

## 6.3.2 MODELITZACIÓ MECANICISTA DEL PROCÉS D'ABSORCIÓ

Per a una millor comprensió dels fenòmens físics i químics que es desenvolupen a l'interior del tub venturi durant el procés d'absorció, es fa necessari disposar d'eines que permetin extrapolar per a qualsevol condició d'operació i geometria. Aquesta característica no és proporcionada per la modelització estadística, vàlida només per l'interval definit com a domini experimental. Per altra banda, l'efecte de les característiques geomètriques del sistema apareix de forma únicament implícita en aquests models, de forma que la seva utilitat en el disseny d'instal·lacions a escala industrial és molt limitada, i es restringeix a les dimensions assajades en la fase experimental.

Per aquests motius, en aquest apartat es presenta un model de tipus mecanicista, és a dir, basat en lleis fonamentals, per a l'absorció en un sistema jet-venturi '*scrubber*'. Aquest tipus de models permeten quantificar l'efecte de les variacions, tant dels paràmetres operacionals com dels geomètrics, sobre l'eficàcia d'absorció. Es considerarà en primer lloc un sistema format exclusivament per a gotes que presenten una distribució caracteritzable mitjançant un únic diàmetre (diàmetre mig de Sauter), i que tenen existència durant la seva trajectòria al llarg del tub venturi. Posteriorment, s'estudiarà l'efecte de considerar en el model el procés d'absorció que té lloc en la pel·lícula de líquid descendent que es forma immediatament a la sortida de l'atomitzador. Amb això es pretén demostrar l'existència de mecanismes de transferència de matèria addicionals al ja coneguts, proporcionats per les gotes formades en l'atomitzador.

### 6.3.2.1 ELECCIÓ DEL MODEL PER A L'ABSORCIÓ AMB REACCIÓ QUÍMICA EN UNA GOTTA

Malgrat que existeixen models per descriure el procés de transferència de matèria a l'interior d'una gota, basant-se en els processos convectius que es produeixen quan aquesta circula en caiguda lliure o amb velocitat forçada en un corrent gasós (Baboolal *et al.*, 1981; Altwicker i Lindhjem, 1988), el model utilitzat en aquest estudi és més simplista en aquest sentit. En concret considera una distribució radial homogènia de la concentració d'espècies químiques a l'interior de la gota. Així el procés d'absorció passa a ser un fenomen de superfície, de major simplicitat matemàtica, ja que permet la determinació de solucions analítiques de les equacions que descriuen els processos.

El pas més crític consisteix a seleccionar les condicions de contorn més adequades, per tal de resoldre el balanç de matèria en estat no estacionari corresponent a l'equació 6.1.8. Aquestes condicions de contorn venen caracteritzades per les propietats de les fases gas i líquida durant el procés de mescla a l'interior del reactor (tub venturi).

Una de les possibles condicions avaluades (Crank, 1975; Hills, 1995) és la suposició d'una concentració del solut gasós constant a la superfície de la gota (apartat 6.1.3.1). Aquesta condició implica que la resistència a la transferència de matèria a la fase gas és negligible, la qual cosa a la pràctica només pot ser aplicable en el cas que la fase gasosa estigui compost únicament pel solut pur. Per altra banda, l'expressió analítica obtinguda presenta una expressió amb un sumatori que tendeix a presentar dificultats de convergència a mesura que la constant de velocitat de reacció (?) assoleix valors grans.

Ravindram i Pyla (1985) utilitzaren com a condició de contorn un volum de gas finit per a cada gota. Aquesta suposició pot fonamentar-se en el fet que els autors utilitzaren un tub venturi amb un angle per al difusor molt petit (inferior a  $2^\circ$ ). Considerant a més que els autors utilitzaren un 'scrubber' tipus Pease-Anthony, la possible aparició de flux homogeni entre el gas i el líquid avalaria aquesta suposició. Els autors utilitzaren la solució analítica proposada per Crank (1975) i proposaren un mètode de càlcul. Aquest treball fou criticat per Dutta *et al.* (1987) a causa de la gran quantitat d'inconsistències que presenta el treball de Ravindram i Pyla. Tot i que aquests autors justificaren posteriorment algunes d'aquestes inconsistències (Ravindram, 1987), encara resten dos aspectes reprovables en el seu estudi. En primer lloc negligeixen la resistència a la transferència de matèria per la fase gas. Tal i com indiquen Hikita *et al.* (1977) i Chang i Rochelle (1981) l'absorció de baixes concentracions de  $\text{SO}_2$  en dissolucions aquoses de NaOH, és un procés reactiu pràcticament instantani, de forma que tota la resistència a la transferència es situa en la fase gas. En segon lloc, i utilitzant les constants físiques proporcionades pels mateixos autors, el model no té solució numèrica, a causa de l'elevat valor de la constant cinètica.

