

outros pares de ciclones convencionais: $CC_1 - CC_2$, $CC_3 - CC_4$, $CC_5 - CC_6$, $CC_7 - CC_8$, $CC_9 - CC_{10}$, $CC_{11} - CC_{12}$, $CC_{13} - CC_{14}$, $CC_{15} - CC_{16}$, $CC_{23} - CC_{25}$ e $CC_{24} - CC_{25}$, (Apêndice F).

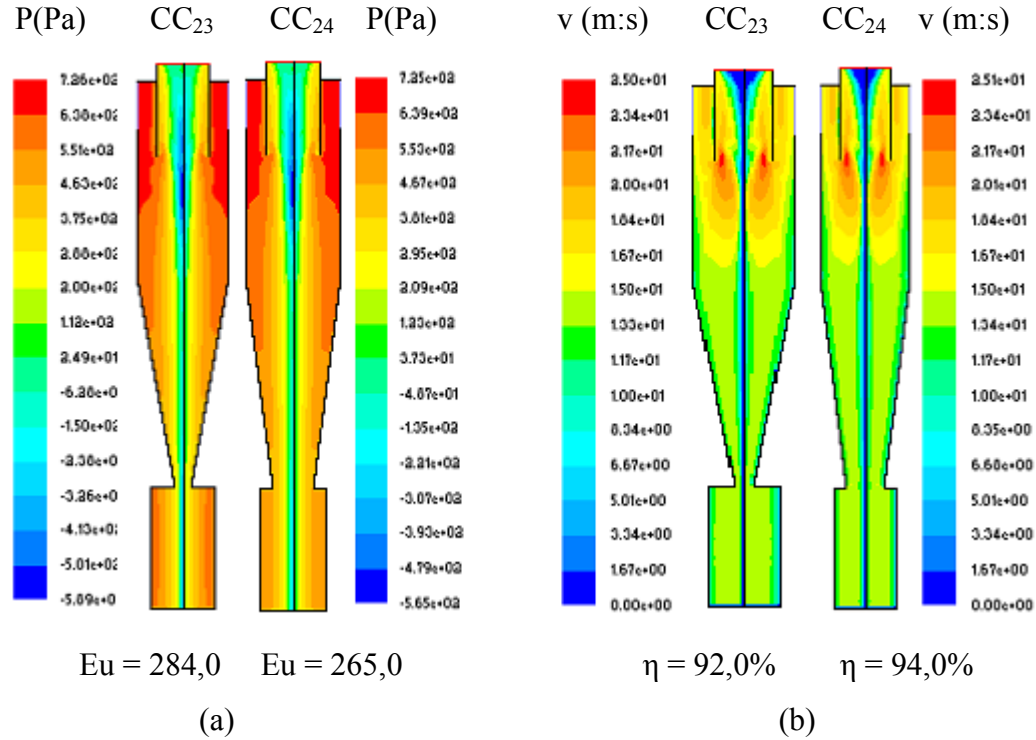


Figura 4.16 – Perfis de pressões (a) e de velocidades tangenciais (b) para os CC_{23} e CC_{24}

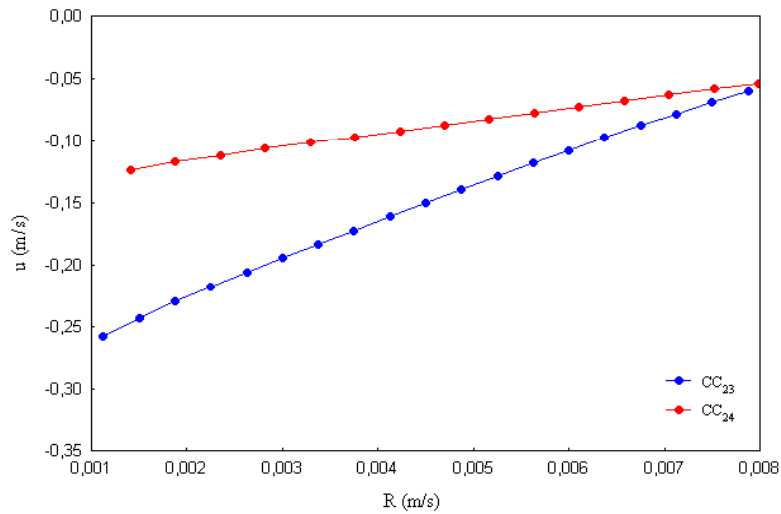


Figura 4.17 – Perfil radial a 20 cm da base dos ciclones convencionais CC_{23} e CC_{24}

Para os ciclones filtrantes o efeito de D_u pode ser observado nos resultados das simulações apresentados nas Figuras 4.18 e 4.19, a seguir.

A Figura 4.18 mostra que o aumento do diâmetro de *underflow* causa um efeito benéfico para os ciclones, pois este aumento faz com que o fluido dentro dos ciclones ceda mais energia de pressão de uma forma mais gradativa, o que fica evidenciado pelos perfis de pressão. No ciclone filtrante CPP₂₃ os níveis de pressão são maiores quando comparado ao ciclone filtrante CPP₂₂. Para os perfis de velocidade tangencial, observa-se que estes comportam-se diretamente proporcional, ou seja, maiores diâmetros de *underflow*, maiores valores de velocidade tangencial e por conseguinte maiores eficiências totais de coleta.

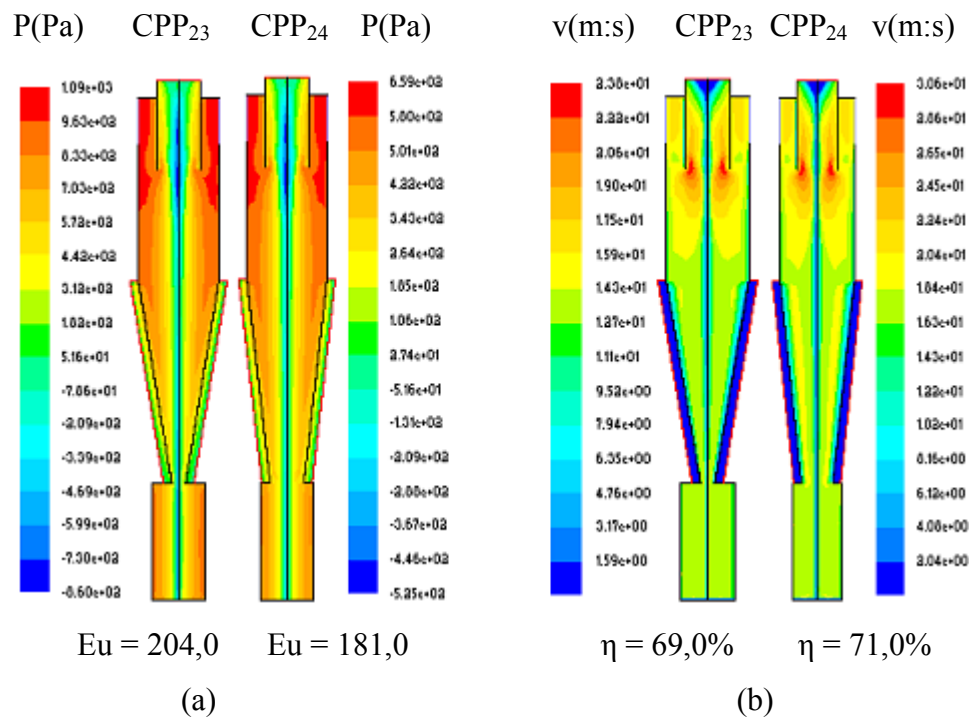


Figura 4.18 – Perfis de pressões (a) e de velocidades tangenciais (b) para os CPP₂₃ e CPP₂₄

Outra explicação para entender este fato, pode ser explicado pelos perfis radiais destes pares de ciclones filtrantes CPP₂₃ e CPP₂₄, nota-se que aumento do diâmetro do *underflow* favorece os ciclones, pois isto faz com que a atuação da componente radial do fluido sobre as partículas no ciclone CPP₂₃ seja menos intensa do que no ciclone CPP₂₄, mantendo estas partículas por um tempo maior na camada limite até conseguirem ser levadas pela corrente de *underflow*. Como mostra a Figura 4.19.

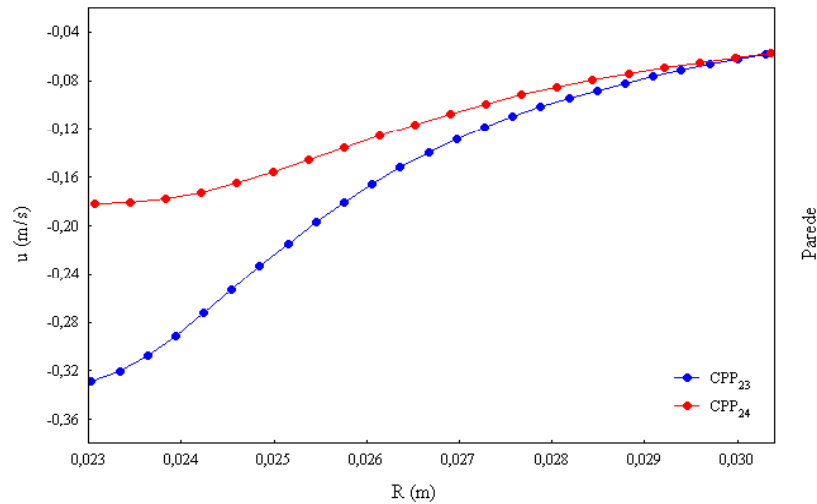


Figura 4.19 – Perfil radial a 20 cm da base dos ciclones filtrante CPP₂₃ e CPP₂₄

Novamente estas conclusões ficam evidenciadas para outros pares de ciclones filtrantes: CPP₁ – CPP₂, CPP₃ – CPP₄, CPP₅ – CPP₆, CPP₇ – CPP₈, CPP₉ – CPP₉, CPP₁₁ – CPP₁₂, CPP₁₃ – CPP₁₄, CPP₁₅ – CPP₁₆, CPP₂₃ – CPP₂₅ e CPP₂₄ – CPP₂₅, cujas simulações estão contidas no Apêndice G.

4.3 – Estudo da Influência das Variáveis Geométricas na Performance dos Ciclones Convencionais e Filtrantes segundo o Planejamento Composto Central.

Os resultados experimentais dos 25 ciclones convencionais e filtrantes segundo o planejamento composto central serão discutidos nesta seção. Estes resultados experimentais são referentes ao número de Euler, eficiência total de coleta e diâmetro de corte. Vale ressaltar que as variáveis X_1 , X_2 , X_3 e X_4 , representam respectivamente os fatores Do/D_c , Sc/D_c , Zc/D_c e Du/D_c , conforme as equações 3.2 a 3.5 do capítulo anterior.

4.3.1 – Número de Euler

4.3.1.1 – Ciclones Convencionais

Os resultados experimentais dos números de Euler para os ciclones convencionais, segundo as 25 configurações geométricas, estão apresentados na Figura 4.20.

Observa-se nesta Figura que a faixa de número de Euler para os ciclones convencionais varia de 198,0 a 330,0. O ciclone convencional com menor número de Euler foi o CC₂₁ que é o equipamento com o menor comprimento da seção cônica (Z_c). E o ciclone com maior número de Euler foi o CC₂₂, sendo este o ciclone com o maior Z_c.

Além do CC₂₁, os menores valores de Euler podem ser alcançados para os ciclones convencionais: CC₅, CC₆, CC₉, CC₁₀, CC₁₃, CC₁₄, CC₁₈, CC₂₄, em todas estas configurações o Z_c esteve no nível (-1) ou no central (0), confirmando a análise que um menor Z_c reduz o Euler. Para os maiores valores de Euler, além do CC₂₂, tem-se as seguintes configurações: CC₃, CC₄, CC₇, CC₈, CC₁₁, CC₁₂, CC₁₅, CC₁₆, CC₁₇ e CC₂₃, nas oito primeiras configurações destacadas (que são as de maiores Euler) o Z_c esteve no nível (+1).

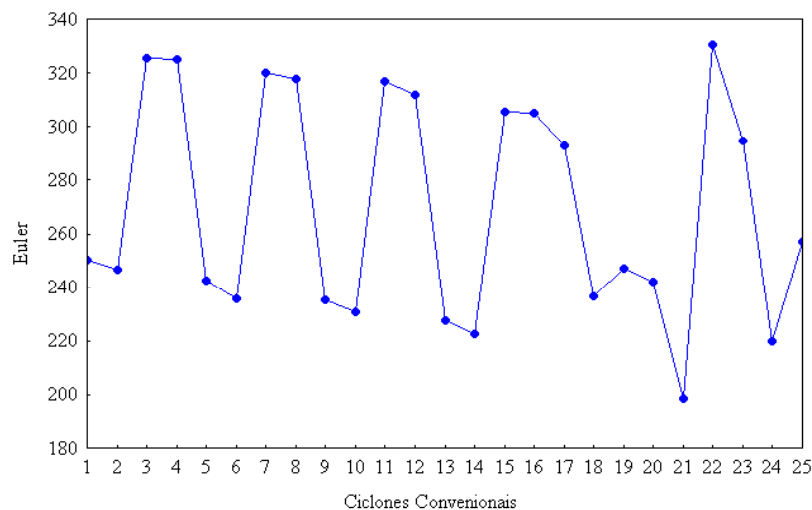


Figura 4.20 – Números de Euler experimentais para ciclones convencionais

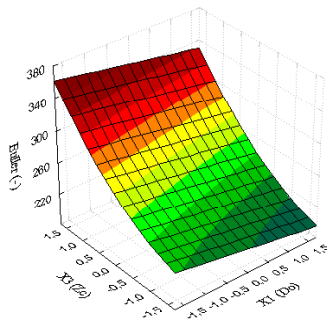
Obtidos os resultados experimentais do número de Euler, foi feita uma regressão múltipla conforme mostra a Equação 4.1 para o ciclone convencional. A Figura 4.20 apresenta o comportamento da função matemática estimada.

$$Eu = 256,64 + \underline{X}' \underline{b} + \underline{X}' \underline{B} \underline{X} \quad (4.1)$$

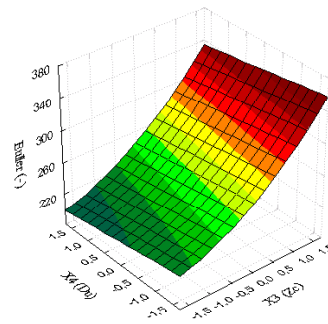
Em que:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} -9,33 \\ -3,36 \\ 39,69 \\ -7,14 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 7,56 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,29 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7,49 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4,86 \end{bmatrix}$$

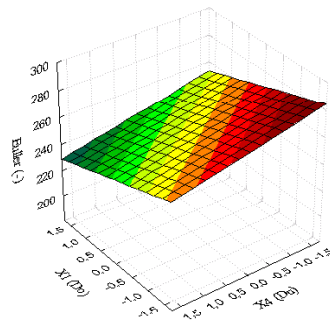
A Equação 4.1 mostra que para os ciclones convencionais todas as variáveis geométricas exerceram influência sobre o número de Euler. Sendo que, confirmando a análise anterior, a variável que mais teve influência foi o comprimento da seção cônica.



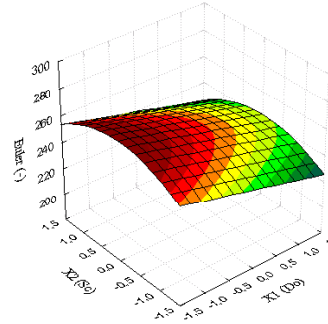
$X_2 = 0$ e $X_4 = 0$



$X_2 = 0$ e $X_1 = 0$



$X_2 = 0$ e $X_3 = 0$



$X_3 = 0$ e $X_4 = 0$

Figura 4.21 – Superfície de resposta para o número de Euler do ciclone convencional segundo os pares $X_1 - X_3$, $X_3 - X_4$, $X_1 - X_4$ e $X_1 - X_2$, respectivamente.

