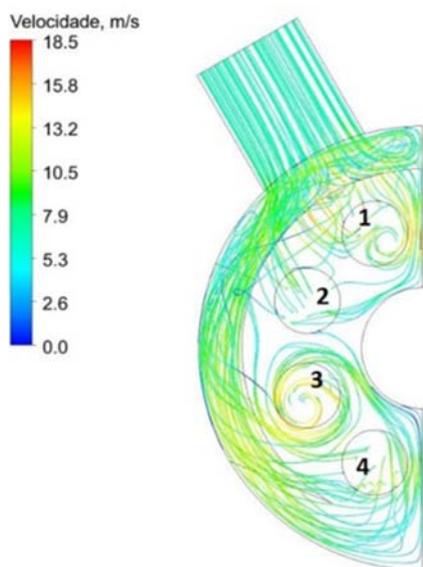


Figura 5 – Linhas de corrente referente à simulação de câmara plena com duas entradas laterais. Vista superior.

Fonte: OS AUTORES, 2015.

5.3.2 MODELO CILÍNDRICO COM ENTRADA ÚNICA CENTRAL

Na tentativa de se obter uma geometria que conciliasse uma boa distribuição de ar entre os queimadores com a liberação de área na região sob o piso do forno, partiu-se para a concepção de um modelo geometricamente mais simples que o instalado até então: um modelo cilíndrico com uma entrada única central pela face inferior da câmara plena.

O arranjo proposto está representado nas Figuras 6 e 7. Pelo fato de a entrada na câmara plena ser única, a modificação se estendeu desde o final do trecho vertical do duto de ar quente, onde havia uma bifurcação, mostrada nas Figuras 2 e 3. O novo trecho é representado pela cor cinza nas Figuras 6 e 7.

Algumas restrições físicas presentes na área impuseram ao projeto algumas características geométricas para tornar a montagem exequível no campo durante a janela de parada

programada de manutenção da unidade. O reduzido espaçamento entre as colunas de concreto limitou as dimensões da seção reta do novo trecho horizontal do duto, levando a velocidades de ar acima dos valores recomendados. Além disso, devido à baixa elevação do piso do forno, o comprimento do trecho reto vertical imediatamente à montante da câmara plena é bastante reduzido. Esses dois fatores influenciaram negativamente em relação à distribuição de ar entre os queimadores e somente uma análise fluidodinâmica permitiria avaliar se tal arranjo atingiria seu objetivo.

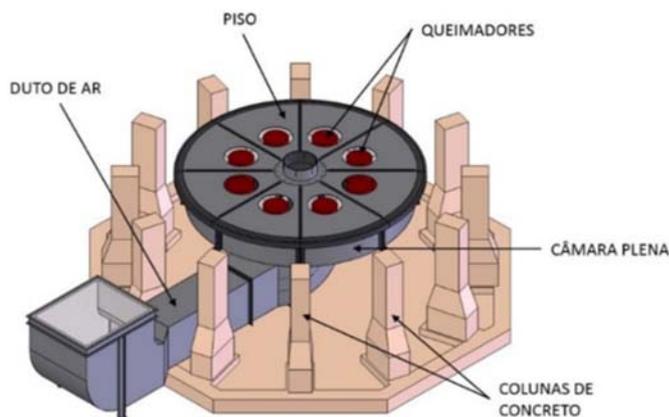


Figura 6 – Maquete 3D da proposta para a câmara plena cilíndrica - perspectiva.

Fonte: OS AUTORES, 2018.

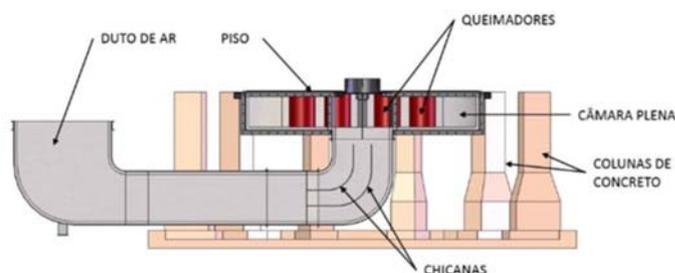


Figura 7 – Maquete 3D da proposta para a câmara plena cilíndrica - corte.

Fonte: OS AUTORES, 2018.