Pel cas de cinètiques finites, existeixen dues possibles condicions de contorn addicionals, aplicables a sistemes venturi 'scrubber':

- ~~☒~~ Resistència a la transferència de matèria en la fase gas amb concentració constant.
- ~~☒~~ Resistència a la transferència de matèria en la fase gas amb volum finit de gas.

Aquestes dues condicions, descrites i resoltes en els apartats 6.1.3.3 i 6.1.3.4 respectivament, serien adequades en sistemes on els processos reactius no fossin instantanis, no essent aquest el cas de processos àcid-

base com l'absorció de  $\text{SO}_2$  i  $\text{H}_2\text{S}$  en  $\text{NaOH}$  i  $\text{NH}_3$  en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (els casos estudiats en el present estudi).

Tal i com ja s'ha comentat, la visió més realista dels processos estudiats és aquella on es considera que el solut gasós difon a través de l'aire per a ser absorbit en la superfície del líquid. Posteriorment, i en una localització anomenada pla de reacció (Hikita *et al.*, 1972, 1977), situada per sota de la interfície gas-líquid, experimenta un procés de reacció instantani, passant a formar part de la fase líquida en forma iònica. Tenint en compte les elevades concentracions d'agents reactius (que ultrapassen en excés aquelles necessàries estequiomètricament), pot considerar-se que el pla de reacció i la interfície estan situats en la mateixa localització. Hills (1995) argumenta que per utilitzar aquesta aproximació només cal comprovar que el flux d'agent reactiu cap a la superfície de la gota sigui superior al del solut gasós des del si del gas. Aquesta comprovació fou efectuada determinant la velocitat a la que eren transportats els ions  $\text{OH}^-$  i  $\text{H}^+$  (responsables del procés d'absorció química), cap a la superfície de la gota, suposant les condicions més desfavorables en què podria operar la instal·lació. Aquestes són resumides en la taula 6.3.2 per al cas de l'absorció de  $\text{SO}_2$ .

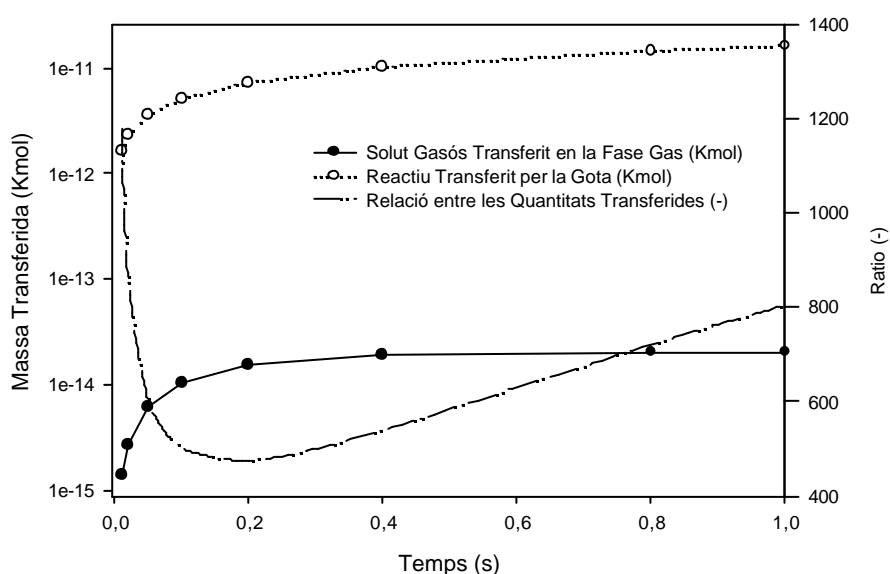
Taula 6.3.4: Condicions per l'avaluació de la velocitat de transport de l'agent reactiu per al cas del  $\text{SO}_2$

Gas		Líquid	
$F_G$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	1700	$F_L$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	2.5
$[\text{SO}_2]_{\text{inicial}}$ (ppm)	600	$[\text{OH}^-]_{\text{liquid}}$ ( $\text{Kmol}/\text{m}^3$ )	0.4
		$[\text{OH}^-]_{\text{interfície}}$ ( $\text{Kmol}/\text{m}^3$ )	0
		$d_g$ (?m)	700

Els fluxos d'agent reactiu i de gas solut són representats en el gràfic 6.3.16 en forma de massa transferida en funció del temps de contacte, així com la relació existent entre aquestes magnituds (eix d'ordenades de la part dreta del gràfic). Els temps representats són inferiors a 1 segon, ja que en els sistemes venturi '*scrubber*' no és probable d'utilitzar temps de residència superiors pel que fa a les gotes.