De acordo com a Figura 4.21, notou-se que maiores diâmetros de *overflow* (Do) provocam um decréscimo no número de Euler, como pode-se notar nos pares: $CC_1 - CC_9$, $CC_2 -$

CC₁₀, CC₃ – CC₁₁, CC₄ – CC₁₂, CC₅ – CC₁₃, CC₆ – CC₁₄, CC₇ – CC₁₅, CC₈ – CC₁₆, CC₁₇ – CC₂₅ e CC₁₈ – CC₂₅. Outra variável que se comporta de maneira inversa ao número de Euler é do diâmetro de *underflow*, (Du), que quanto maior seu valor, menor será o número de Euler, como pode-se notar nos pares: CC₁ – CC₂, CC₃ – CC₄, CC₅ – CC₆, CC₇ – CC₈, CC₉ – CC₉, CC₁₁ – CC₁₂, CC₁₃ – CC₁₄, CC₁₅ – CC₁₆, CC₂₃ – CC₂₅ e CC₂₄ – CC₂₅. Já no caso da variável X_3 (comprimento da seção cônica, Zc), ou seja, aquela de influência mais significativa nota-se que quanto maior os valores desta variável maiores são os números de Euler, observa-se nos pares: CC₁ – CC₃, CC₂ – CC₄, CC₅ – CC₇, CC₆ – CC₈, CC₉ – CC₁₁, CC₁₀ – CC₁₂, CC₁₃ – CC₁₅, CC₁₄ – CC₁₆, CC₂₁ – CC₂₅ e CC₂₂ – CC₂₅.

Para o processo de otimização do número de Euler, este deve apresentar um ponto de mínimo global, pois o custo energético está relacionado de forma direta com este parâmetro.

Calculando os autovalores ($\underline{\lambda}$) da matriz B da equação 4.1, tem-se:

$$\underline{\lambda} = [0,29; 4,83; 7,25; 7,84]$$

Sendo assim, na forma canônica a superfície ajustada pode ser colocada da seguinte maneira:

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 = \hat{y}_0 + 0,29w_1^2 + 4,83w_2^2 + 7,25w_3^2 + 7,84w_4^2 \quad (4.2)$$

Interpretando os resultados das raízes características (vetor $\underline{\lambda}$) da matriz B, pode-se concluir que a superfície de resposta para o numero de Euler, possui um ponto de mínimo, pois os autovalores da matriz B são todos positivos, ou seja, conforme a Equação (4.2) um deslocamento a partir do ponto estacionário em qualquer direção das variáveis canônicas implicará em um acréscimo na resposta $\hat{y}$.

O ponto estacionário (x_0) pode ser calculado pela equação 2.72, apresentada no capítulo II, ou seja:

$$\underline{x}_0 = -\frac{1}{2} B^{-1} \underline{b},$$

realizando os cálculos chega-se a:

$$\underline{x_0} = \begin{bmatrix} 0,81 \\ 7,03 \\ -2,82 \\ 1,00 \end{bmatrix}$$

Analisando os valores do ponto estacionário, nota-se que o valor encontrado para X_2 e X_3 , encontram-se fora da região experimental [-1,66 a 1,66]. Entretanto, a partir dos valores obtidos observa-se que, o ótimo (mínimo) dessa resposta (Euler), está relacionado com valores de X_1 (Do) e X_4 (Du) próximo do nível (+1) associados com o mais elevado nível de X_2 (Sc) e o mais baixo nível de X_3 (Zc). Relacionado essa tendência com os níveis do planejamento experimental as geometrias que mais se aproximam são os ciclones CC_{14} e CC_{21} . Estas duas geometrias são aquelas que apresentaram os menores números de Euler experimentais, confirmando assim a otimização pela técnica da superfície de resposta.

4.3.1.2 – Ciclones Filtrantes

Os resultados experimentais dos números de Euler para os ciclones filtrantes de polipropileno, segundo as 25 configurações geométricas, estão apresentados na Figura 4.22.

Observa-se na Figura 4.22 que a faixa de número de Euler para os ciclones filtrantes de polipropileno varia de 96,4 a 173,2. O ciclone filtrante com menor número de Euler foi o CPP_{21} (menor Zc) e maior valor de Euler foi para o CPP_7 , que corresponde a configuração com níveis baixos de Do e Du associado a um nível elevado de Zc .

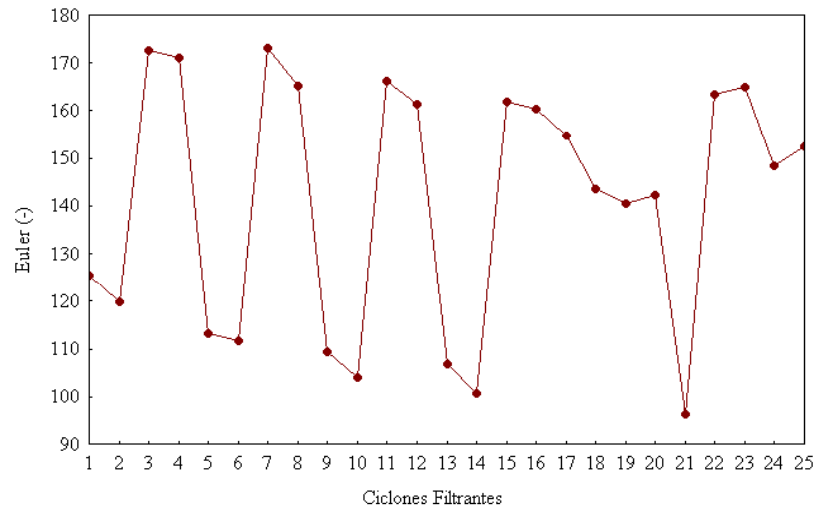


Figura 4.22 – Números de Euler experimentais para ciclones filtrantes de Polipropileno

Além do ciclone CPP₂₁, as geometrias CPP₅, CPP₆, CPP₉, CPP₁₀, CPP₁₃ e CPP₁₄, apresentaram baixos valores de Euler. E, além do ciclone CPP₇, os ciclones com maiores números de Euler foram CPP₃, CPP₄, CPP₈, CPP₁₁, CPP₁₂ e CPP₂₂. Observa-se que todas essas configurações com altos valores de Euler possuem elevados níveis de Zc, confirmando assim o mesmo comportamento obtido para o ciclone convencional.

Obtidos os resultados experimentais do número de Euler, foi feita uma regressão múltipla conforme mostra a Equação 4.3, para o ciclone filtrante de polipropileno.

$$Eu = 152,78 + \underline{X'} \underline{b} + \underline{X'} \underline{B} \underline{X} \quad (4.3)$$

Em que:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} -4,61 \\ -1,58 \\ 25,65 \\ -2,91 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -1,78 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4,62 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -8,73 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,90 \end{bmatrix}$$

A Equação 4.3 mostra que todas as variáveis influenciaram o número de Euler. E, assim como no equipamento convencional, a variável que apresentou uma maior influência foi o

comprimento da seção cônica, X_3 (Z_c). Na Figura 4.22 são apresentadas as superfícies de resposta obtidas a partir da Equação 4.3.

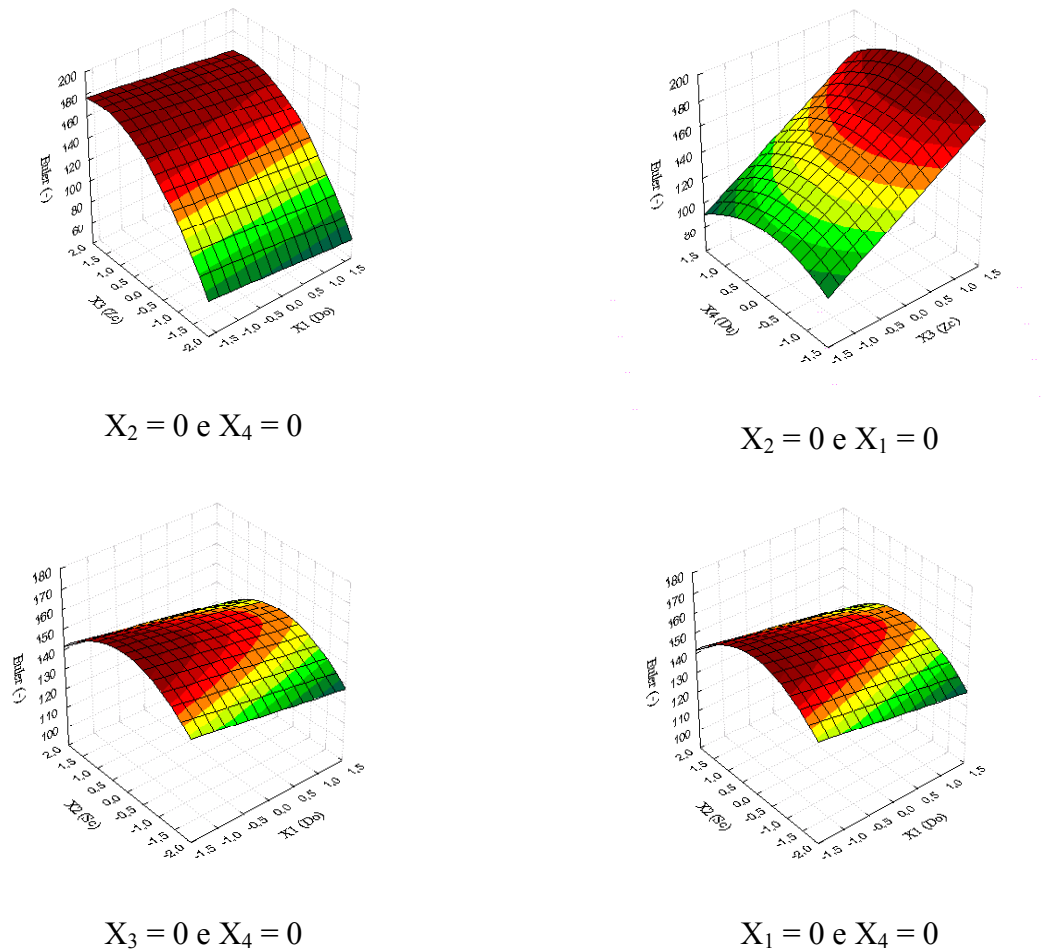


Figura 4.23 – Superfície de resposta para o número de Euler do ciclone filtrante de polipropileno segundo os pares $X_1 - X_3$, $X_4 - X_3$, $X_1 - X_2$ e $X_2 - X_3$, respectivamente.

De acordo com a Figura 4.22, obtida da Equação 4.3, nota-se que maiores diâmetros de *overflow* (Do) e maiores diâmetro do *underflow* (Du) resultam em menores números de Euler, já no caso do comprimento da seção cônica (Z_c), quanto maior os valores desta variável maiores também são os números de Euler. Esta análise tem a mesma tendência daquela observada para o equipamento convencional, apresentada anteriormente.

Para realizar a otimização por análise canônica foram calculados os autovalores ($\underline{\lambda}$) da matriz B da equação 4.3. Os resultados obtidos são os seguintes:

$$\underline{\lambda} = [-8,82 \quad -1,66 \quad -4,64 \quad 0,90]$$

Observa-se a partir desses valores das raízes características ($\underline{\lambda}$) que a superfície de resposta para o número de Euler do ciclone filtrante pode não possuir ponto de máximo nem de mínimo, pois os autovalores apresentam valores positivos e negativos. Assim x_0 é um ponto sela (*saddle point*).

Apesar da análise canônica não apresentar um ótimo global, observa-se a partir das superfícies de resposta do número de Euler do ciclone filtrante que os menores valores dessa resposta são obtidos para valores de X_1 (Do) X_2 (Sc) e X_4 (Du) mais elevados (+1) associados o mais baixo nível de X_3 (Zc).

4.3.2 – Diâmetro de Corte

4.3.3.1 – Ciclones Convencionais

Os diâmetros de corte (d_{50}) obtidos experimentalmente para os ciclones convencionais de acordo com o planejamento composto central, estão dispostos na Figura 4.24. Percebe-se que as faixas de diâmetro de corte para os ciclones ficaram entre 2,39 a 3,54 μm .

Os ciclones convencionais que obtiveram os menores valores de diâmetro de corte foram os seguintes: CC₂, CC₄, CC₆, CC₁₇, CC₁₉, CC₂₀, CC₂₂, CC₂₄ e CC₂₅. As geometrias que levaram aos maiores diâmetros de corte foram: CC₉, CC₁₁, CC₁₃, CC₁₄, CC₁₅, CC₁₆, CC₂₁ e CC₂₃.

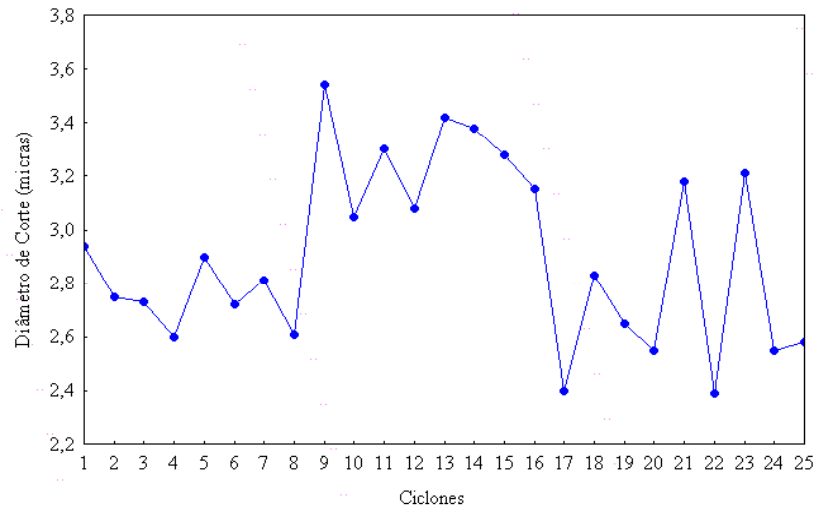


Figura 4.24 – Diâmetro de corte para os ciclones convencionais

Para os ciclones convencionais observou-se que os ciclones que apresentaram os menores diâmetro de corte (d_{50}), o que conduz a uma alta eficiência, foram o CC₁₇ (menor Do) e o CC₂₂ (maior Zc). Já a configuração que apresentou o maior valor de d_{50} foi o CC₉, o qual corresponde a configuração com os níveis mais baixos de Sc, Zc e Du juntamente com o maior nível de Do.

Com os resultados experimentais do diâmetro de corte foi feita uma regressão múltipla para estimar os parâmetros associados aos efeitos das variáveis, tanto de forma isolada, bem como através de interações e contribuições quadráticas, a equação obtida é apresentada a seguir

$$d'_{50} = 2,62 + \underline{X}'\underline{b} + \underline{X}'\underline{B}\underline{X} \quad (4.4)$$

Em que:

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \quad \underline{b} = \begin{bmatrix} +0,22 \\ 0,005 \\ -0,11 \\ -0,12 \end{bmatrix} \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} 0,08 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,07 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,13 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,17 \end{bmatrix}$$

A Equação 4.4 mostra que todas as variáveis influenciaram o diâmetro de corte. Sendo que a variável que mais influenciou foi o diâmetro de *overflow*, X_1 (Do).

Na Figura 4.25 são apresentadas as superfícies de resposta obtidas a partir da Equação 4.4.

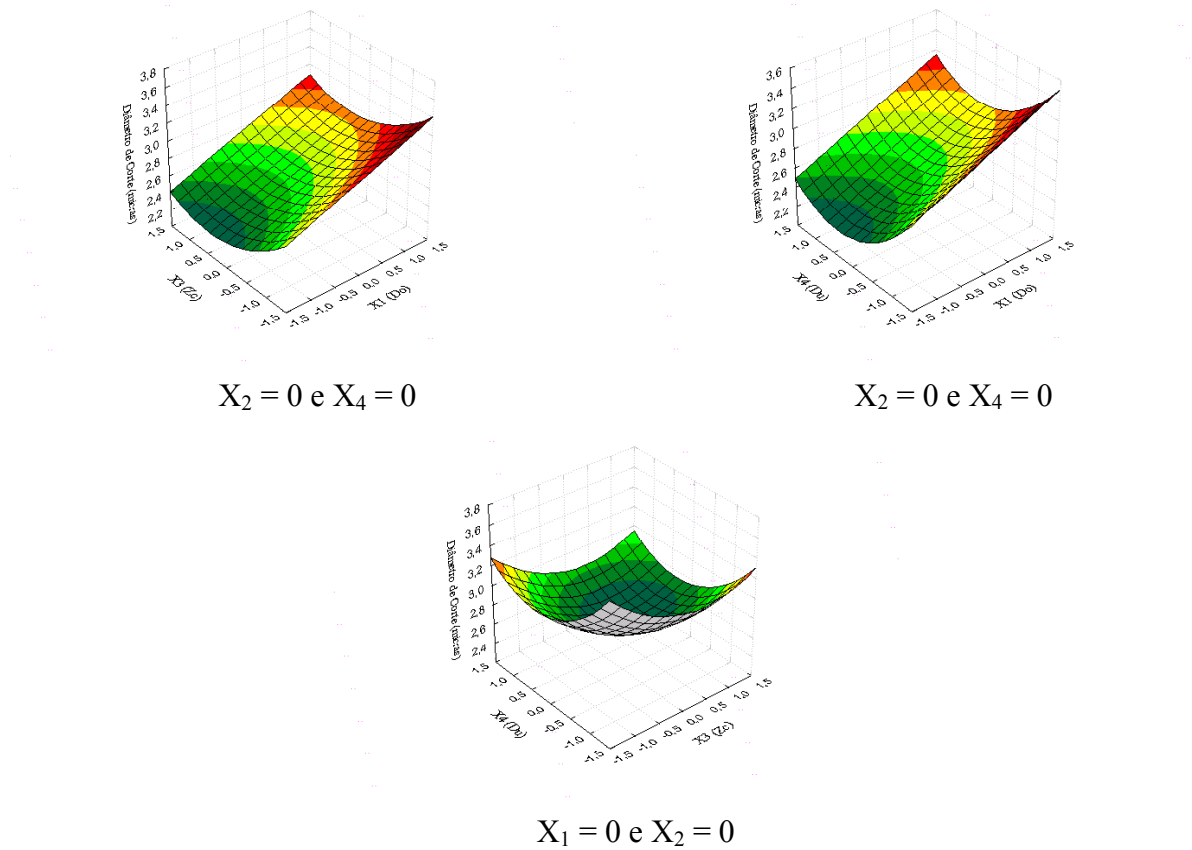


Figura 4.25 – Superfície de resposta para o diâmetro de corte dos ciclones convencionais segundo os pares $X_1 - X_3$, $X_1 - X_4$ e $X_3 - X_4$, respectivamente.