Assim como no arranjo com duas entradas laterais, o domínio computacional utilizado para a simulação por CFD do novo arranjo se valeu de seu plano de simetria. Da mesma forma, os mesmos modelos de turbulência e de modelagem na parede (*k-ε* realizável e EWT, respectivamente) foram adotados.

Os resultados numéricos da vazão mássica de ar por queimador, obtidos para a configuração com entrada única, são apresentados na Tabela 2. Os queimadores seguem a mesma numeração considerada no arranjo anterior. Os resultados mostram excelente distribuição de ar, com diferença desprezível de vazão entre queimadores.

A Figura 8 mostra as linhas de corrente obtidas com a simulação segundo a vista superior do domínio. É possível observar que, após a entrada do ar quente na câmara plena, o escoamento se distribui radialmente de forma aproximadamente homogênea, sendo que uma fração majoritária desse escoamento contorna de início os corpos dos queimadores, seguindo em direção à parede cilíndrica lateral da câmara plena. Após esta parte do escoamento chocar-se com a referida parede, ocorre uma recirculação, seguida da entrada nos queimadores.

Como já mencionado e como pode ser observado ao compararem-se as Figuras 5 e 8, a velocidade de entrada do ar no arranjo com entrada única central é bem superior à do arranjo com duas entradas laterais. Tal fator, aliado ao pequeno comprimento reto à montante da entrada na câmara plena, contribuiriam para prejudicar a equidade na distribuição entre os queimadores para o arranjo com entrada única central. No entanto, creditam-se à adoção de chicanas e à simetria aproximadamente axial da nova câmara plena os bons resultados obtidos.

Tabela 2 – Resultados obtidos por CFD para a vazão mássica (kg/s) de ar em cada queimador e respectivo desvio em relação à média (1,293 kg/s), segundo geometria cilíndrica.

Queimador	Vazão (kg/s)	Desvio
1	1,294	0,12%
2	1,291	-0,12%
3	1,293	0,04%
4	1,292	-0,04%

Fonte: OS AUTORES, 2015.

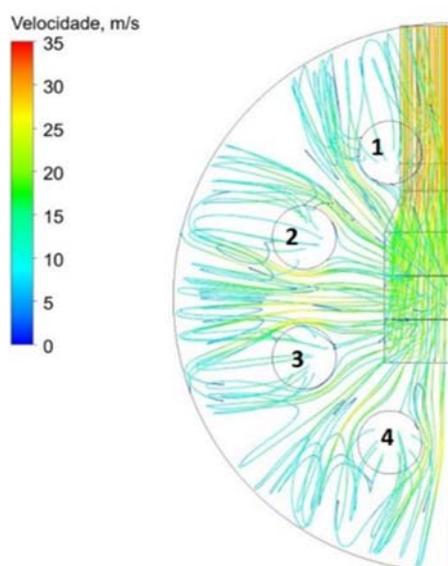


Figura 8 – Linhas de corrente referente à simulação de câmara plena do tipo cilíndrico. Vista superior.

Fonte: OS AUTORES, 2015.

Com a mesma definição de malha para a qual os resultados da Tabela 2 foram reproduzidos (para a qual houve convergência numérica), foi gerada uma nova geometria onde todo o domínio foi simulado, sem considerar plano de simetria. Como esperado, os bons resultados se confirmaram; o maior desvio observado dentre os oito queimadores foi de 0,30% em relação à média.

Os bons resultados numéricos obtidos pela análise por CFD motivaram então a adoção do arranjo cilíndrico com entrada central única para o projeto da nova câmara plena. Soma-se à boa distribuição de ar entre os queimadores o fato de que esse novo arranjo proporcionaria o descongestionamento da região sob o piso do forno, permitindo o livre acesso aos queimadores e viabilidade do trânsito de pessoas, contribuindo positivamente para a segurança daqueles que estiverem nesta região.

Além disso, foi especificado isolamento térmico interno com painéis de fibra cerâmica de classificação grau 12 da norma ASTM C892-10 (2010) com 51 mm de espessura. Com tal isolamento, a temperatura externa da chapa da câmara plena e do trecho de duto foi calculada em 52°C, proporcionando uma menor temperatura na região sob piso o forno, tornando o ambiente mais confortável do que a situação encontrada até então no campo.

5.4 PROJETO MECÂNICO

Devido ao exíguo prazo entre a elaboração do projeto da nova câmara plena e a parada da unidade, foi necessário elaborar um projeto mecânico completo, que possibilitasse a contratação da fabricação das partes novas dos fornos, ficando apenas alguns detalhes construtivos para serem detalhados pelo fornecedor.