És evident que la quantitat d'agent reactiu transferida és àmpliament superior a la transferida des de la fase gasosa. En el pitjor dels casos, quan els temps de contacte són de l'ordre de una o dues dècimes de segon, la relació entre ambdues quantitats és superior a 500.

Pel cas del sistema  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{SO}_4$ , l'espècie reactiva en la fase líquida és l'espècie iònica  $\text{H}^+$ , la qual presenta un coeficient de difusió efectiu a 20 °C que pràcticament duplica el de l'ió  $\text{OH}^-$ . D'aquesta manera i recordant que les concentracions d'amoniac emprades en aquest estudi foren molt baixes, pot assegurar-se que la relació entre el flux d'espècie absorbent i absorbida serà encara més gran que pel cas del diòxid de sofre.



Gràfic 6.3.16: Quantitats transferides a la interfície pel gas i pel líquid absorbent per a les condicions de la taula 6.3.4.

Així doncs es calculà el rendiment d'absorció teòric tot i integrant l'expressió 6.1.26 per tal d'obtenir el flux de matèria absorbit per unitat de temps. Pel seu càlcul es fa necessari utilitzar els diàmetres mitjos de Sauter avaluats en el capítol 5.1, així com utilitzar la fracció mitjana de líquid en forma de gotes obtinguda a partir de la informació determinada en el capítol 5.3. L'avaluació del coeficient de transferència de matèria per a la fase gas, fou avaluat a partir del nombre de Sherwood obtingut a partir de dues correlacions empíriques. La primera d'elles, descrita per Sherwood *et al.*(1975), fou emprada en els estudis de Cooney (1985), Talaie *et al.* (1997) i Brogren i Karlsson (1997). Quant a la segona, proposada per Steinberger i Treybal (1960) fou utilitzada per Uchida i Wen (1973), Hills (1995) i Hills *et al.* (1996).

El model emprat cal considerar-lo com una aproximació a causa de les simplificacions que conté, necessàries per tal de facilitar la resolució del problema per mètodes simples que no requereixen tècniques matemàtiques sofisticades. Algunes de les simplificacions proposades són:

- ~~///~~ La gota es comporta com una esfera rígida, no variant el seu diàmetre al llarg del seu pas pel tub venturi.
- ~~///~~ Els efectes de compressibilitat del gas són menyspreables.
- ~~///~~ No es té en compte l'arrossegament de gotes des de la pel·lícula i la deposició cap aquesta, en el procés de transferència de matèria.
- ~~///~~ No hi ha evaporació del líquid.
- ~~///~~ Els calors de reacció i de dissolució són negligibles.
- ~~///~~ La temperatura a l'interior de la gota és uniforme i constant al llarg del seu pas pel tub venturi.

La fracció de líquid que circula per les parets es manté pràcticament constant al llarg del tub venturi, per a cada combinació de cabal de líquid i de gas.

L'agent absorbent que conté la gota no és exhaurit completament durant el procés d'absorció.

De totes aquestes simplificacions, probablement només dues poden ser posades en dubte, i poden tenir un efecte important en el rendiment d'absorció. El fet de negligir la interacció entre les gotes i la pel·lícula mitjançant els mecanismes de deposició-arrossegament, implica subestimar la capacitat del sistema de renovar les gotes amb menor quantitat de reactiu (que viatgen pel centre de la canonada), amb noves gotes procedents del film (menys exhaurides). L'altre aspecte controvertible fa referència al gruix de la pel·lícula de líquid. Aquest ha estat avaluat considerant que el cabal de líquid que circula per les parets roman constant al llarg del tub venturi. Aquesta suposició és relativament agosarada si es tenen presents els perfils obtinguts en el capítol 5.3 (gràfics 5.3.28-5.3.32).

La resta de simplificacions semblen raonables, i en tot cas, no afectarien en gran mesura els rendiments d'absorció avaluats.