Para realizar a otimização por análise canônica foram calculados os autovalores ($\underline{\lambda}$) da matriz B da equação 4.4. Os resultados obtidos são os seguintes:

$$\underline{\lambda} = [0,06 \quad 0,08 \quad 0,17 \quad 0,13]$$

Sendo assim, na forma canônica a superfície ajustada pode ser colocada da seguinte maneira:

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 = \hat{y}_0 + 0,06 w_1^2 + 0,08 w_2^2 + 0,17 w_3^2 + 0,13 w_4^2 \quad (4.5)$$

Interpretando os resultados das raízes características (vetor $\underline{\lambda}$) da matriz B, pode-se concluir que a superfície de resposta para o diâmetro de corte, possui um ponto de mínimo, pois os autovalores da matriz B são todos positivos, ou seja, conforme a Equação (4.5) um deslocamento a partir do ponto estacionário em qualquer direção das variáveis canônicas implicará em um acréscimo na resposta $\hat{y}$.

O ponto estacionário (x_0) pode ser pela equação 2.71, ou seja:

$\underline{x}_0 = -\frac{1}{2} B^{-1} \underline{b}$, realizando os cálculos chega-se a:

$$x_0 = \begin{bmatrix} -1,48 \\ 0,006 \\ 0,40 \\ 0,29 \end{bmatrix}$$

Analisando os valores do ponto estacionário, nota-se que o valor encontrado para X_1 , X_2 , X_3 e X_4 , encontram-se dentro da região experimental [-1,66 a 1,66]. A partir dos valores obtidos observa-se que, o ótimo (mínimo) para o diâmetro de corte, está relacionado com valores de X_1 (Do) próximo do nível (- α) associado com X_2 , X_3 e X_4 próximo ao nível central. Relacionado essa tendência com os níveis do planejamento experimental a geometria que mais se aproxima é o ciclone CC₁₇. Esta geometria é a que apresentara o menor diâmetro de corte experimental, confirmando assim a otimização pela técnica da superfície de resposta.

4.3.3.2 – Ciclones Filtrantes

Os diâmetros de corte (d_{50}) obtidos experimentalmente para o ciclone filtrante estão dispostas na Figura 4.26.

Percebe-se que as faixas de diâmetro de corte para os ciclones filtrantes ficaram entre 3,40 a 4,53 μm . Observa-se também que os valores para esta resposta foram superiores aos respectivos equipamentos convencionais indicando uma menor eficiência de coleta. Também para os ciclones filtrantes ocorreram duas faixas para os valores de diâmetros de corte: abaixo de 4,0 μm (CPP₁,

CPP₂, CPP₃, CPP₄, CPP₅, CPP₆, CPP₇, CPP₈, CPP₁₇, CPP₁₈, CPP₁₉, CPP₂₂, CPP₂₄ e CPP₂₅) e acima de 4,0 μ (CPP₉, CPP₁₀, CPP₁₁, CPP₁₂, CPP₁₃, CPP₁₄, CPP₁₅, CPP₁₆, CPP₂₁ e CPP₂₃).

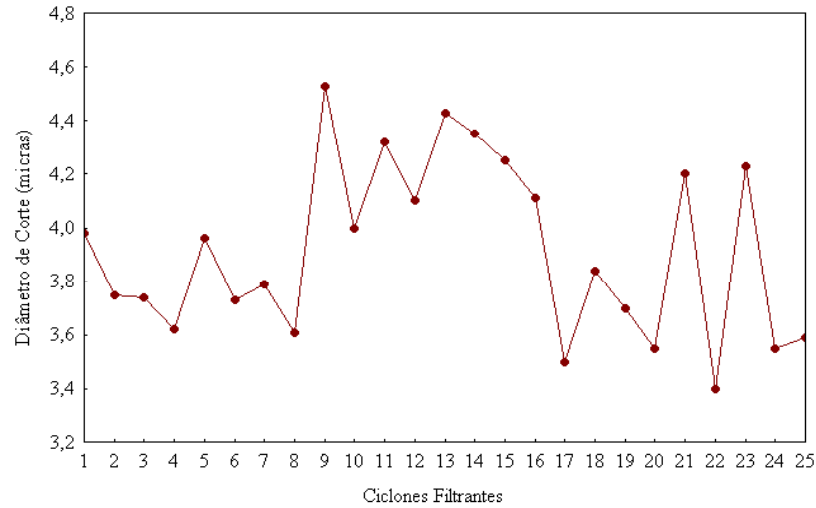


Figura 4.26 – Diâmetro de corte para os ciclones filtrantes de polipropileno

Analogamente ao equipamento convencional, os ciclones filtrantes que apresentaram os menores diâmetro de corte (d_{50}) foram o CPP₁₇ (menor Do) e o CPP₂₂ (maior Zc). Já a configuração que apresentou o maior valor de d_{50} foi o CPP₉, o qual corresponde a configuração com os níveis mais baixos de Sc , Zc e Du juntamente com o maior nível de Do .

Com os resultados experimentais d_{50} para os ciclones filtrantes foi feita uma regressão múltipla, conforme a Equação 4.6.

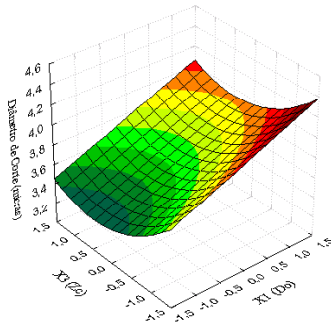
$$d'_{50} = 3,65 + \underline{X}' \underline{b} + \underline{X}' \underline{B} \underline{X} \quad (4.6)$$

Em que:

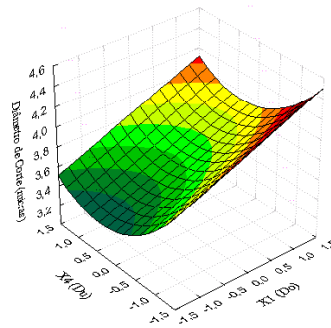
$$\underline{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \quad \underline{b} = \begin{bmatrix} +0,20 \\ 0,002 \\ -0,11 \\ -0,13 \end{bmatrix} \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} 0,08 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,06 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,16 \end{bmatrix}$$

Também para o equipamento filtrante, o diâmetro de corte foi influenciado por todas as variáveis, X_1 (Do), X_3 (Zc) e X_4 (Du), sendo que a variável que mais influenciou, assim como no caso do ciclone convencional, foi o Do .

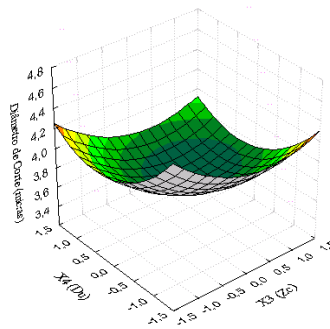
Na Figura 4.27 são apresentadas as superfícies de resposta obtidas a partir da Equação 4.6.



$X_2 = 0$ e $X_4 = 0$



$X_2 = 0$ e $X_3 = 0$



$X_1 = 0$ e $X_2 = 0$

Figura 4.27 – Superfície de Resposta para o diâmetro de corte do ciclone filtrante de Polipropileno segundo os pares $X_1 - X_3$, $X_1 - X_4$ e $X_3 - X_4$, respectivamente.

Para realizar a otimização por análise canônica foram calculados os autovalores (λ) da matriz B da Equação 4.6. Os resultados obtidos são os seguintes:

$$\underline{\lambda} = [0,05 \quad 0,08 \quad 0,12 \quad 0,16]$$

Sendo assim, na forma canônica a superfície ajustada pode ser colocada da seguinte maneira:

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 = \hat{y}_0 + 0,05w_1^2 + 0,08w_2^2 + 0,12w_3^2 + 0,16w_4^2 \quad (4.7)$$

Observa-se também pelas raízes características (vetor $\underline{\lambda}$) da matriz B da equação do d_{50} para o equipamento filtrante, que a superfície de resposta possui um ponto de mínimo, pois os autovalores da matriz B são todos positivos.

O ponto estacionário (x_0) obtido foi o seguinte:

$$\underline{x}_o = \begin{bmatrix} -1,29 \\ 0,08 \\ 0,47 \\ 0,31 \end{bmatrix}$$

Analisando os valores do ponto estacionário, nota-se que o valor encontrado para X_1 , X_2 , X_3 e X_4 , encontram-se dentro da região experimental [-1,66 a 1,66]. Este resultado é muito próximo do obtido para o equipamento convencional, ou seja, o ótimo (mínimo) para o diâmetro de corte do ciclone filtrante está relacionado com valores de X_1 (Do) próximo do nível (- α) associado com X_2 , X_3 e X_4 nos níveis centrais. Relacionado essa tendência com os níveis do planejamento experimental a geometria que mais se aproxima é o ciclone CPP₁₇. Esta geometria é a que apresenta um dos dois menores valores de diâmetro de corte experimental, confirmando assim a otimização pela técnica da superfície de resposta.

4.3.2 – Eficiência Total de Coleta

4.3.2.1 – Ciclones Convencionais

Os resultados experimentais para eficiência de coleta para os ciclones convencionais, segundo as 25 configurações geométricas, estão apresentados na Figura 4.28. Observa-se nesta Figura que a faixa de eficiência para os ciclones convencionais varia de 84,2 a 94,1 %. Como era esperado pelo resultado do diâmetro de corte, apresentado anteriormente, o ciclone convencional com menor eficiência foi o CC₉, que é o equipamento com o menor X_2 (Sc), X_3 (Zc) e X_4 (Du), e

o maior X_1 (Do). O ciclone com maior eficiência foi o CC₂₂, sendo este o ciclone com o maior Z_c .

Cabe ressaltar que, conforme mencionado no capítulo de metodologia procurou-se trabalhar com vazão do ar que conduzissem a eficiências não muito elevadas (próximo de 100%), para que fosse possível diferenciar as configurações estudadas.

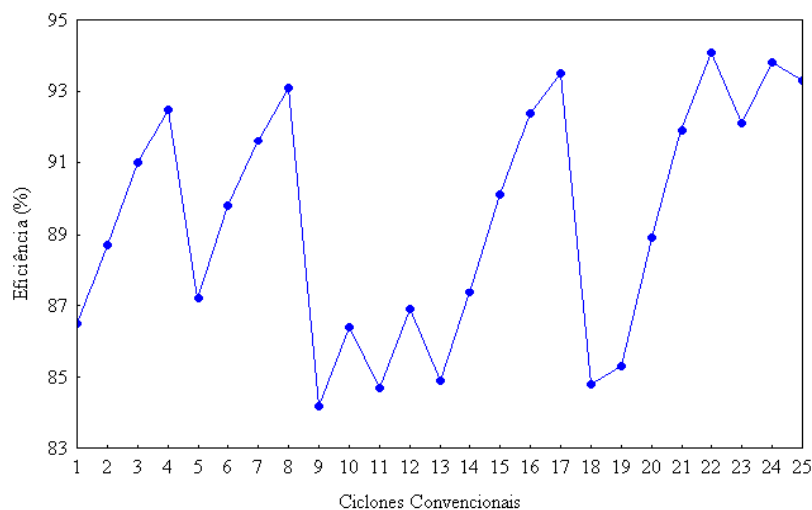


Figura 4.28 – Eficiências totais experimentais para os ciclones convencionais

4.3.2.2 – Ciclones Filtrantes

As eficiências totais de coleta (η) obtidas experimentalmente para o ciclone filtrante de polipropileno, de acordo com o planejamento composto central, estão dispostas na Figura 4.29. Percebe-se que as faixas de eficiência totais de coleta para o ciclone filtrante ficaram entre 66,2 a 73,1 %. Este patamar é inferior ao do equipamento convencional, mostrando que a incorporação da parede filtrante na seção cônica do ciclone, apesar de diminuir o consumo energético (menor E_u), foi prejudicial à eficiência do equipamento, diminuindo a eficiência e aumentando o diâmetro de corte.

Da mesma forma que o equipamento convencional, e conforme indicado pelos resultados do diâmetro de corte, a menor eficiência foi obtida para o CPP₉ que é o equipamento com o menor X_2 (Sc), X_3 (Zc) e X_4 (Du), e o maior X_1 (Do). O ciclone com maior eficiência foi o CPP₂₂, sendo este o ciclone com o maior Z_c , ratificando a análise feita anteriormente.

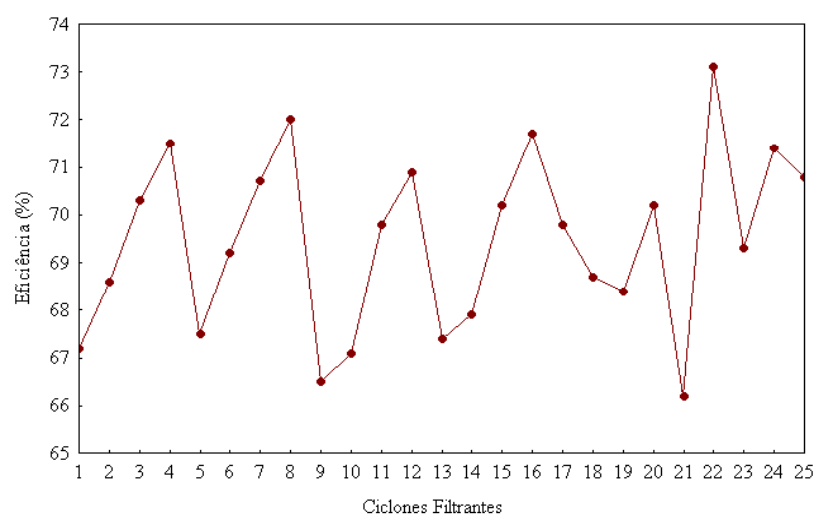


Figura 4.29 – Eficiências totais experimentais para os ciclones filtrantes de polipropileno

4.4 – Análise Conjunta do Número de Euler (Eu) e do diâmetro de corte (d_{50}) para ciclones convencionais e filtrantes

Foi realizada uma análise para se buscar intervalos nos quais os ciclones convencionais e filtrantes conseguissem associar baixos números de Euler com baixos diâmetros de corte ou altas eficiências de coleta, e desta maneira, encontrar tanto um ciclone convencional quanto um filtrante que fosse capaz de atender tais exigências.

4.4.1 – Análise Conjunta para os Ciclones Convencionais

Com os resultados experimentais dos ciclones convencionais, observa-se que além do ciclone CC₂₁, que apresentou o menor valor de número de Euler, pôde-se constatar que os ciclones CC₅, CC₆, CC₉, CC₁₀, CC₁₃, CC₁₄, CC₁₈, CC₂₄ também apresentaram números de Euler relativamente baixos. Considerando as dimensões geométricas desses ciclones convencionais, são apresentados na Tabela 4.2 os intervalos nos quais os números de Euler permaneceriam em valores baixos.

Tabela 4.2 – Intervalos de dimensões geométricas para os números de Euler dos ciclones convencionais permanecerem nos menores valores.