Durante a fase inicial do projeto foram contatados os principais fornecedores de queimadores, sendo que apenas dois apresentaram uma proposta para fornecimento. As principais diferenças entre as soluções propostas pelos fabricantes de queimadores foram o diâmetro do círculo dos queimadores e o sistema de fixação dos mesmos. Enquanto um dos queimadores propostos tinha seu peso sustentado pelo piso do forno, o outro deveria ser suportado pela chapa do fundo da câmara plena. O projeto foi realizado de modo a permitir sua adaptação para ambos os casos.

Outro condicionante foi a distância entre as colunas de concreto de sustentação do forno, que limitou o tamanho dos módulos pré-fabricados. Pelo estudo com a maquete

3D conclui-se que a câmara plena deveria ser dividida em oito setores circulares para serem unidos, por parafusos, sob o piso do forno (Figura 9).

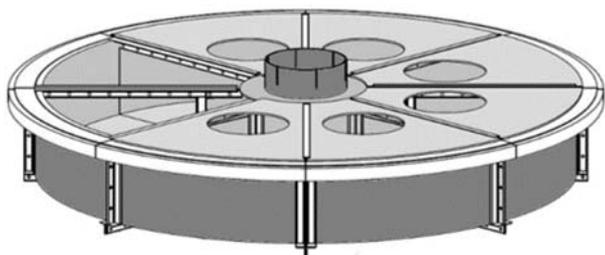


Figura 9 – Câmara plena dividida em oito setores.

Fonte: OS AUTORES, 2015.

5.4.1 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

No dimensionamento do piso de um forno e de sua câmara plena é fundamental conhecer a deformação dos seus componentes, uma vez que uma pequena inclinação de um queimador pode levar a um desvio na chama que pode provocar incidência sobre os tubos. Dada a complexidade da geometria, foi necessário utilizar o cálculo por Elementos Finitos (utilizando o programa ANSYS) no dimensionamento da estrutura da câmara plena e das chapas do piso.

Foram elaborados dois modelos utilizando elementos de casca, um para cada uma das soluções propostas pelos fabricantes de queimador, sendo utilizados elementos de casca lineares (SHELL181) com tamanho médio de 40 mm. Como as tensões atuantes encontradas foram inferiores à tensão de escoamento dos materiais na temperatura de operação, as análises foram lineares elásticas com as propriedades dependentes da temperatura, obtidas no ASME BPVC seção II parte D. Como algumas das chapas são revestidas com isolamento térmico, as densidades foram alteradas de modo que a massa calculada para estes componentes correspondesse à soma das massas da chapa e do isolamento. O peso dos queimadores foi aplicado ou na chapa do piso ou no fundo da câmara plena, em função dos modelos propostos pelos diferentes fabricantes dos queimadores.

Como toda a periferia da câmara plena é simplesmente apoiada em uma cantoneira calandrada, foi aplicada uma restrição ao deslocamento na direção vertical nos nós correspondentes. Foram também aplicadas condições de contorno de restrição ao deslocamento na direção vertical na região dos pilares de apoio, situados próximos à entrada de ar na câmara plena. No plano de simetria foram aplicadas as restrições ao deslocamento na direção z e à rotação em torno do eixo x (a configuração dos eixos

encontra-se na Figura 10). Para ambos os modelos foi acrescentado um caso de carga correspondente à condição de içamento, que se caracteriza pela ausência dos queimadores, pela ausência dos pilares de apoio e pela aplicação das cargas localizadas de içamento.

Na Figura 10 é mostrado o campo de deslocamentos verticais no piso e na câmara plena para o caso em que o queimador é sustentado pela chapa do piso. Pode-se observar que o deslocamento vertical da chapa do piso na região do queimador varia entre 1,2 mm e 2,7 mm, o que corresponde a uma inclinação do queimador de apenas 0,2°, que é satisfatória. Todas as tensões atuantes ficaram abaixo dos valores admissível pelo código de projeto estrutural AISC 360.

A análise para o caso em que o queimador é sustentado pelo fundo da câmara plena mostrou deslocamentos menores que o caso citado acima, configurando, portanto, uma situação de menor criticidade.