### 6.3.2.2 MODELITZACIÓ DE L'ABSORCIÓ DE $\text{SO}_2$ NEGLIGINT LA PEL·LÍCULA DE LÍQUID

No és fàcil trobar en la bibliografia estudis i dades contrastables amb les del present treball. La majoria dels treballs efectuats fins a la data es limiten a proposar models que permetin predir les eficàcies d'eliminació de sistemes venturi '*scrubber*', sense aportar dades experimentals per a ser contrastats (Boyadzhiev, 1964; Cooney, 1985; Kleinman i Reed, 1995;

Hills, 1995; Talaie *et al.*, 1997; Brogren i Karlsson, 1997; Wang *et al.*, 1997). Existeixen però alguns treballs que aporten dades experimentals com poden ser els de Johnstone *et al.* (1954), Kuznetsov i Oratovskii (1962), Elenkov i Boyadzhiev (1967), Uchida i Wen (1973), Ravindram i Pyla (1985), Cooney i Olsen (1987) i Hills *et al.* (1996). Val a dir que la majoria dels treballs anteriors fan referència a sistemes venturi 'scrubber' tipus Pease-Anthony i en menor mesura al tipus d'aproximació humida. Només existeixen dos treballs en la bibliografia dedicats a l'estudi de la transferència de matèria en sistemes jet-venturi 'scrubber', corresponents als de Atay *et al.* (1987) i Wright *et al.* (1997).

En aquest estudi es presenten les dades obtingudes amb el model esmentat en l'apartat anterior, conjuntament amb les dades experimentals adequades. S'empren les dades obtingudes pel SO<sub>2</sub> i les diferents combinacions de colls i atomitzadors:

- ☞ Coll simple de 150 mm de diàmetre i atomitzador A.
- ☞ Coll simple de 150 mm de diàmetre i atomitzador B.
- ☞ Coll de doble llargada de 150 mm de diàmetre i atomitzador A.
- ☞ Coll de doble llargada de 150 mm de diàmetre i atomitzador B.
- ☞ Coll simple de 100 mm de diàmetre i atomitzador B.

**a) Coll simple de 150 mm de diàmetre i atomitzador A**

Les comparatives entre les dades experimentals i les proporcionades pel model posen observar-se en els gràfics 6.3.17-6.3.19, corresponents a tres composicions diferents per a la fase gasosa, inclosos els límits superior i inferior del domini experimental descrit en el capítol 6.2.

Per aquesta combinació de coll i atomitzador, s'observa una clara tendència del model a predir rendiments d'absorció inferiors a aquells



determinats experimentalment. La tendència es compleix per a totes les concentracions representades, observant-se una lleugera millora de les prediccions a mesura que la concentració inicial del gas augmenta.

No hi ha discussió possible sobre l'efecte beneficiós de l'augment del cabal d'agent absorbent, tant des del punt de vista teòric com experimental. Aquest fet també és observat per Johnstone (1954), Elenkov i Boyadzhiev (1967), Belhaj *et al.* (1983), Ravindram i Pyla (1985), Cooney i Olsen (1987), Hills *et al.* (1996) i Talaie *et al.* (1997).

Una diferència important en el comportament de les dades reals i les teòriques, és que, per a les primeres, l'efecte de variar el cabal de gas portador no sembla tenir un pes gaire important en l'eficàcia de rentat. Per als valors teòrics, aquest paràmetre afecta en gran mesura, apareixent variacions de fins a un 20 % entre els cabals de gas màxim i mínim emprats en les representacions, per a un valor fix de cabal d'agent absorbent.

Les dades experimentals mostren un lleuger descens de l'eficàcia de rentat a mesura que augmenta la concentració inicial de gas contaminant. Aquest és el comportament observat per Volgin *et al.* (1968), accentuant-se a partir de concentracions del solut gasós superiors al 10 %. Així doncs, com més saturada la solució absorbent amb el solut a absorbir, pitjors són els rendiments obtinguts. Cal tenir present, però, que a baixes concentracions poden aparèixer problemes a causa de la debilitat de la força impulsora (gradient de concentracions entre la interfície i el nucli del fluid)

És evident doncs que tot i les prediccions més optimistes quant al volum de líquid en forma de gotes que viatgen a través del tub venturi, el model teòric no descriu correctament el procés d'absorció, observant-

se discrepàncies molt importants sobretot a baixos cabals de líquid absorbent.