$0,50 \leq \mathbf{Do/Dc} \leq 0,63$	$-1 \leq \mathbf{X_1} \leq +\alpha$
$0,62 \leq \mathbf{Sc/Dc} \leq 0,98$	$-1 \leq \mathbf{X_2} \leq +1$
$1,84 \leq \mathbf{Zc/Dc} \leq 2,25$	$-\alpha \leq \mathbf{X_3} \leq 0$
$0,23 \leq \mathbf{Du/Dc} \leq 0,41$	$-1 \leq \mathbf{X_4} \leq +\alpha$

Observando a Tabela 4.2 nota-se que a variável que oferece maiores restrições é o comprimento da seção cônica (Z_c), onde é interessante que esta variável esteja nos níveis mais baixos, até no máximo no nível central.

Analisando agora os resultados experimentais dos diâmetros de corte pode constatar que os ciclones convencionais que obtiveram os menores valores foram CC₂, CC₄, CC₆, CC₈, CC₁₇, CC₁₉, CC₂₀, CC₂₂, CC₂₄ e CC₂₅. Considerando as dimensões geométricas desses ciclones convencionais, são apresentados na Tabela 4.3 os intervalos nos quais os diâmetros de corte permaneceriam no menor valor.

Tabela 4.3 – Intervalos de dimensões geométricas para diâmetro de corte dos ciclones convencionais permanecerem nos menores valores.

$0,47 \leq \mathbf{Do/Dc} \leq 0,55$	$-\alpha \leq \mathbf{X_1} \leq 0$
$0,50 \leq \mathbf{Sc/Dc} \leq 1,10$	$-\alpha \leq \mathbf{X_2} \leq +\alpha$
$2,25 \leq \mathbf{Zc/Dc} \leq 2,66$	$-1 \leq \mathbf{X_3} \leq +\alpha$
$0,30 \leq \mathbf{Du/Dc} \leq 0,41$	$0 \leq \mathbf{X_4} \leq +\alpha$

Para encontrar uma configuração que conduza de forma simultânea a baixos valores do número de Euler e do diâmetro de corte, foi feita uma análise conjunto das regiões ótimas, tendo como base a faixa ideal para cada resposta. Os resultados dessa análise conjunta são apresentados na Tabela 4.4 a seguir.

Tabela 4.4 – Intervalos nos quais os ciclones convencionais provavelmente apresentarão menores números de Euler juntamente com menores diâmetros de corte.

Eu	d₅₀	Eu ∩ d₅₀	
$-1 \leq \mathbf{X}_1 \leq +\alpha$	$-\alpha \leq \mathbf{X}_1 \leq 0$	$-1 \leq \mathbf{X}_1 \leq 0$	$0,50 \leq \mathbf{Do/Dc} \leq 0,55$
$-1 \leq \mathbf{X}_2 \leq +1$	$-\alpha \leq \mathbf{X}_2 \leq +\alpha$	$-1 \leq \mathbf{X}_2 \leq +1$	$0,62 \leq \mathbf{Sc/Dc} \leq 0,98$
$-\alpha \leq \mathbf{X}_3 \leq 0$	$-1 \leq \mathbf{X}_3 \leq +\alpha$	$-1 \leq \mathbf{X}_3 \leq 0$	$2,00 \leq \mathbf{Zc/Dc} \leq 2,25$
$-1 \leq \mathbf{X}_4 \leq +\alpha$	$0 \leq \mathbf{X}_4 \leq +\alpha$	$0 \leq \mathbf{X}_4 \leq +\alpha$	$0,30 \leq \mathbf{Du/Dc} \leq 0,41$

As geometrias que estão dentro dessa faixa ótima são os ciclones CC₂₄ e CC₂₅ e desses o ciclone CC₂₄ foi a configuração que apresentou os melhores resultados, conforme pode ser observado na Figura 4.30 a seguir. Sendo assim a melhor configuração para o ciclone convencional na faixa de geometria estudada foi o CC₂₄, que possui as seguintes relações geométricas: Do/Dc=0,55; Sc/Dc=0,80; Zc/Dc=2,25; Du/Dc=0,41.

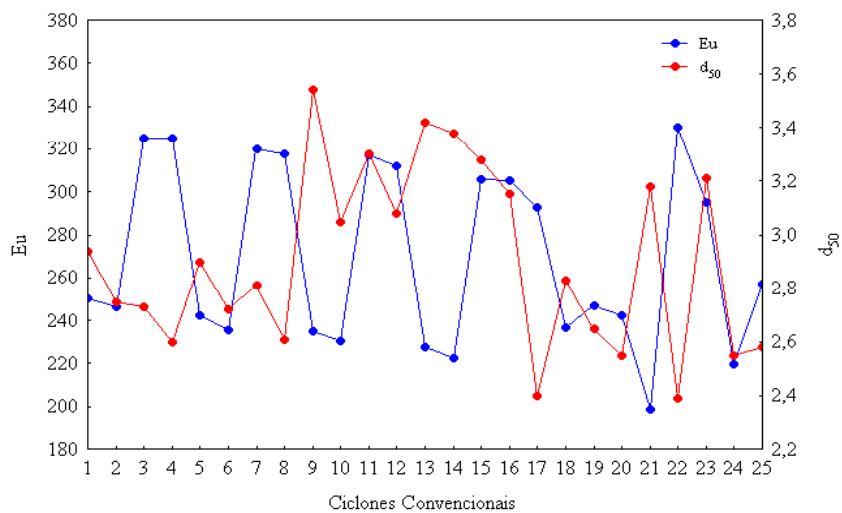


Figura 4.30 – Comparação entre os números de Euler e os diâmetros de corte para os ciclones convencionais.

4.4.2 – Análise Conjunta para os Ciclones Filtrantes

Uma análise similar foi realizada também para os ciclones filtrantes e observa-se que além do ciclone CC₂₁, que apresentou o menor valor de número de Euler, pôde-se constatar que os ciclones CPP₁, CPP₂, CPP₅, CPP₆, CPP₉, CPP₁₀, CPP₁₃ e CPP₁₄ também apresentaram números

de Euler relativamente baixos. Considerando as dimensões geométricas desses ciclones convencionais, são apresentados na Tabela 4.5 os intervalos nos quais os números de Euler permaneceriam em valores baixos.

Tabela 4.5. – Intervalos de dimensões geométricas para os números de Euler dos ciclones filtrantes permanecerem nos menores valores.

$0,50 \leq \mathbf{Do/Dc} \leq 0,60$	$-1 \leq \mathbf{X_1} \leq +1$
$0,62 \leq \mathbf{Sc/Dc} \leq 0,98$	$-1 \leq \mathbf{X_2} \leq +1$
$\mathbf{Zc/Dc} = 2,00$	$\mathbf{X_3} = -1$
$0,23 \leq \mathbf{Du/Dc} \leq 0,37$	$-1 \leq \mathbf{X_4} \leq +1$

Observando a Tabela 4.5, observa-se que a variável que oferece maiores restrições é o comprimento da seção cônica (Zc), sendo que em todos os ciclones filtrantes que tiveram pequenos valores para o número de Euler, esta variável (Zc) esteve no nível baixo (-1).

Analogamente ao equipamento convencional, pode-se constatar que os ciclones filtrantes que obtiveram os menores valores de diâmetro de corte foram CPP₂, CPP₄, CPP₆, CPP₈, CPP₁₇, CPP₁₉, CPP₂₀, CPP₂₂ CPP₂₄ e CPP₂₅.

Considerando as dimensões geométricas desses ciclones filtrantes, são apresentados na Tabela 4.6 os intervalos nos quais os diâmetros de corte permaneceriam no menor valor.

Tabela 4.6 – Intervalos de dimensões geométricas para diâmetro de corte dos ciclones filtrantes permanecerem nos menores valores.

$0,47 \leq \mathbf{Do/Dc} \leq 0,55$	$-\alpha \leq \mathbf{X_1} \leq 0$
$0,50 \leq \mathbf{Sc/Dc} \leq 1,10$	$-\alpha \leq \mathbf{X_2} \leq +\alpha$
$2,00 \leq \mathbf{Zc/Dc} \leq 2,67$	$-1 \leq \mathbf{X_3} \leq +\alpha$
$0,30 \leq \mathbf{Du/Dc} \leq 0,42$	$0 \leq \mathbf{X_4} \leq +\alpha$

Pode-se notar que o comportamento do diâmetro de corte em relação a influência das variáveis geométricas para os ciclones filtrantes foi similar ao dos ciclones convencionais.

E assim como nos ciclones convencionais, também para encontrar uma configuração que conduza de forma simultânea a baixos valores do número de Euler e do diâmetro de corte, para os ciclones filtrantes, foi feita uma análise conjunto das regiões ótimas, tendo como base a faixa

ideal para cada resposta. Os resultados dessa análise conjunta são apresentados na Tabela 4.7 a seguir.

Tabela 4.7 – Intervalos nos quais os ciclones filtrantes provavelmente apresentarão menores números de Euler juntamente com menores diâmetros de corte.

Eu	d₅₀	Eu ∩ d₅₀	
$-1 \leq \mathbf{X}_1 \leq +1$	$-\alpha \leq \mathbf{X}_1 \leq 0$	$-1 \leq \mathbf{X}_1 \leq 0$	$0,50 \leq \mathbf{Do/Dc} \leq 0,55$
$-1 \leq \mathbf{X}_2 \leq +1$	$-\alpha \leq \mathbf{X}_2 \leq +\alpha$	$-1 \leq \mathbf{X}_2 \leq +1$	$0,62 \leq \mathbf{Sc/Dc} \leq 0,98$
$\mathbf{X}_3 = -1$	$-1 \leq \mathbf{X}_3 \leq +\alpha$	$\mathbf{X}_3 = -1$	$\mathbf{Zc/Dc} = 2,00$
$-1 \leq \mathbf{X}_4 \leq +1$	$0 \leq \mathbf{X}_4 \leq +\alpha$	$0 \leq \mathbf{X}_4 \leq +1$	$0,30 \leq \mathbf{Du/Dc} \leq 0,37$

Os ciclones CPP₂ e CPP₆ foram as únicas configurações que estiveram dentro da faixa ótima para as duas respostas (Tabela 4.7). Estes dois equipamentos diferem entre si apenas pela relação Sc/Dc que para o CPP2 é igual a 0,62 e para o CPP6 é igual a 0,98. Sendo assim as relações geométricas ótimas para as demais variáveis do ciclone filtrante são as seguintes: Do/Dc=0,50; Zc/Dc=2,0; Du/Dc=0,37.

Pode-se constatar a validade da otimização realizada, comparando os resultados simultâneos de Euler e diâmetro de corte para as 25 configurações, apresentados na Figura 4.31 a seguir.

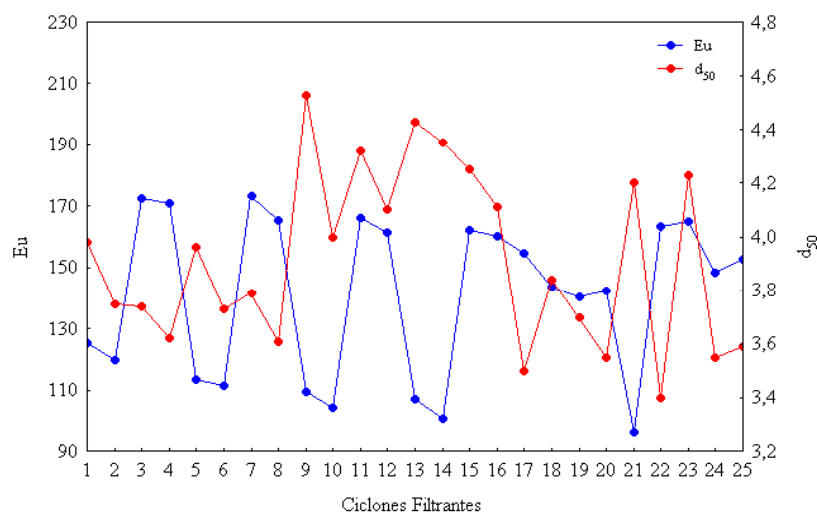


Figura 4.31 – Comparação entre os números de Euler e os diâmetros de corte para os ciclones filtrantes.

4.5 - Estudo Comparativo entre Ciclones Convencionais e Filtrantes

Através dos resultados experimentais e das simulações é mostrado nesta seção um estudo mais detalhado a respeito da influência da filtração sobre o desempenho de ciclones.

4.5.1 – Influência da Filtração sobre o número de Euler

A Figura 4.32 mostra a comparação dos números de Euler experimentais entre os ciclones convencionais e ciclones filtrantes, segundo as 25 configurações provenientes do planejamento composto central (PCC). Nesta figura pode ser observado que a introdução da parede filtrante na região cônica do ciclone provocou uma expressiva redução no número de Euler. A média dos valores do número de Euler para a geometria filtrante foi 45% menor que a da configuração convencional. A partir deste resultado pode-se concluir que o equipamento filtrante tem um custo energético menor. Para uma determinada vazão de operação a queda de pressão resultante é inferior ao similar convencional.

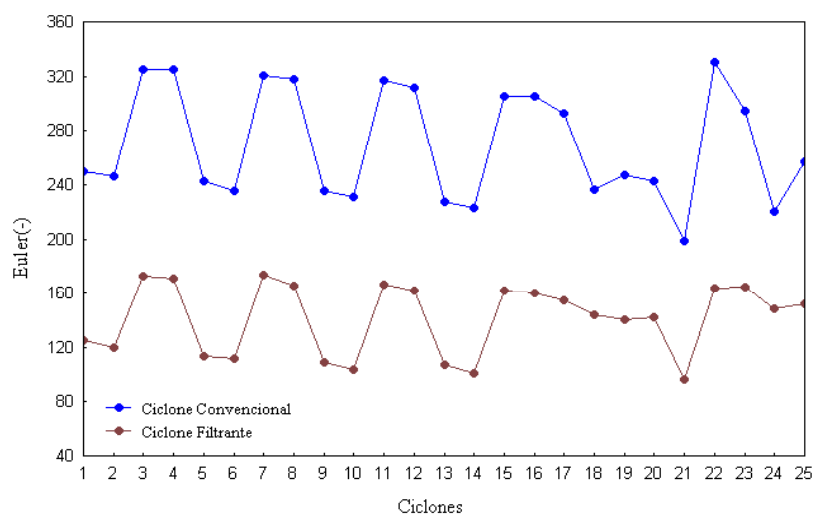
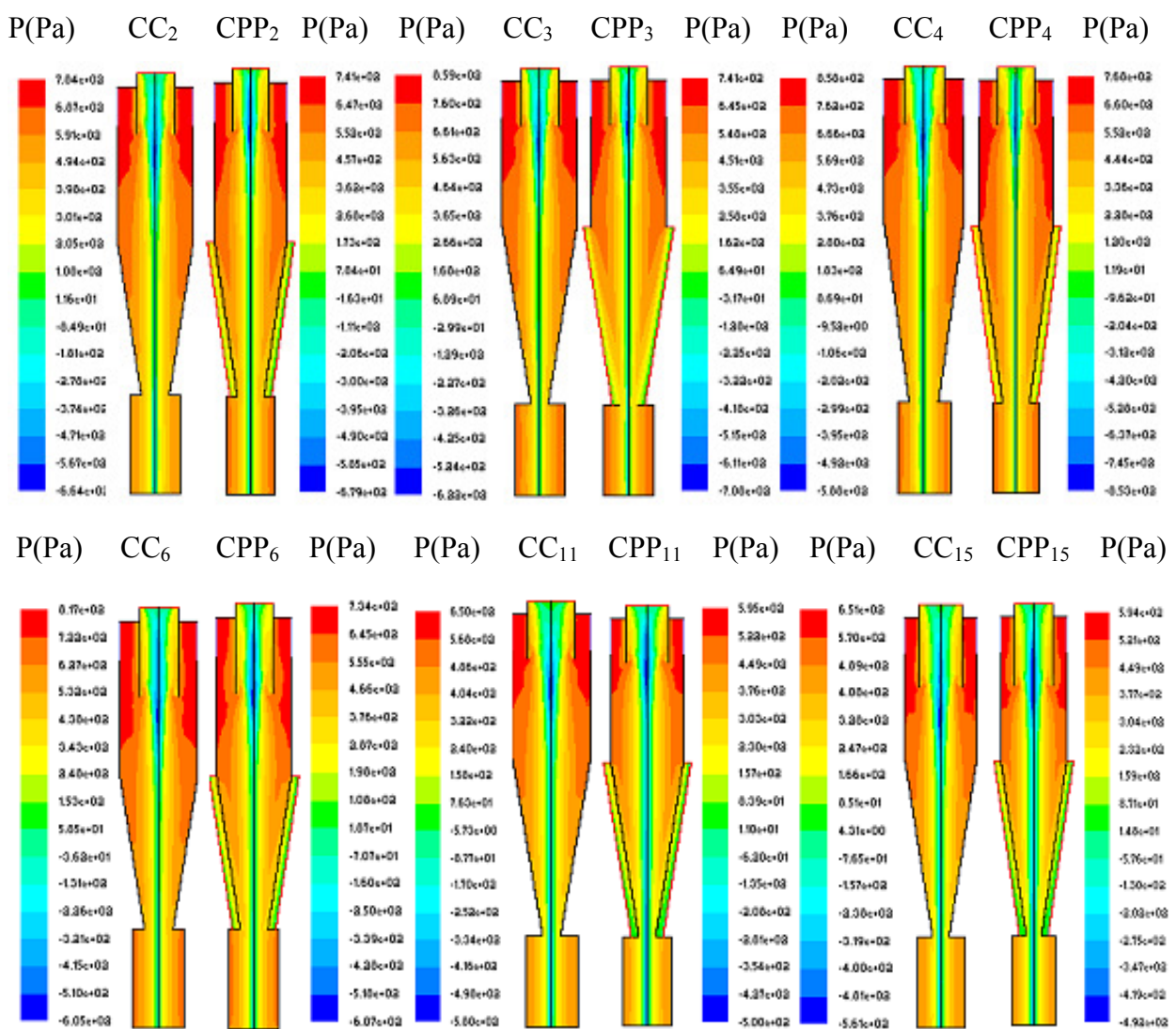


Figura 4.32 – Comparativo entre os números de Euler nos ciclones convencionais e filtrantes.