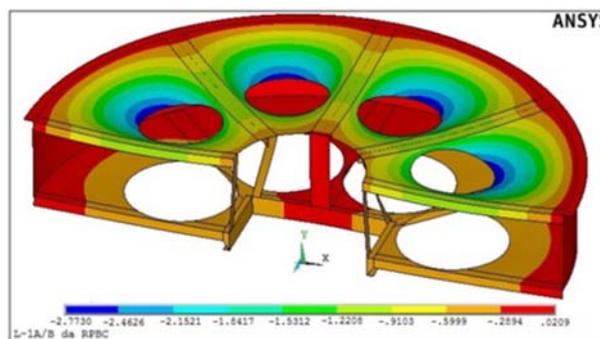


Figura 10 – Deslocamento vertical para o queimador suportado pela chapa do piso do forno.

Fonte: OS AUTORES, 2015.

6 DESEMPENHO NO CAMPO

A montagem do conjunto formado pela nova câmara plena, piso e trecho final do duto de ar foi executada na parada da unidade ocorrida em novembro de 2016. A modularização da câmara plena permitiu o transporte dos componentes e bem como sua montagem compatíveis com o prazo previsto para a parada. Os oito módulos foram unidos sobre apoios no piso da unidade sob os fornos e posteriormente o conjunto foi elevado para sua posição por macacos hidráulicos. A simplicidade de montagem, evitando trabalhos a quente, contribuiu para a minimização de exposição ao risco durante a intervenção.

A unidade partiu em dezembro de 2016 e, desde então, cada um dos fornos L-1A/B tem operado com vazão aproximadamente na faixa entre 3500 e 4200 m³/d, correspondente a uma carga de processamento em torno

de 12000 a 13000 m³/d da Unidade C, tipicamente. No entanto, durante um período de alguns dias, o forno L-1B foi submetido a uma carga de aproximadamente 4500 m³/d, o que significa uma aproximação do cenário de carga máxima já que, segundo a RPBC, quando a Unidade C estivesse em 15000 m³/d, cada forno L-1A/B deveria estar aproximadamente entre 4500 e 5000 m³/d, a depender das propriedades do petróleo.

A verificação quantitativa da boa distribuição de ar entre os queimadores no campo, conforme prevista pelas simulações por CFD, não é possível, pois a vazão de ar admitida por cada queimador não é medida. No entanto, segundo informado pela RPBC, a análise visual das chamas mostra boa qualidade de combustão e não evidencia diferença significativa entre os queimadores. Também não foram observados quaisquer indícios de incidência de chama nos tubos.

Em relação ao abatimento de emissões de NO_x, os dados constantes no Relatório de Monitoramento de Emissões Atmosféricas (RMEA), emitido em abril de 2017 (SGS AIR SERVICES, 2017), mostram que o teor deste poluente apresentou valor médio de 101,4 mg/Nm³ (corrigido a 3% vol. O₂), bem abaixo, portanto, do valor máximo de 290 mg/Nm³ especificado pela RPBC, o que sugere que os queimadores estão operando com quantidade de ar apropriada.

Além do abatimento de poluentes, outros dois resultados positivos de SMS devem ser aqui ressaltados: (i) aumento do conforto térmico na região sob o forno devido à redução da temperatura ambiente; (ii) aumento da segurança na mesma região em virtude do descongestionamento da área, possibilitando rotas de fuga no caso de uma emergência.

7 CONCLUSÃO

Em virtude da necessidade da substituição dos queimadores convencionais dos fornos L-1A/B da Unidade C da RPBC por modelos *low*-NO_x para atendimento às restrições ambientais e ao aumento de carga, fez-se necessária a elaboração de um projeto multidisciplinar envolvendo análise fluidodinâmica do escoamento do ar preaquecido, análise estrutural por elementos finitos e modelagem em maquete eletrônica 3D.

Como a distribuição uniforme de ar de combustão entre os queimadores é um fator crítico para a boa operação com modelos *low*-NO_x, o projeto básico da câmara plena incluiu análise por CFD do escoamento do ar preaquecido. Os

resultados numéricos mostraram que a concepção de uma câmara plena cilíndrica com entrada única e central possibilitaria, em princípio, excelente distribuição de ar entre os queimadores, endossando a escolha por este arranjo.

A análise mecânica por elementos finitos da estrutura, das chapas do fundo da câmara plena e das chapas do piso do forno resultou em um projeto estrutural do conjunto com a rigidez necessária para garantir o correto posicionamento dos queimadores.