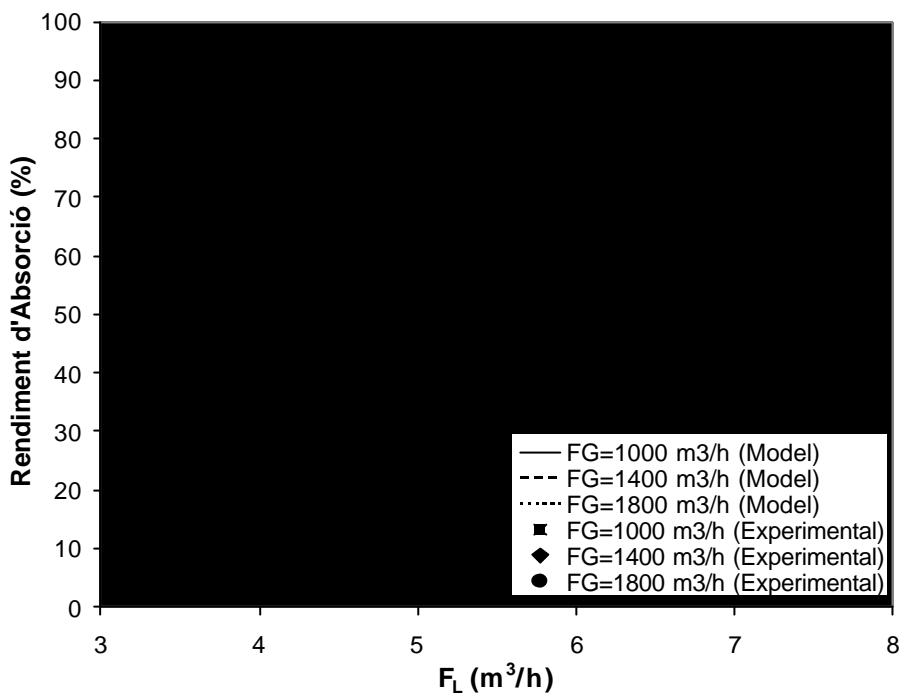


Figura 6.3.17: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al coll simple de 150 mm i l'atomitzador A amb una  $[SO_2]_i=130$  ppm.

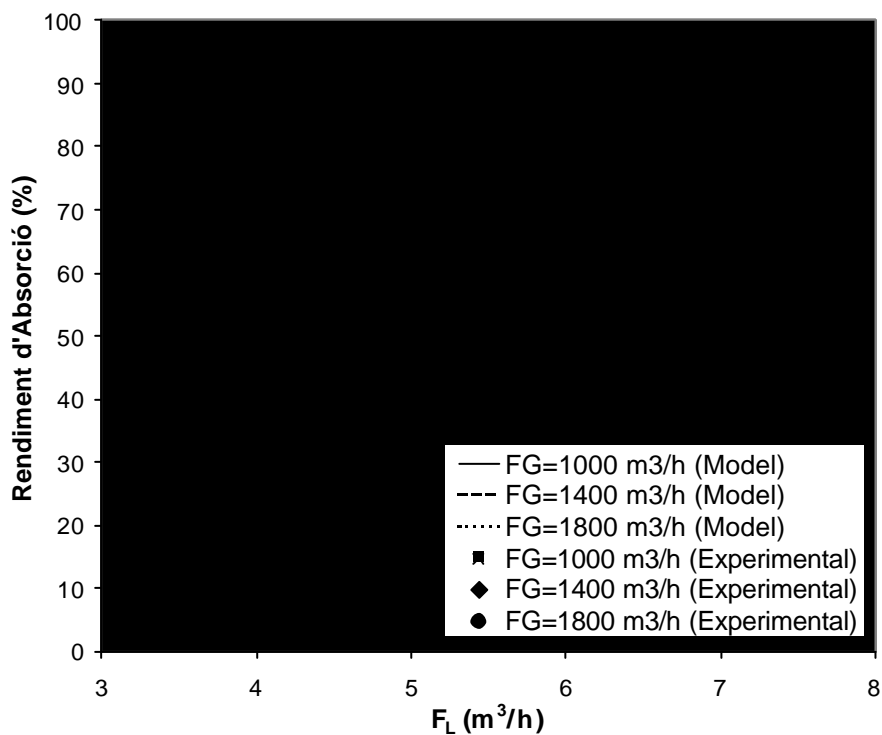


Figura 6.3.18: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al coll simple de 150 mm i l'atomitzador A amb una  $[\text{SO}_2]_i=350$  ppm.