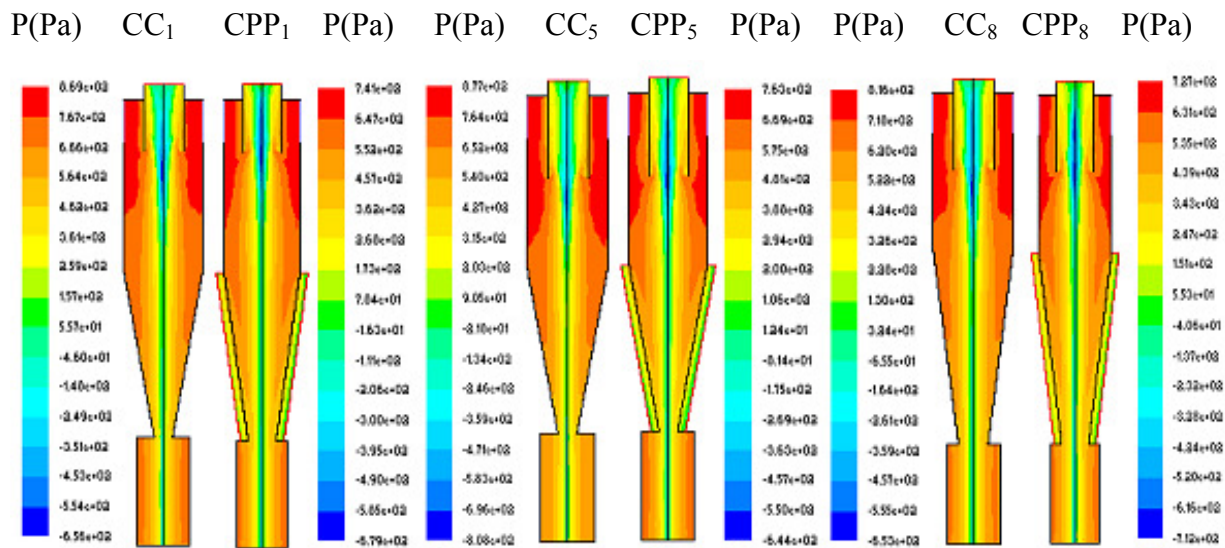
A Figura 4.33 a seguir apresenta os resultados do perfil simulado de pressão de pares de ciclones convencional e filtrante de mesma geometria, operando na mesma vazão de ar 0,062 m³/s.

Os resultados apresentados na Figura 4.33 mostram que em cada par de ciclones analisado, ocorreu um perfil de pressão diferenciado. Observa-se uma menor queda de pressão no ciclone filtrante. Portanto a substituição, da seção cônica metálica por uma seção cônica composta de um meio filtrante, em relação a esta resposta foi favorável.

A queda de pressão nos ciclones filtrantes foi menor porque os poros da seção cônica permeável representaram uma saída adicional do ar, o que não ocorre com os ciclones cuja seção cônica é metálica, ou seja, impermeável.



4.33 - Perfis de pressões totais para os pares de ciclones: CC₂ – CPP₂; CC₃ – CPP₃; CC₄ – CPP₄, CC₆ – CPP₆; CC₁₁ – CPP₁₁; CC₁₅ – CPP₁₅;

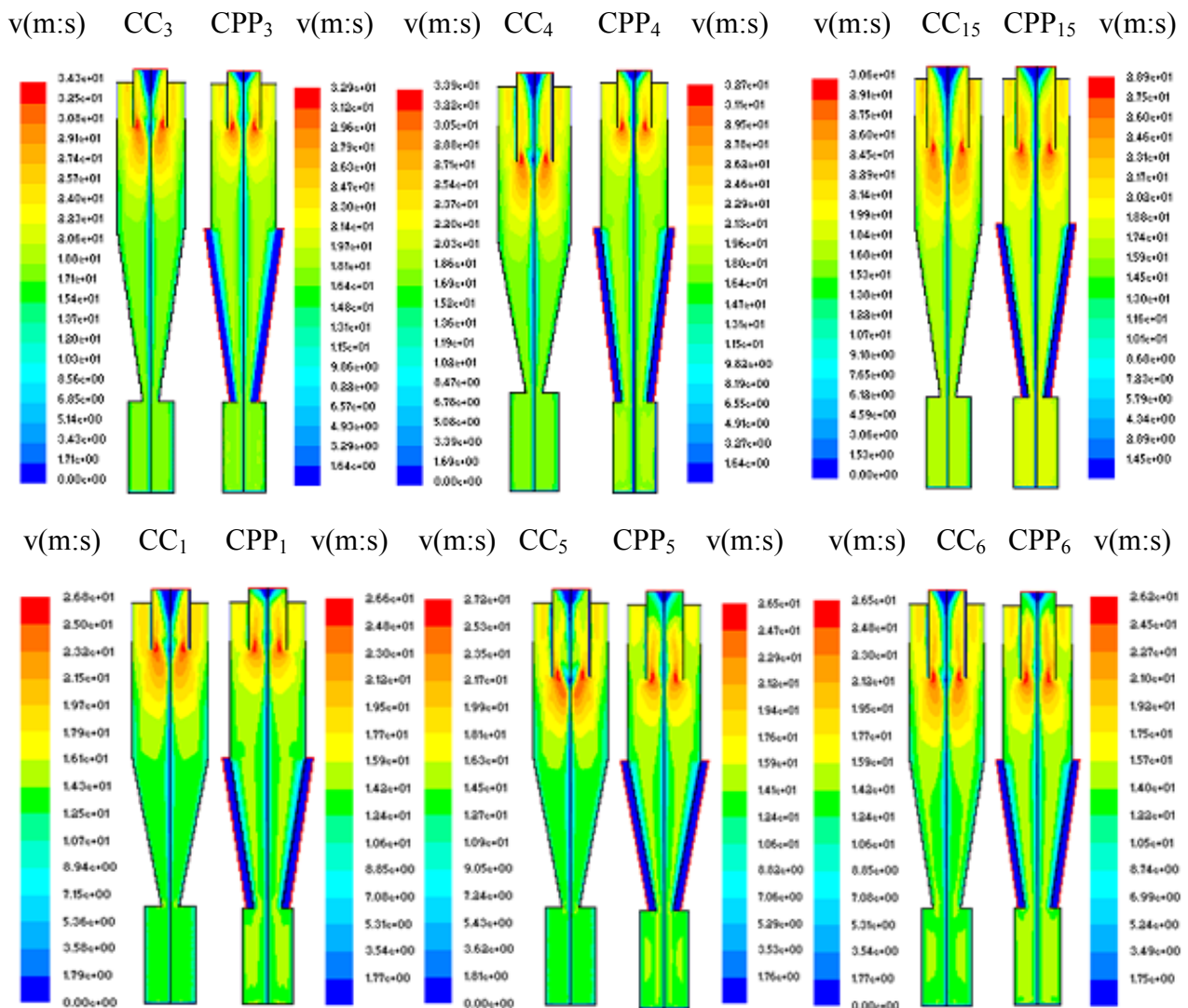


4.34 - Perfis de pressões totais para os pares de ciclones: CC₁ – CPP₁; CC₅ – CPP₅; CC₈ – CPP₈

4.5.2 – Influência da Filtração sobre a Velocidade Tangencial

Na maioria dos casos analisados ficou claro que a filtração modificou os perfis de velocidade tangencial nos ciclones.

A Figura 4.35 mostra os perfis simulados de velocidade tangencial para alguns pares de ciclones (CC₃ – CPP₃, CC₄ – CPP₄, CC₁₅ – CPP₁₅, CC₁ – CPP₁, CC₅ – CPP₅ e CC₆ – CPP₆). De acordo com as simulações realizadas em CFD, verificou-se que a filtração deu uma amortecida no movimento rotacional do fluido. Esta tendência pode ser prejudicial para a eficiência de coleta do equipamento filtrante.



4.35 – Exemplos comparativos de perfis de velocidades tangenciais entre ciclones convencionais e filtrantes

4.5.3 – Influência da Filtração sobre a Eficiência Total de Coleta e Diâmetro de Corte

A Figura 4.36 a comparação das eficiências totais de coleta obtidas experimentalmente entre os ciclones filtrantes e convencionais, segundo as 25 configurações fornecidas pelo planejamento composto central (PCC).

Pela Figura 4.36 e 4.37 verifica-se que a filtração não foi um fenômeno benéfico no processo de separação, pois nas mesmas condições operacionais dos ciclones convencionais, os ciclones filtrantes apresentaram maiores valores de diâmetro de corte e menores valores de

eficiência total de coleta. Para justificar este fenômeno, pode-se dizer que o fluido sofreu uma amortecimento no movimento rotatório dentro dos ciclones filtrantes, conforme a análise anterior dos perfis simulados de velocidade tangencial, sendo assim houve uma diminuição da intensidade do movimento espiralado do fluido e as forças centrífugas no interior dos ciclones filtrantes também diminuíram, coletando uma menor quantidade de partículas.

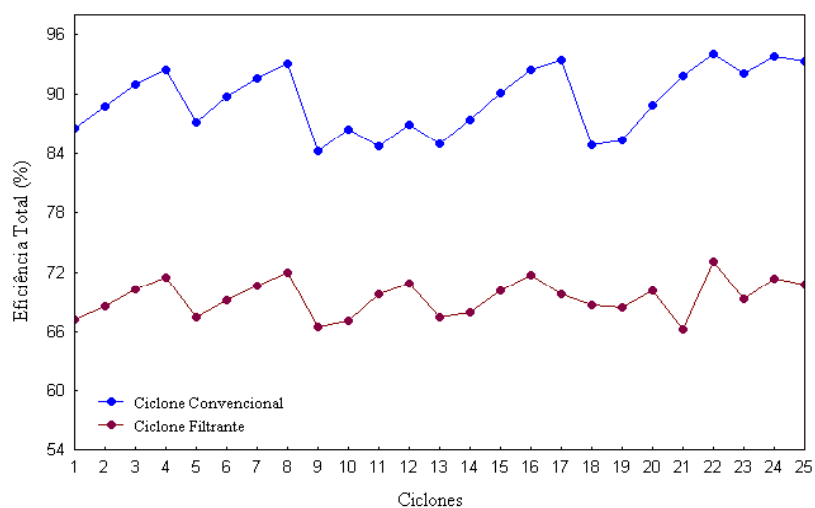


Figura 4.36 – Comparativo entre as Eficiências Totais de Coleta para os Ciclones Convencionais e Filtrantes.

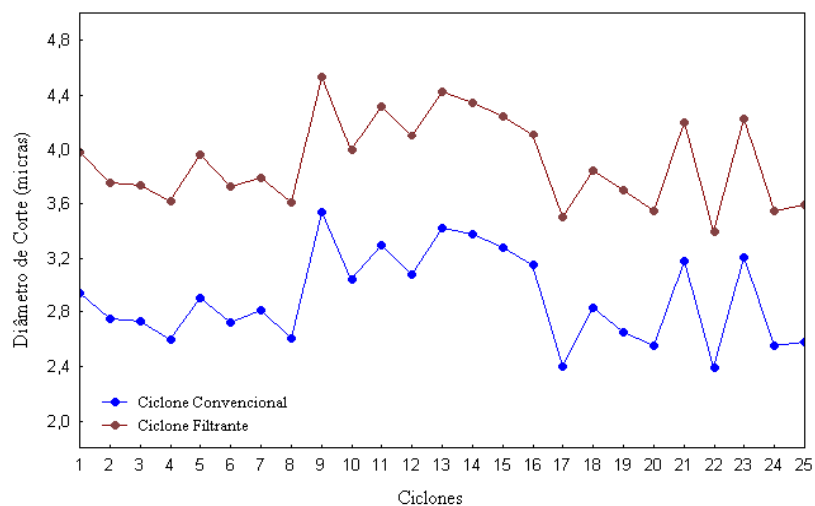


Figura 4.37 – Comparativo entre os diâmetros de corte para os ciclones convencionais e Filtrantes.

Na Figura 4.38 a seguir são apresentados perfis de velocidade radial para 4 pares de ciclones (convencionais e filtrantes) de mesma geometria. Para se compreender melhor este efeito, os perfis de velocidades radiais foram simulados próximos a parede cônica dos ciclones, a 10 cm acima do orifício do *underflow*. Vale ressaltar que os sinais negativos contidos nas velocidades radiais indicam apenas o sentido de escoamento do fluido, ou seja, da parede para o eixo dos ciclones.

Os resultados da Figura 4.38 mostram um maior arraste radial de fluido em direção ao eixo do equipamento para os ciclones filtrantes quando comparado aos ciclones convencionais. Ou seja, as partículas de um determinado tamanho, no ciclone convencional, têm maior probabilidade de permanecer na camada limite (próxima a parede) e desta forma ser coletada na corrente de *underflow* com maior facilidade.

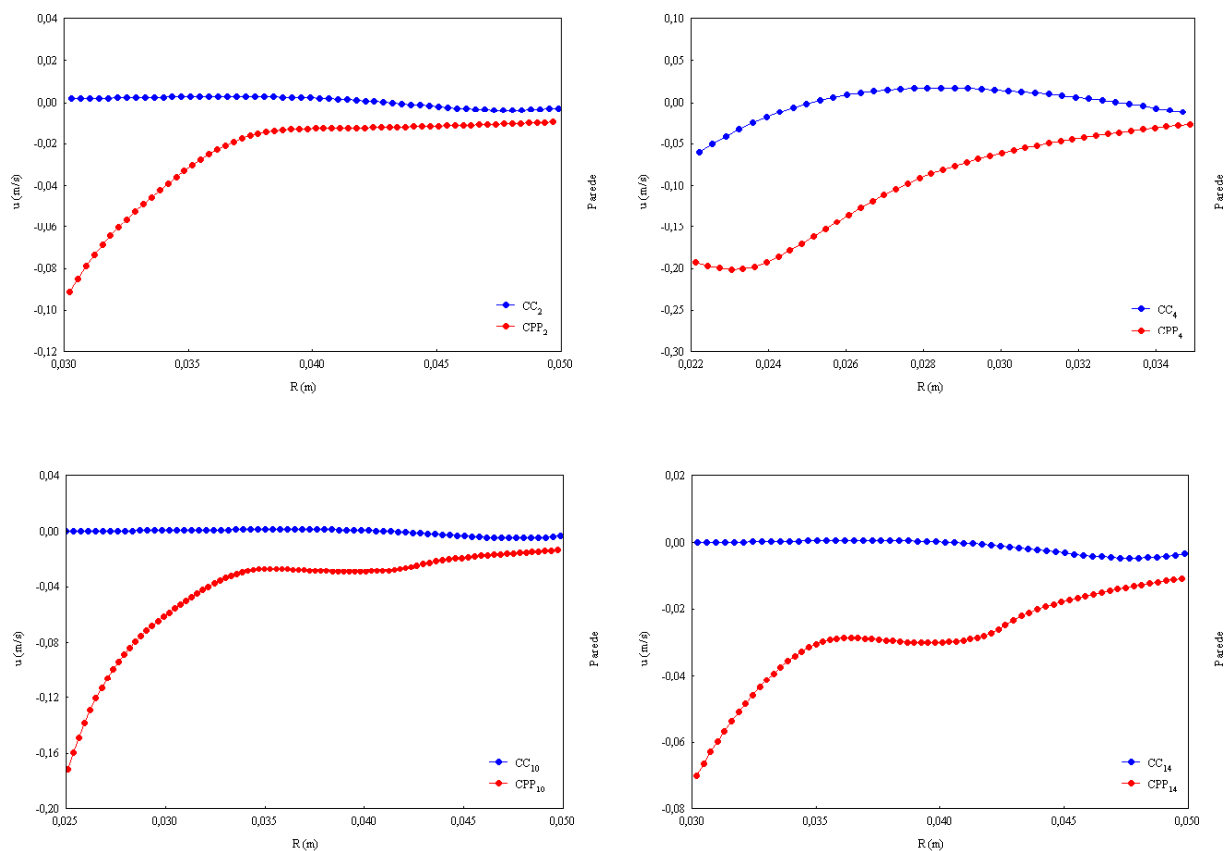


Figura 4.38 – Exemplos de perfis de velocidades radiais simulados próximos à parede dos pares CC_2 – CPP_2 , CC_4 – CPP_4 , CC_{10} – CPP_{10} e CC_{14} – CPP_{14} , a 10 cm acima do diâmetro de *underflow*.