Em virtude do congestionamento da área, com espaços reduzidos para o encaminhamento de dutos, e em virtude da necessidade da avaliação e da visualização de diversos dispositivos, como portas de visitas, janelas de observação, chicanas, etc., a utilização de maquetes eletrônicas 3D mostrou-se uma ferramenta essencial para o rigoroso dimensionamento das diversas partes projetadas, minimizando a ocorrência de interferências e contribuindo para a execução da montagem em prazo exequível.

Após a partida dos fornos, a análise visual das chamas mostra que não há diferença significativa na qualidade da combustão entre os queimadores, sugerindo que o objetivo de distribuição uniforme de ar foi alcançado. Também não foram observados quaisquer indícios de incidência de chama nos tubos.

A medição de emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), após a implantação deste projeto, mostrou-se bem abaixo do limite estabelecido pela RPBC, o que também é um indicativo de sucesso na concepção do arranjo.

O projeto da adequação dos fornos L-1A/B aqui descrito está em pleno alinhamento com as diretrizes de SMS da Petrobras, uma vez que, além do aspecto da redução de emissões de NO_x para a atmosfera, foram obtidos resultados positivos tanto no que se refere à saúde (conforto térmico) quanto à segurança daqueles que venham a desempenhar tarefas na região sob o piso do forno, com este em operação.

ABSTRACT

In order to adapt the fired heaters of Unit C (atmospheric distillation) of RPBC to an increase of heat absorption and the environmental requirements imposed by the legislation, the exchange of the existing conventional burners was done by models of low emission of oxides of nitrogen (*low*-NO_x models). Due to the different dimensions involved and different

technical requirements peculiar to the new burners when compared to conventional burners, it was necessary to design a new plenum, a new floor and a new end section of the preheated air supply duct. The geometric complexity, the reduced space and the need for an equal distribution of the combustion air between the burners led to the elaboration of a multidisciplinary design, involving fluid dynamics analysis by CFD, structural analysis by the finite element method and 3D modeling. After the implementation in the field, we verify NOx emissions down to desired levels, good behavior of the flames and a substantial improvement in the conditions of thermal comfort and safety in the region under the heaters.

Keywords: Fired heaters. APH system. Emissions reduction. CFD. Finite elements.

REFERÊNCIAS

AISC International. **AISC 360 -10:** Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, IL: AISC International, 2010.

ANSYS. **ANSYS Fluent Theory Guide, Release 15.0.** Canonsburg, PA, 2013.

ASME. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code:** Section II – Materials. New York, NY, 2015.

ASTM International. **ASTM C892-10:** Standard specification for high-temperature fiber blanket thermal insulation. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010. DOI: 10.1520/C0892-10

SGS AIR SERVICES. **Relatório de monitoramento de efluentes gasosos da chaminé do PAF L-1A e L-1B.** Referência: OS 0946/13.85, 2017.

Rodrigo Penha Andrade Rocha

Graduação (1997) em Engenharia Mecânica pela UFRJ.
Mestrado (1999) em Engenharia Mecânica pela COPPE/UFRJ. Doutorado (2007) em Engenharia Mecânica pela COPPE/UFRJ. Petrobras. PRGE/ENG/EETC/EBET. Rio de Janeiro, RJ – E-mail: rpenha@petrobras.com.br

Laudemiro Nogueira Júnior

Graduação (1986) em Engenharia Mecânica pela UFRJ.
Mestrado (2000) em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ. Petrobras. PRGE/ENG/EETC/EBET – Rio de Janeiro, RJ. E-mail: lnogueira@petrobras.com.br

Renato Vianna Chagas

Curso Técnico (2006) em Mecânica pelo CEFET-RJ.
Graduação (2012) em Engenharia Mecânica pela Fund. Téc. Educ. Souza Marques. Petrobras. PRGE/ENG/EETC/EBET – Rio de Janeiro, RJ. E-mail: renato.vianna@petrobras.com.br

Paulo Henrique Ferraz do Amaral Filho

Graduação (2002) em Engenharia Mecânica pela UNESP–FEB–Campus Bauru. Mestrado (2005) em Engenharia Industrial pela UNESP–FEB–Campus Bauru. Petrobras. REPLAN/EIBR – Paulínia, SP. E-mail: pferraz@petrobras.com.br