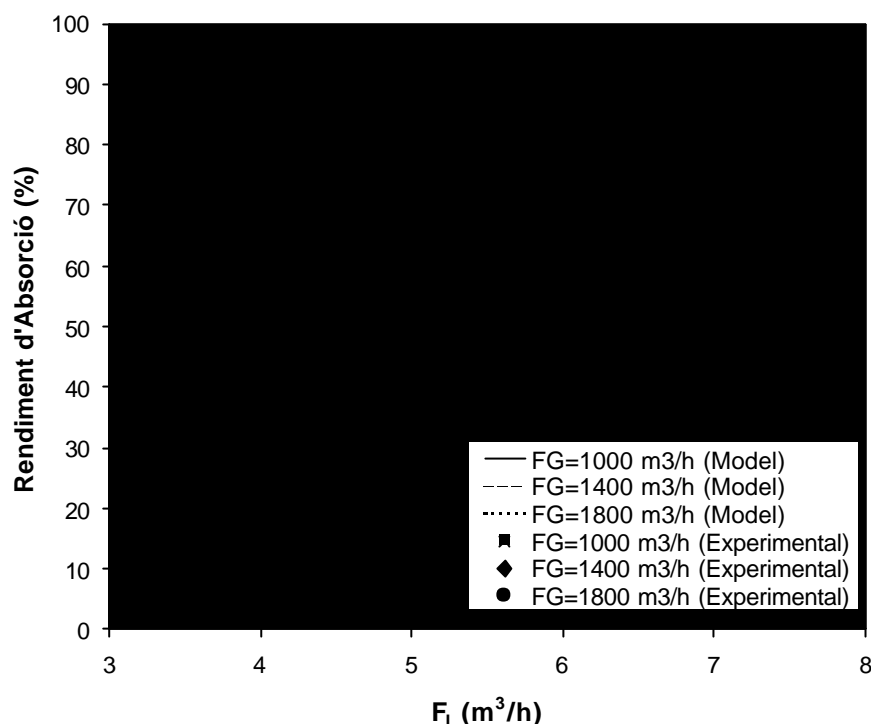


Figura 6.3.19: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al coll simple de 150 mm i l'atomitzador A amb una  $[\text{SO}_2]_i=600$  ppm.

L'increment de rendiment en augmentar el cabal volumètric de gas, predit en el model teòric, cal atribuir-lo a l'augment de la velocitat relativa per a un cabal de líquid fixat ( $U_G - U_L$ ). La no aparició d'aquest fenomen per a les dades experimentals podria indicar que la suposició de flux homogeni efectuada per Uchida i Wen (1973), és adequada. En aquestes condicions, la velocitat relativa és zero, i totes les correlacions per al càlcul del coeficient de transmissió de matèria en la fase gas determinen un valor de 2 pel nombre de Sherwood. Aquesta condició, però, considerada com la més pessimista en l'eficàcia d'absorció donaria valors teòrics encara inferiors.

Tal i com s'ha comentat en l'apartat 6.3.1, les dades experimentals mostren uns rendiments màxims per a un cabal de gas portador de 1400 m<sup>3</sup>/h. No existeix cap explicació raonable per aquest fet. És clar, però, que les variacions en aquest factor no tenen una influència destacada, de forma que els rendiments per als cabals  $F_G$  representats màxim i mínim són pràcticament els mateixos per a una concentració donada. Kuztsetsov i Oratovskii (1962) determinaren un punt òptim d'operació a partir de la relació  $F_L/F_G$ . En aquest sentit els autors destaquen que un augment de  $F_G$ , mantenint constant  $F_L$ , tant pot comportar un augment com un descens del rendiment, en funció de la regió de treball on es situa el sistema. És a dir, en la regió cinètica (per a sistemes amb velocitats de reacció baixes) un augment de  $F_G$  disminueix l'eficàcia del sistema. Per contra, en la regió difusional (altes velocitats de reacció), un augment de  $F_G$  promou una millora del rendiment.

Totes les gotes han estat integrades considerant el mateix temps de residència per a cadascuna d'elles. Aquesta simplificació és qüestionable si es té present que l'atomitzador emprat produeix una dispersió de gotes amb una component de velocitat radial important. És a dir, una gran part de les gotes assoliran les parets abans d'abandonar el difusor, de forma que el seu temps d'existència és menor que el considerat. Així doncs, en realitat, les prediccions probablement haurien de ser un xic pitjors.