Sendo assim a partir dos resultados experimentais e simulados das configurações dos ciclones convencionais e filtrantes analisados, observou-se que a influência das variáveis geométricas nos equipamentos convencionais e filtrantes influenciaram as respostas de forma bastante homogênea. Isto pode ser comprovado analisando o formato das Figuras 4.32, 4.36, bem como pela análise feita na seção 4.2.

A incorporação do meio filtrante foi benéfica ao reduzir o número de Euler, entretanto foi prejudicial ao aumentar o diâmetro de corte e conseqüentemente diminuir a eficiência. Sendo assim, o uso do equipamento filtrante pode ser de interesse quando se opera com suspensões de partículas não muito finas, onde a eficiência nos dois equipamentos seria alta e a queda de pressão no ciclone filtrante seria mais baixa.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - Conclusões

De acordo com os resultados e análises realizados neste trabalho pode-se concluir que:

- Os ciclones filtrantes, operando numa mesma vazão de ar dos ciclones convencionais, foram capazes de trabalhar numa menor queda de pressão. Esta diminuição foi possível porque os poros dos cones permeáveis representaram uma saída adicional de ar, o que nos ciclones convencionais não ocorre. Portanto os ciclones filtrantes apresentaram menores números de Euler e, conseqüentemente, menores consumos energéticos, esta conclusão confirma também os resultados encontrados por RODRIGUES, (2001).
- Analisando de forma conjunta os resultados experimentais e simulados, pode-se observar que a influência de cada variável, tanto para os ciclones convencionais quanto para os ciclones filtrantes foi similar. Observou-se que o aumento de Do , faz com que ocorra uma diminuição no número de Euler, que é um efeito benéfico, porém simultaneamente ocorre também uma redução na eficiência total de coleta, que é prejudicial. Para a variável Zc constata-se que ao aumentá-la faz-se com que haja um aumento na eficiência de coleta, porém este aumento de Zc provoca, também, um aumento o número de Euler. Uma elevação nos níveis de Du acarreta num decréscimo no número de Euler e um aumento na eficiência. Na faixa experimental estudada, a variável que exerceu a menor influência foi a variável Sc , o aumento desta variável conduz a uma pequena diminuição no número de Euler.
- A partir dos resultados do número de Euler para os ciclones convencionais, pode-se concluir que esta resposta apresenta um ponto ótimo (mínimo), que está relacionado com valores de X_1 (Do) e X_4 (Du) próximos do nível (+1) associados com o mais elevado nível de X_2 (Sc) e o mais baixo nível de X_3 (Zc). Sendo assim as geometrias que mais se aproximam são os ciclones CC_{14} e CC_{21} .
- Para os ciclones filtrantes, os menores números de Euler foram obtidos para valores de X_1 (Do), X_2 (Sc) e X_4 (Du) mais elevados (nível +1) associados com o mais baixo nível de X_3 (Zc).

- Outra resposta analisada neste trabalho foi o diâmetro de corte, que para os ciclones convencionais apresentou um ponto ótimo (mínimo), que está relacionado com valores de X_1 (Do) próximos do nível $(-\alpha)$ associado com X_2 , X_3 e X_4 próximo ao nível central. Sendo que o ciclone que se aproximou desta tendência foi o ciclone CC₁₇.
- Os resultados dos diâmetros de corte para os ciclones filtrantes apresentaram comportamento muito próximo do obtido para o equipamento convencional, também apresentaram um ponto ótimo (mínimo), que está relacionado com valores de X_1 (Do) próximos do nível $(-\alpha)$ associado com X_2 , X_3 e X_4 nos níveis centrais. Sendo que a geometria que mais se aproxima é o ciclone CPP₁₇.
- Foram propostos intervalos para as relações geométricas nos quais os ciclones convencionais e filtrantes conseguissem conciliar baixos números de Euler com baixos diâmetros de corte. Sendo assim, para o ciclone convencional concluiu-se que o ciclone CC₂₄ atende a essas exigências, sendo que este apresenta as seguintes relações geométricas: $Do/Dc=0,55$; $Sc/Dc=0,80$; $Zc/Dc=2,25$; $Du/Dc=0,41$.
- Os ciclones filtrantes que conciliaram baixos números de Euler e baixos diâmetros de corte foram CPP₂ e CPP₆. Estes dois equipamentos diferem entre si apenas pela relação Sc/Dc que para o CPP₂ é igual a 0,62 e para o CPP₆ é igual a 0,98. Sendo assim as relações geométricas ótimas para as demais variáveis do ciclone filtrante são as seguintes: $Do/Dc=0,50$; $Zc/Dc=2,0$; $Du/Dc=0,37$.
- As simulações em CFD foram uma importante ferramenta para um melhor entendimento da fluidodinâmica do sistema e dos mecanismos de separação em ciclones convencionais e filtrantes.

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

- Estudar a influência de outras variáveis geométricas;
- Estudar a operação de ciclones filtrantes utilizando outros tecidos;
- Realizar simulações de ciclones em 3-D.

APÊNDICES

APÊNDICE A

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FILTRANTE

Tabela A.1 – Resultados dos Ensaio de caracterização para o polipropileno

$\Delta P_{\text{placa}}(\text{cm c.a})$	$V(\text{m/s})$	$\Delta P_{\text{filtro}}(\text{cm c.a})$	$\Delta P_{\text{filtro}}(\text{Pascal})$	$\Delta P_{\text{filtro}}/\text{Lm}$
1,4	7,77	48,9	$4,79 \cdot 10^3$	$3,19 \cdot 10^6$
1,3	7,44	48,0	$4,70 \cdot 10^3$	$3,13 \cdot 10^6$
1,2	7,19	40,2	$3,94 \cdot 10^3$	$2,62 \cdot 10^6$
0,9	6,23	30,2	$2,95 \cdot 10^3$	$1,97 \cdot 10^6$
0,7	5,45	19,8	$1,94 \cdot 10^3$	$1,29 \cdot 10^6$
0,5	4,64	18,0	$1,76 \cdot 10^3$	$1,17 \cdot 10^6$
1,4	7,77	48,9	$4,79 \cdot 10^3$	$3,19 \cdot 10^6$

APÊNDICE B

REGRESSÕES MÚLTIPLAS

Tabela B₁ – Regressões múltiplas para a determinação das superfícies de respostas dos ciclones convencionais

	η	Eu	D₅₀
β	92,74	256,64	2,62
X ₁	1,75	-9,33	0,22
X ₂	1,00	-	-
X ₃	1,43	39,69	-0,11
X ₄	0,92	-7,14	0,12
X ₁ X ₂	-	-	-
X ₁ X ₃	-	-	-
X ₁ X ₄	-	-	-
X ₂ X ₃	-	-	-
X ₂ X ₄	-	-	-
X ₃ X ₄	-	-	-
X ₁ X ₁	1,57	7,56	-
X ₂ X ₂	2,31	-	-
X ₃ X ₃	-	7,49	0,13
X ₄ X ₄	-	-	0,17
R²	0,88	0,91	0,80

Tabela B₂ – Regressões Múltiplas para a determinação das superfícies de respostas dos ciclones filtrantes

	η	Eu	D₅₀
β	70,62	152,78	3,65
X ₁	0,34	-4,61	0,20
X ₂	0,35	-	-
X ₃	1,72	25,65	0,11
X ₄	0,59	-2,91	-0,13
X ₁ X ₂	-	-	-
X ₁ X ₃	-	-	-
X ₁ X ₄	-	-	-
X ₂ X ₃	-	-	-
X ₂ X ₄	-	-	-
X ₃ X ₄	-	-	-
X ₁ X ₁	-0,50	-	-
X ₂ X ₂	-0,48	-4,62	-
X ₃ X ₃	-0,35	-8,73	0,12
X ₄ X ₄	-	-	0,15
R²	0,97	0,96	0,78

APÊNDICE C

PROGRAMA PARA O CÁLCULO DO DIÂMETRO DE CORTE

Programa feito no Software Maple

```
> restart;
```

Eficiência Global de Coleta

```
> Et:=0.70;
```

Parâmetros da Análise Granulométrica

Da = 11.6; na = 0.80

Du = 15.1; nu = 1.2

RRB para a Alimentação

```
y:=1-exp(-(D/Da)^na): dy:=diff(y,D);
```

RRB para a *Underflow*

```
yu:=1-exp(-(D/Du)^nu): dyu:=diff(yu,D);
```

```
d50:=fsolve(Et*(dyu/dy)-0.5,D);
```

APÊNDICE D

VALORES SIMULADOS DO NÚMERO DE EULER

Tabela D₁ – Valores simulados de número de euler obtidos via CFD para os ciclones convencionais

Exp	Variáveis				Euler (-)	
	Do (cm)	Sc (cm)	Zc (cm)	Du (cm)	Exp	Sim
1	9,70	12,00	38,80	4,50	250,2	286,3
2	9,70	12,00	38,80	7,20	246,5	283,3
3	9,70	12,00	48,50	4,50	325,3	350,1
4	9,70	12,00	48,50	7,20	324,9	284,1
5	9,70	19,00	38,80	4,50	242,5	268,5
6	9,70	19,00	38,80	7,20	235,7	268,3
7	9,70	19,00	48,50	4,50	320,2	268,6
8	9,70	19,00	48,50	7,20	317,6	262,5
9	11,60	12,00	38,80	4,50	235,2	250,7
10	11,60	12,00	38,80	7,20	230,7	240,2
11	11,60	12,00	48,50	4,50	317,0	299,6
12	11,60	12,00	48,50	7,20	311,8	290,4
13	11,60	19,00	38,80	4,50	227,8	232,8
14	11,60	19,00	38,80	7,20	222,7	230,6
15	11,60	19,00	48,50	4,50	305,6	301,6
16	11,60	19,00	48,50	7,20	305,0	291,4
17	9,10	15,50	43,70	5,80	293,0	298,3
18	12,20	15,50	43,70	5,80	236,5	290,4
19	10,70	9,70	43,70	5,80	247,0	247,2
20	10,70	21,30	43,70	5,80	242,2	245,5
21	10,70	15,50	35,60	5,80	198,8	275,2
22	10,70	15,50	51,80	5,80	330,3	333,7
23	10,70	15,50	43,70	3,30	294,9	284,2
24	10,70	15,50	43,70	8,20	219,8	265,3
25	10,70	15,50	43,70	5,80	257,2	285,7

Tabela D₂ – Valores simulados de número de euler obtidos via CFD para os ciclones filtrantes

Exp	Variáveis				Euler (-)	
	Do (cm)	Sc (cm)	Zc (cm)	Du (cm)	Exp	Sim
1	9,70	12,00	38,80	4,50	125,5	177,87
2	9,70	12,00	38,80	7,20	119,8	176,53
3	9,70	12,00	48,50	4,50	172,7	214,96
4	9,70	12,00	48,50	7,20	171,0	210,97
5	9,70	19,00	38,80	4,50	113,3	175,41
6	9,70	19,00	38,80	7,20	111,6	174,16
7	9,70	19,00	48,50	4,50	173,2	205,19
8	9,70	19,00	48,50	7,20	165,2	203,10
9	11,60	12,00	38,80	4,50	109,5	173,26
10	11,60	12,00	38,80	7,20	104,1	168,45
11	11,60	12,00	48,50	4,50	166,3	187,35
12	11,60	12,00	48,50	7,20	161,5	184,86
13	11,60	19,00	38,80	4,50	106,9	166,41
14	11,60	19,00	38,80	7,20	100,6	162,20
15	11,60	19,00	48,50	4,50	162,0	186,96
16	11,60	19,00	48,50	7,20	160,4	182,89
17	9,10	15,50	43,70	5,80	154,7	180,73
18	12,20	15,50	43,70	5,80	143,6	148,09
19	10,70	9,70	43,70	5,80	140,4	190,13
20	10,70	21,30	43,70	5,80	142,2	178,09
21	10,70	15,50	35,60	5,80	96,4	159,13
22	10,70	15,50	51,80	5,80	163,4	209,77
23	10,70	15,50	43,70	3,30	164,9	203,63
24	10,70	15,50	43,70	8,20	148,3	180,81
25	10,70	15,50	43,70	5,80	152,5	190,46

APÊNDICE E

ANÁLISE CANÔNICA (EFICIÊNCIA TOTAL DE COLETA)

E.1 - Aplicação das técnicas da otimização e análise Canônica para Eficiência Total

E.1.1 - Ciclones Convencionais

Os ciclones convencionais dividiram-se em duas faixas de eficiências totais, os ciclones que obtiveram os menores valores, ou seja, abaixo de 90% (CC₁, CC₂, CC₅, CC₆, CC₉, CC₁₀, CC₁₁, CC₁₂, CC₁₃, CC₁₄, CC₁₈, CC₁₉ e CC₂₀). A outra faixa de eficiência, seriam para os maiores valores, acima de 90% (CC₃, CC₄, CC₇, CC₈, CC₁₅, CC₁₆, CC₂₁, CC₂₂, CC₂₃ e CC₂₄).

Com os dados experimentais da eficiência total de coleta, foi feita uma regressão múltipla, conforme a Equação E.1.

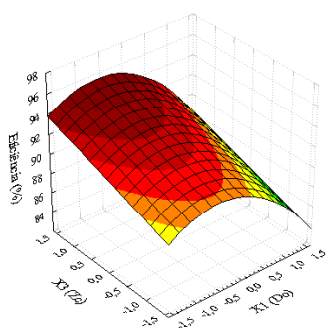
$$\eta = 92,74 + \underline{X}' \underline{b} + \underline{X}' \underline{B} \underline{X}$$

(E.1)

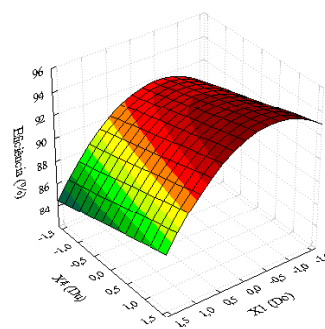
em que:

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \quad \underline{b} = \begin{bmatrix} -1,75 \\ 1,00 \\ 1,43 \\ 0,90 \end{bmatrix} \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} -1,57 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2,31 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

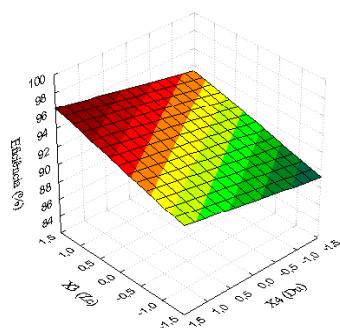
A eficiência total de coleta foi influenciada por todas as variáveis, X₁ (Do), X₂ (Sc), X₃ (Zc) e X₄ (Du), sendo que a variável que mais influenciou foi X₁.



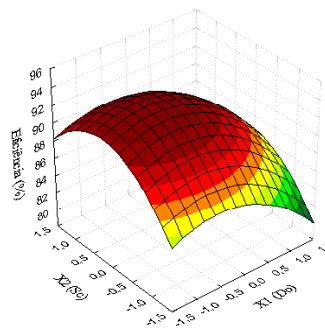
$$X_2 = 0 \text{ e } X_4 = 0$$



$$X_2 = 0 \text{ e } X_3 = 0$$



$$X_2 = 0 \text{ e } X_1 = 0$$



$$X_3 = 0 \text{ e } X_4 = 0$$

Figura E.1 – Superfície de Resposta para a eficiência do ciclone convencional segundo os pares $X_1 - X_3$, $X_1 - X_4$, $X_3 - X_4$ e $X_1 - X_2$, respectivamente.