El tipus de reacció desenvolupada en la fase líquida en el present treball fa que sigui inqüestionable el fet que no existeix resistència en la fase líquida, o si més no que aquesta sigui inferior a l'oposada per la fase gas (tot i que treballs com els de Ravindram i Pyla (1985) i Cooney (1985), assumeixen que aquesta és menyspreable). Per tant es fa evident que hi ha algun altre fenomen de gran incidència en la transferència de matèria que no ha estat comptabilitzat fins ara en aquest treball ni en la bibliografia existent relacionada amb sistemes venturi '*scrubber*'.

**b) Coll simple de 150 mm de diàmetre i atomitzador B**

L'efecte d'utilitzar un atomitzador amb un angle de sortida inferior provoca tal i com s'ha comentat en l'apartat 6.3.1 una caiguda generalitzada en els rendiments d'absorció si es comparen amb els obtinguts amb la mateixa geometria del coll i l'atomitzador A (gràfics 6.3.20-6.3.22). Aquest fet que ha estat relacionat amb el major diàmetre de les gotes formades també presenta alguna contradicció, ja que el temps de residència d'aquestes gotes és superior donada la menor velocitat de sortida de l'atomitzador. A més a més, tal i com raonen Hills *et al.* (1996), com majors són les gotes, més probabilitat presenten de veure's afectades per fenòmens de coalescència. Aquesta es tradueix en un augment de les pertorbacions en la superfície de les gotes, provocant una no estacionalitat que contribueix a una major absorció.

Contràriament a la tendència observada en el mateix coll i l'atomitzador A, els rendiments experimentals i els procedents del model presenten una millor coincidència. L'efecte d'augmentar el cabal de líquid absorbent presenta una evolució molt similar per ambdues representacions, mentre que per a l'atomitzador A es feia evident una menor incidència d'aquest factor en les dades experimentals. De fet, tal i com s'ha comentat en l'apartat 6.3.1, és més lògic pensar en una relació de tipus exponencial entre el rendiment i el cabal de líquid.

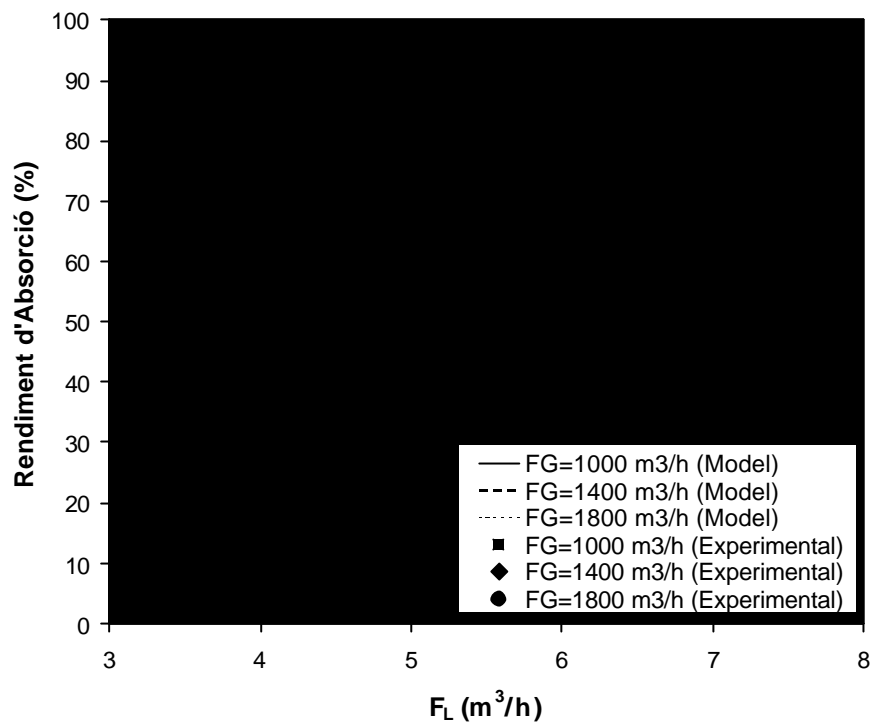


Figura 6.3.20: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al coll simple de 150 mm i l'atomitzador B amb una  $[SO_2]_i=130$  ppm.