De acordo com a Figura F.1, obtida da Equação F.1, nota-se que menores diâmetros de *overflow* (Do), maiores diâmetro do *underflow* (Du) e maiores comprimento da seção cônica (Zc) resultam em maiores eficiências.

E.1.2 - Ciclones Filtrantes

Também para os ciclones filtrantes existem duas faixas de eficiência total de coleta, os ciclones que obtiveram os menores valores, ou seja, abaixo de 70% (CC_1 , CC_2 , CC_5 , CC_6 , CC_9 , CC_{10} , CC_{11} , CC_{13} , CC_{14} , CC_{18} , CC_{19} , CC_{21} e CC_{23}). A outra faixa de eficiência, seriam para os maiores valores, acima de 70% (CC_3 , CC_4 , CC_7 , CC_8 , CC_{12} , CC_{15} , CC_{16} , CC_{20} , CC_{22} , CC_{24} e CC_{25}).

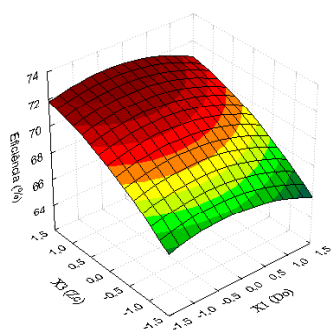
Com os dados experimentais da eficiência total de coleta, foi feita uma regressão múltipla, conforme mostra a Equação E.2.

$$\eta = 70,63 + \underline{X}' \underline{b} + \underline{X}' \underline{B} \underline{X} \quad (\text{E.2})$$

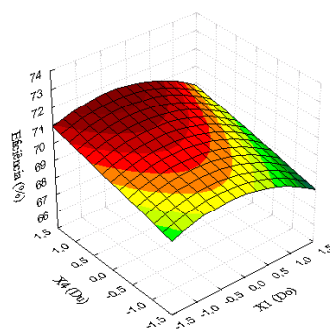
em que:

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \quad \underline{b} = \begin{bmatrix} -0,34 \\ 0,35 \\ 1,72 \\ 0,59 \end{bmatrix} \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} -0,50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,48 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,35 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

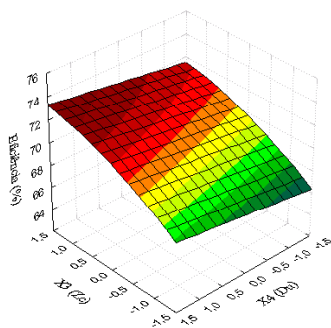
A Figura E.2 apresenta a superfície de resposta obtida a partir da Equação F.2.



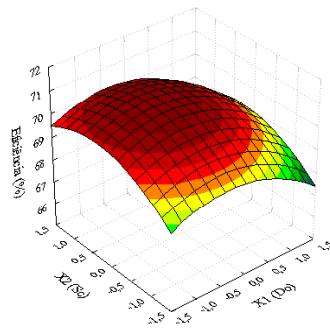
$X_2 = 0$ e $X_4 = 0$



$X_2 = 0$ e $X_4 = 0$



$X_1 = 0$ e $X_2 = 0$



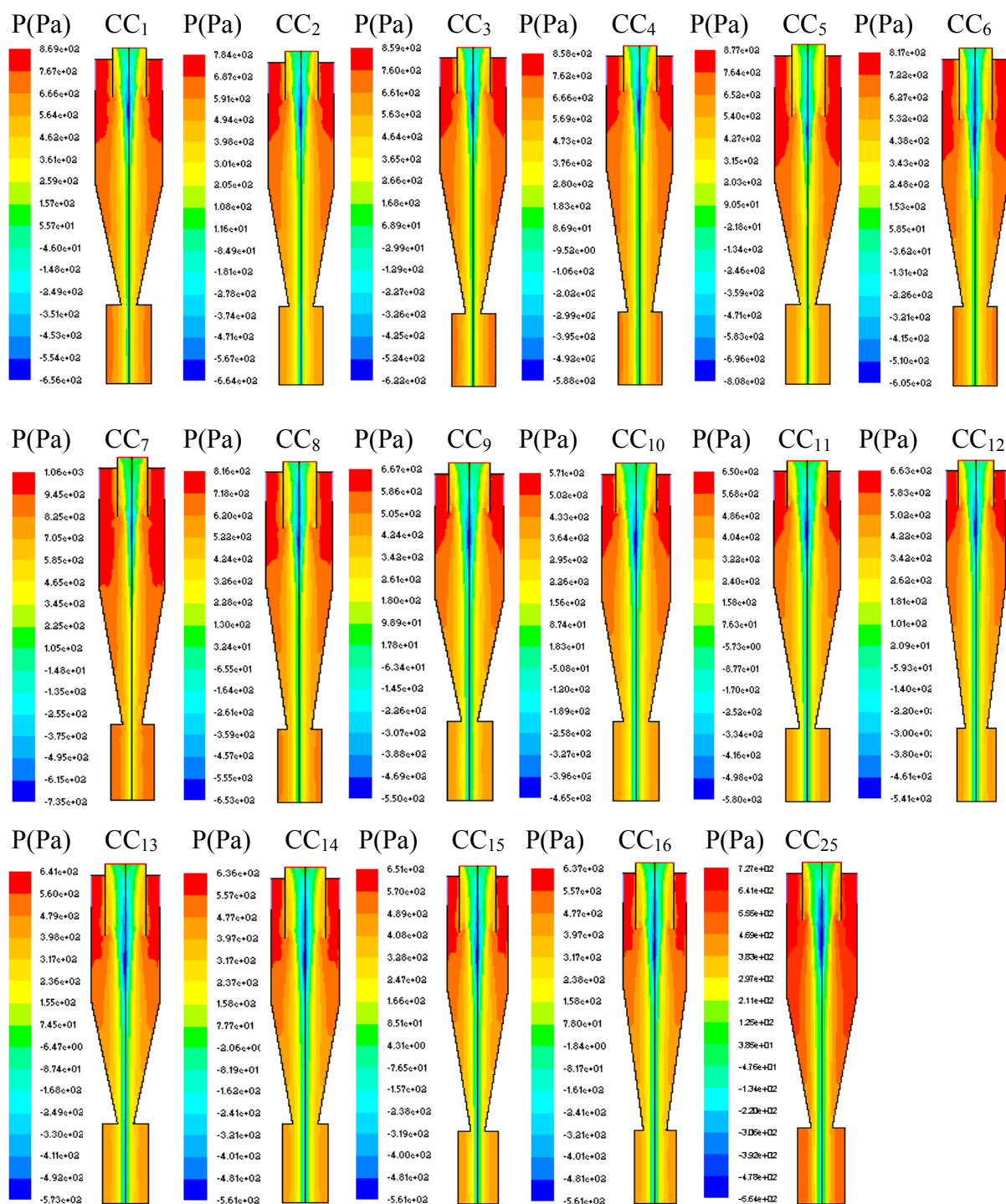
$X_3 = 0$ e $X_4 = 0$

Figura E.2 – Superfície de resposta para eficiências totais para ciclone filtrante de polipropileno para os pares $X_1 - X_3$, $X_1 - X_4$ e $X_3 - X_4$, respectivamente.

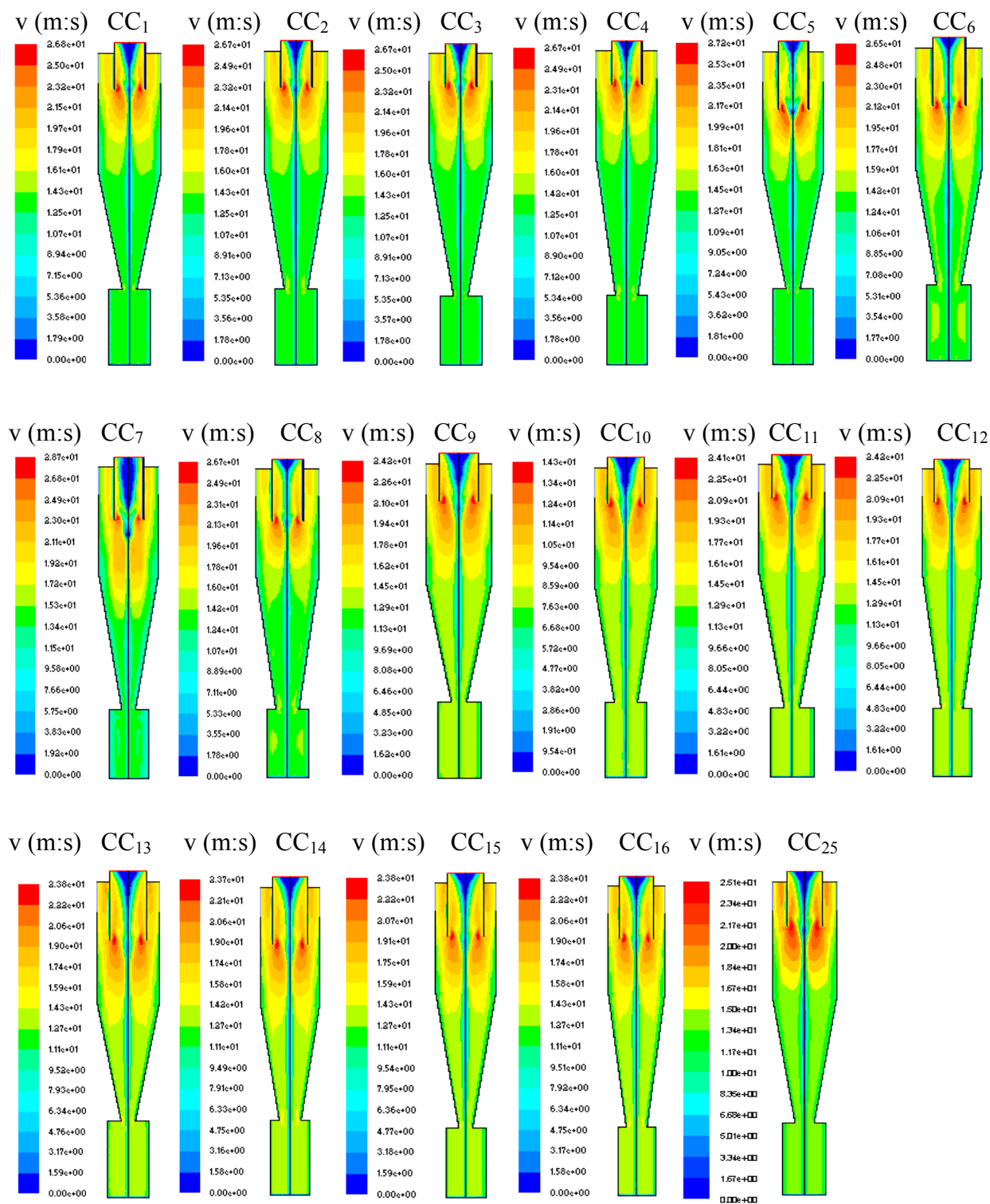
De acordo com as Figuras E.2, notou-se que o comportamento das variáveis X_1 (Do), X_2 (Sc), X_3 (Zc) e X_4 (Du) foi semelhante ao dos ciclones convencionais, ou seja, todas exerceram influência sobre a eficiência total de coleta.

APÊNDICE F

CICLONES CONVENCIONAIS SIMULAÇÕES



F.1 - Perfis de Pressões Totais para os ciclones convencionais CC₁, CC₂, CC₃, CC₄, CC₅, CC₆, CC₇, CC₈, CC₉, CC₁₀, CC₁₁, CC₁₂, CC₁₃, CC₁₄, CC₁₅, CC₁₆ e CC₂₅, respectivamente.



F.2 - Perfis de velocidades tangenciais para os ciclones convencionais CC₁, CC₂, CC₃, CC₄, CC₅, CC₆, CC₇, CC₈, CC₉, CC₁₀, CC₁₁, CC₁₂, CC₁₃, CC₁₄, CC₁₅, CC₁₆ e CC₂₅ respectivamente.

APÊNDICE G

CICLONES FILTRANTES SIMULAÇÕES

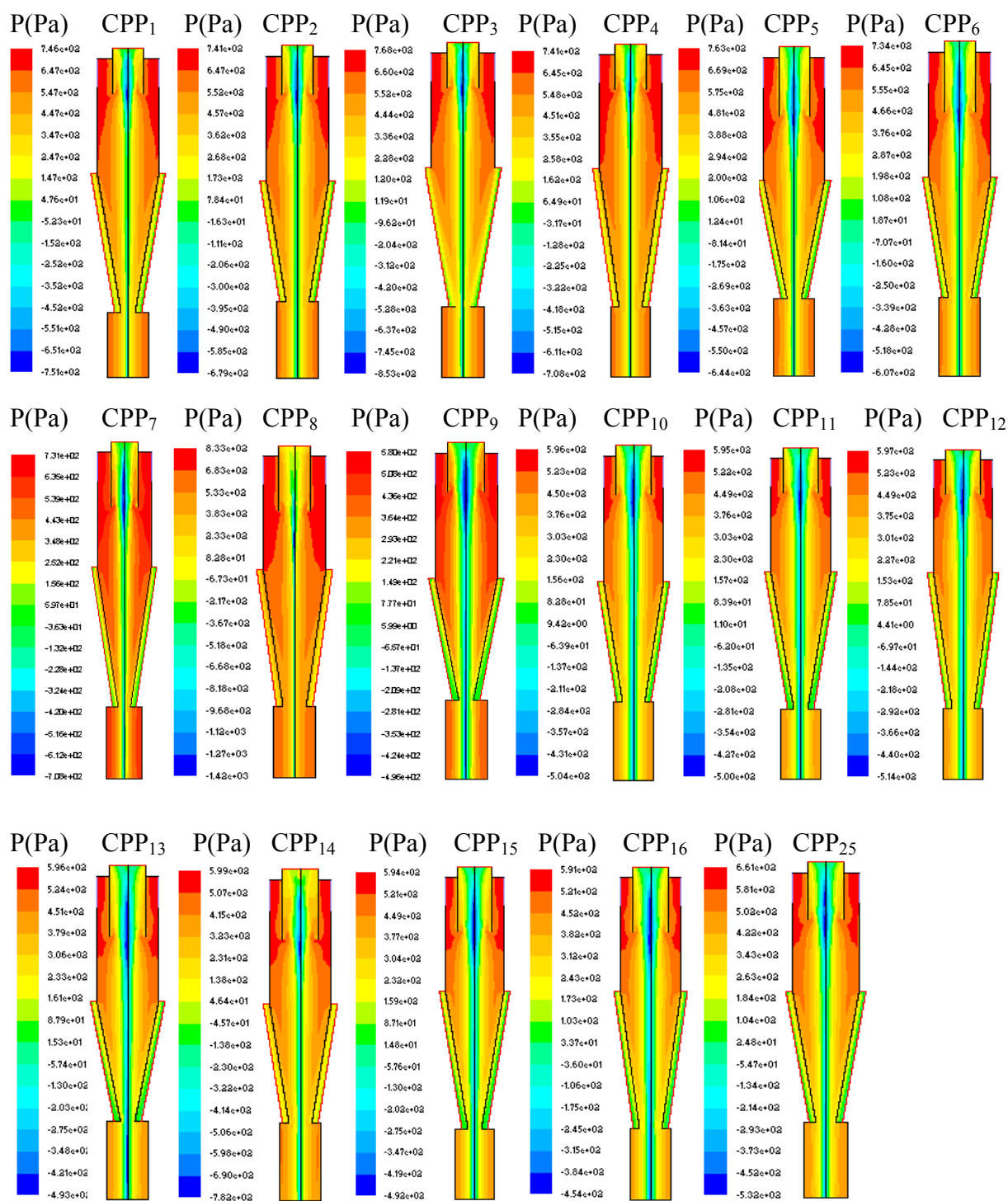


Figura G.1 – Perfis de Pressões Totais para os ciclones filtrantes CPP₁, CPP₂, CPP₃, CPP₄, CPP₅, CPP₆, CPP₇, CPP₈, CPP₉, CPP₁₀, CPP₁₁, CPP₁₂, CPP₁₃, CPP₁₄, CPP₁₅, CPP₁₆ e CPP₂₅ respectivamente.

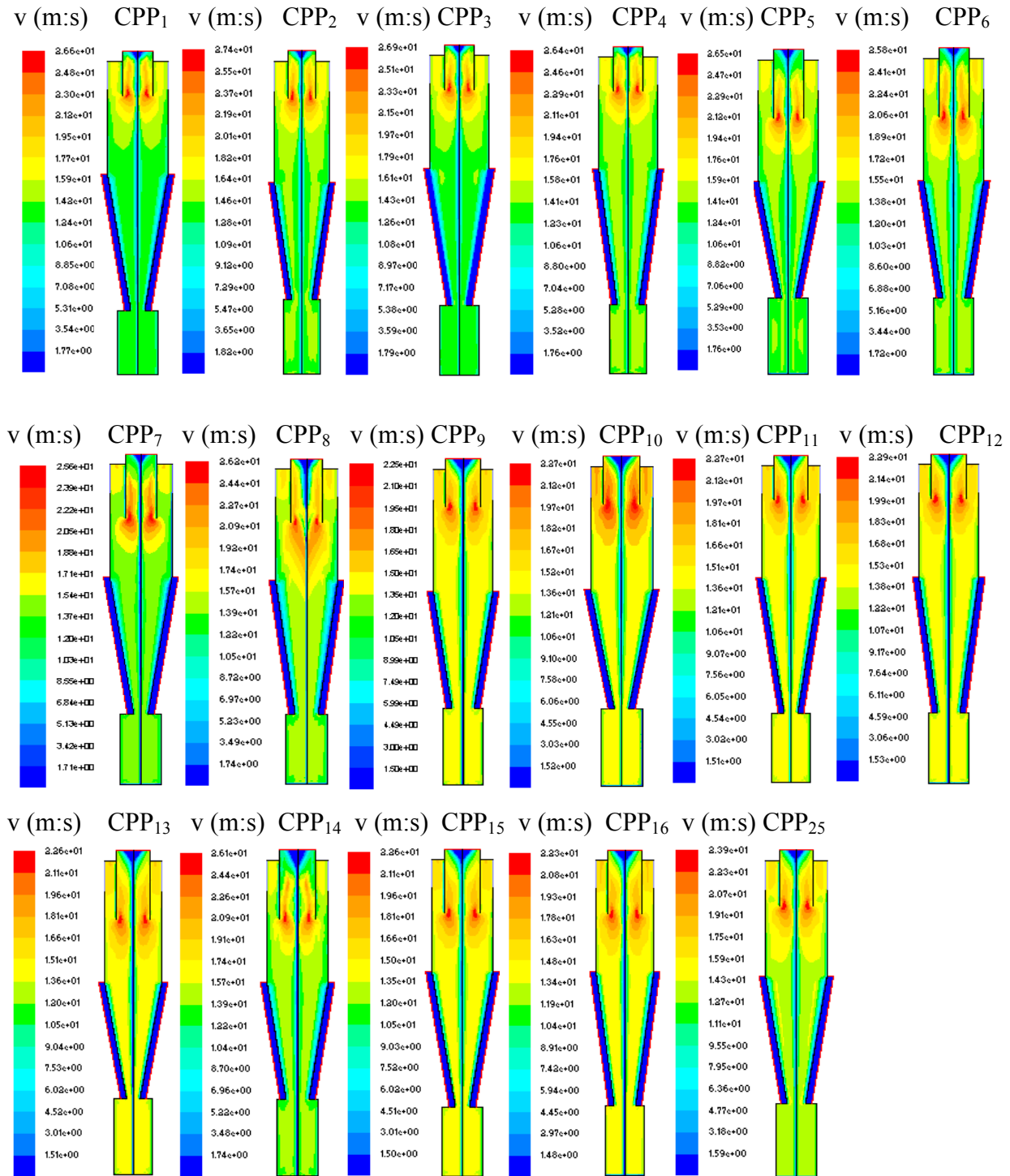


Figura G.2 – Perfis de velocidades tangenciais para os ciclones filtrantes CPP₁, CPP₂, CPP₃, CPP₄, CPP₅, CPP₆, CPP₇, CPP₈, CPP₉, CPP₁₀, CPP₁₁, CPP₁₂, CPP₁₃, CPP₁₄, CPP₁₅, CPP₁₆ e CPP₂₅ respectivamente.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ALLEN, T. Particle size Measurement, 3rd edition, Chapman and Hall, London, 1981.
- ANDRADE, A. C; BARROZO, M. S; DAMASCENO, J. J. R. Estudo do efeito do tamanho da seção cônica sobre o desempenho de ciclones com mangas. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, Natal, 2002.
- AVCI, A., *Effects of Flow and Geometrical Parameters on the Collection Efficiency in Cyclone Separators*. Journal of Aerosol Science_vol. 34, pg 937-955, 2003.
- BARBOSA, E. A. Performance de Hidrociclones Filtrantes com Geometria Demco. Dissertação de Mestrado, Uberlândia, MG, 2003.
- BARROZO, M. A. S., DAMASCENO, J. J. R; HENRIQUE, H. M, Estudo da Dinâmica de um Sedimentador Filtrante. ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 15, p. 303-310, Uberlândia, 1987.
- BARROZO, M. A. S., DAMASCENO, J.J.R; LANNA, A. E. Estudo de desempenho de um hidrociclone filtrante. Revista Ciência & Engenharia. Uberlândia, 1. 1992. p. 175-186.
- BARTH, W., *Design and Layout of the Cyclone Separator on the Basis of New Investigations*. Warne Kraft, vol.8, pg1-9, 1956.
- BASKAKOV, A. P., DOLGOV, V. N., GOLDOBIN, Y. M., *Aerodynamics and Heat Transfer in cyclone with Particle-laden Gas Flow*. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 3, pg 597-602, 1990.
- BERNARDO, S., *Estudo dos escoamentos Gasoso e Gás-Sólido em Ciclones pela Aplicação de Técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD)*. Tese de Doutorado, FEQ/UNICAMP, Campinas, 266p, 2005.

- BLOOR, M. I. G., INGHAM, D. B., *The Flow in Industrial Hydrocyclones*. Journal Fluid Mechanics, vol. 178, pg. 507-519, 1987.
- BOX, M. J., HUNTER, W. G., HUNTER, J.S, “Statistics for Experiments: An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building”, John Wiley and Sons, New York, 1978.
- BOYSAN, F., AYERS, W.H., SWITHENBANK, J, “A Fundamental Mathematical Modeling Approach to Cyclone Design”, Trans. IChemE, Vol. 60, p.222-230,1982.
- CARNEIRO, A. L. M. Caracterização de Partículas Sólidas. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro RJ., COPPE/UFRJ, 1981.
- CAVASSENO, V. Industrial Air Pollution Engineering, McGraw-Hill, USA, 1980.
- CORRÊA, J. L., GRAMINHO, D. R., SILVA, M. A., NEBRA, S. A., *The Cyclone Dryer-A Numerical and Experimental Analysis of the Influence of Geometry on Average Particle Residence Time*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 21, no 01, pg. 103-112, 2004.
- CRISTEA, E. D., MALFA, E., *3D Simulation and Experiments of Cement Rotary Kiln Pre-Heater Top Cyclone*. Anais of Fluent European User's Group Meeting, Harrogate, U. K, 18pp, 9-10 Junho, 1994.
- CRISTEA, E. D., COGUE, A., *3D Numerical Computation and Validation of High Solid Loading Flow Inside a Gas Cyclone Separator*, Proceedings of FEDSM' 98: ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting Washington, DC, 7pp, 1998.
- DAMASCENO, J. J. R & MASSARANI, G. Estudo de um sedimentador contínuo com fundo filtrante. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 14, Campinas, 1986. Anais... Campinas, 1986, p. 283-290.

- DIETZ, P. W., *Collection Efficiency of Cyclone Separators*. AIChE vol. 27 n^o 6, pg 888-892, 1981.
- DUGGING, R. K. and FRITH, P. C. W., “Turbulence Anisotropy in Cyclones”, *Filtration and Separation*, p. 394-397, 1987.
- FASSANI, F. L., L. GOLDSTEIN., *A Study of the Effect of High Inlet Solids Loading on a Cyclone Separator Pressure Drop and Collection Efficiency*. *Powder Technology* vol. 107, pg 60-65, 2000.
- FLUENT INC., “Fluent 6.1 User’s Guide”, Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, February 2005.
- GIMBUN, J., CHUAH, T. G., CHOONG, T. S. Y., FAKHRU'L-RAZI, A., *Prediction of the Effects of Cone Tip Diameter on the Cyclone Performance*. *Journal of Aerosol Science*, vol.36, n. 8, pg 1056-1065, 2005.
- HOEKSTRA, A. J., DERKSEN, J. J., VAN DEN AKKER, H. E. A., *An Experimental and Numerical Study of Turbulent Swirling Flow in Gas Cyclones*. *Chemical Engineering Science*, vol. 54, pg. 2055-2065, 1999.
- HOFFMANN, A. C., A. VANSANTEN, et al., *Effects of Geometry and Solid Loading on the Performance of Gas Cyclones*. Powder Technology vol. 70 n^o 1, pg 83-91, 1992.
- HOFFMANN, A. C., JONGE, R., ARENDS, H., HANRATS, C., *Evidence of the Natural Vortex Length and Its Effect on Separation Efficiency of Gas Cyclone*. *Filtration and Separation*, vol. 32, 799-804, 1995.
- HOFFMANN, A C., CROOT, M., PENG, W., DRIES, H. W. A and KATER, J., “ Advantages and Risks in Increasing Cyclones Separator Length”, *AIChE Journal*, Vol. 47, n. 11, 2001.

- IOZIA, D. L. AND D. LEITH., *The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency*. Aerosol Science and Technology vol. 12 no 3, pg 598-606, 1990.
- JO, Y., TIEN, C., RAY, M. B., “Development of a Post Cyclone to Improve the Efficiency of Reverse Flow Cyclones”, Powder Technology, Vol. 113, p. 97-108, 2000.
- LAPPLE, C. E. Dust and mist collection. In: PERRY, J. H., ed. Chemical Engineering handbook. 3rd Ed. New York, McGraw-Hill, 1951. p. 1013-1050.
- LAUNDER, B. E. and SPALDING, D. B., “The Numerical Computational of Turbulence Flows”, Compl. Math. Applied Mech. Eng., Vol. 3, p. 269-289, 1974.
- LAUNDER, B. E., REECE, G. J., RODI, W., “Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure”, J. Fluid Mech., Vol. 68, n. 3, p. 537-566, 1975.
- LEONARD, B. P. and MOKHTARI, S., “ULTRA-SRARP Nonoscillatory Convection Schemes for High-Speed Steady Multidimensional Flow”, NASA TM 1-2568 (ICOMP-90-12), NASA Lewis Research center, 1990.
- LEITH, D. and LICHT, W. The collection efficiency for cyclone type particle collectors – A new theoretical approach. AIChE Symposium Ser., v. 68, n. 126, 1972, p. 196-206.
- LIM, K. S. KIM, H. S. and LEE, K. W., “Characteristics of the Collection Efficiency for a Cyclone with Different Vortex Finder Shapes”, J. Aerosol Sci., Vol. 35, p. 743-754, 2003.
- LUCAS, R. D. Influência das Variáveis operacionais e do tipo de material pulverulento na formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos. São Carlos, UFScar, 2000. 137p.
- MALISKA, C. R., “Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: Fundamentos e Coordenadas Generalizadas”, ed. LTC, Rio de Janeiro, 1995.

- MASSARANI, G. Fluidodinâmica em Sistemas Particulados. Editora UFRJ, Rio de Janeiro RJ, 1997, p. 47-77.
- MATTESON, M. J.; Filtration: Principles and Practices. New York, Marcel Dekker Inc. 1986
- MEIR, H. F., "Modelagem Fenomenológica e Simulação Bidimensional de Ciclones por Técnicas da Fluidodinâmica Computacional", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil, p. 210, 1998.
- MINKOWYCZ, W. J., SPARRROW, E. M., SCHNEIDER, G. E., PLECTHER, R. H., "Handbook of Numerical Heat Transfer", Ed. John Wiley & Sons Inc., New York, 1988.
- MONTAVON, C. A., GROTHJANS, H., HAMIL, I. S., PHILLIPS, H. W., JONES, I. P., *Mathematical Modelling and Experimental Validation of flow in a Cyclone*. BHR Conference on cyclone Technologies, May-June, 2000
- NORILER, D., VEGINI, A. A., SOARES, C., BARROS, A. A. C., MEIER, H. F., MORI M. A. *New Role for Reduction in Pressure Drop in Cyclones Using Computational Fluid Dynamics Techniques*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 21 n^o 01, pg.93-101, 2004.
- OGAWA, A., *Mechanical Separation Process and flow patterns of Cyclone Dust Collectors*. Ind. Applied Mech. Ver., vol 50, n^o 03, pg. 97-130, 1997.
- PATANKAR, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Ed. Hemisphere Pub. Co., NY, 1980.
- PATTERSON, P. A and MUNZ, R. J., "Gás and Particle Flow Patterns in Cyclones at Room and Elevated Temperatures" Canadian J. Chem. Eng., Vol. 74, p. 213-221, 1996.
- RODI, W., "Examples of Turbulence Models for Incompressible Flows", AIAA J., Vol. 20, p. 872-879, 1976.

- RODRIGUES, M. V., Análise do Desempenho de um Ciclone com Mangas: Efeito da Permeabilidade do Meio Filtrante. Dissertação de Mestrado, Uberlândia. 2001, 95p.
- RODRIGUES, M. I., and IEMMA, Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos: uma estratégia seqüencial de planejamentos, Ed. Casa do Pão, Campinas – SP, 2005.
- ROTA, J. C., “Statistical Theory of Inhomogeneous Turbulence”, Z. Phys, Vol. 129, p. 547-559, 1951.
- SHEPHERD, C. B., LAPPLE, C. E., *Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors*. Ind. Engineering Chemistry, vol 31, n^o 08, pg. 972-983, 1939.
- SILVA, M. A. & NEBRA, S., “Numerical Calculations of Gás-Solids Flow in a Cyclone”, Comunicação Pessoal, UMICAMP, 1994.
- SILVA, M. K, Estudo de Modelagem Numérica Tridimensional de Ciclones do Tipo Lapple para Separação Gás-Sólidos, Dissertação de Mestrado, Florianópolis. 2006, 79p.
- SILVEIRA-NETO, A, “Turbulência nos fluidos aplicada”, Apostila, UFU, Uberlândia – MG, 2001
- SOUZA, F. J. Análise da influência do meio filtrante no comportamento do hidrociclone filtrante. Dissertação de Mestrado, Uberlândia. 1999, 81p.
- VIEIRA, L. G. M. Análise da separação sólido-líquido em um hidrociclone filtrante. Relatório de Iniciação Científica. PIBIC/CNPq-UFU. Uberlândia. 1997.
- VIEIRA, L. G. M. Estudo da performance de hidrociclone filtrantes de Rietema. Dissertação de Mestrado, Uberlândia. UFU. 2001.
- VIEIRA, L. G. M., Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia MG, Brasil, 2006.

- YOSHIDA, H., “Three-Dimensional Simulation of Air Cyclone as a Hydraulic Classifier”, Chemical Engineering Japan, Vol. 19, p. 632-640, 1996.
- YUU, S., JOTAKI, T., TOMITA, Y., YOSHIDA, K., “The Reduction of Pressure Drop Due to Dust Loading in a Conventional Cyclone”, Chem. Eng. Science, Vol. 33, p. 1573-1580, 1978.
- XIANG, R. B. and LEE, K. W. “ Numerical Study of Flow Field in Cyclones of Different Height”, Chemical Engineering and Processing, vol. 44, p. 877-883. 2004.
- XIANG, R. B. PARK. S. H. & LEE, K. W. “ Effects of cone dimension on cyclone performance”, J. Aerosol Sci, Vol. 32, p. 549-561. 2001.
- ZHANG and QIAN Study of the natural vortex length of a cyclone with response surface methodology. Chemical Engineering and Process, vol. 29, pg. 2155-2162, 2005.
- ZHAO, B., Development of a New Method for Evaluating Cyclone Efficiency. Chemical Engineering and Process, vol. 44, pg. 447-451, 2005.
- ZHOU, L. X. and SOO, S. L., “Gás-Solid Flow and Collection of Solid in a Cyclone Separator”, Powder Technology, Vol. 63, p. 45-53, 1990.
- ZHOU, L. X. and SOO, S. L., “On Boundary Conditions of Particle Phase and Collection Efficiency in Cyclones”, Powder Technology, Vol. 64, p. 213-220, 1991.
- ZHU, Y. and LEE, K. W. “Experimental Study on Small Cyclones Operating at High Flowrates”, J. Aerosol Sci., Vol. 30, n. 10, p. 1303-1315, 1999.