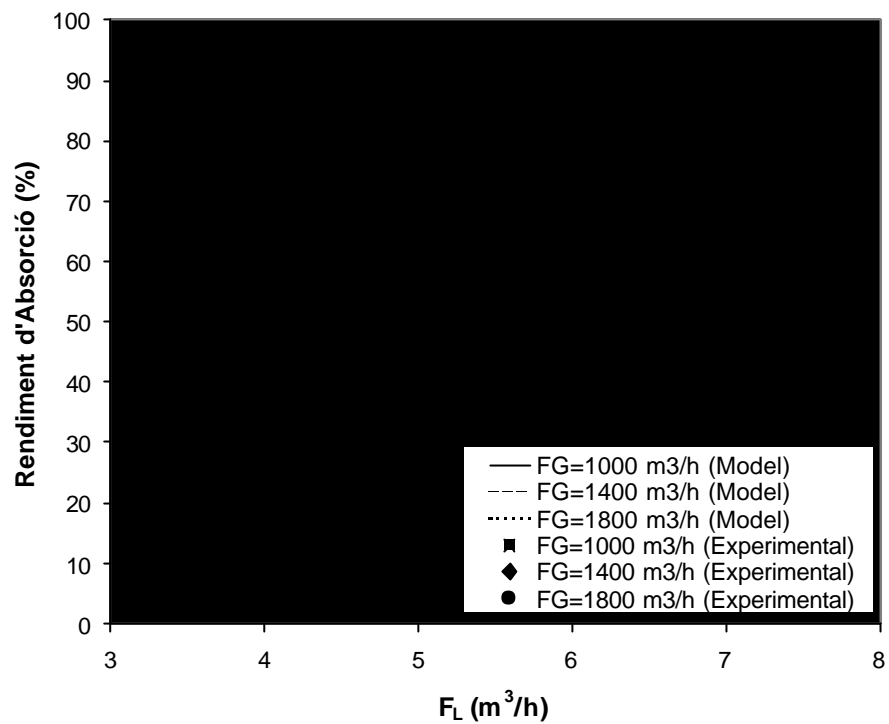


Figura 6.3.21: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al coll simple de 150 mm i l'atomitzador B amb una  $[SO_2]_i=350$  ppm.

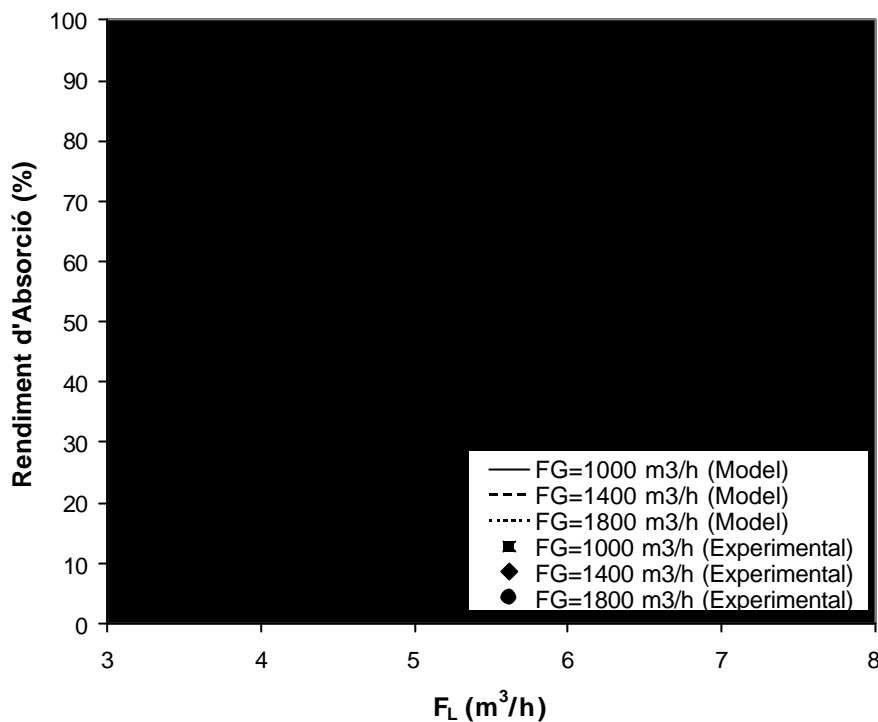


Figura 6.3.22: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al coll simple de 150 mm i l'atomitzador B amb una  $[SO_2]_i=600$  ppm.

No s'observa, tal i com es constata en l'anàlisi de les superfícies de resposta, un valor del cabal de gas portador que maximitzi els rendiments d'absorció, de forma que un augment de  $F_G$  comporta un descens del rendiment. Aquesta tendència es fa més acusada a mesura que augmenta la concentració inicial de l'agent contaminant.

Per a la concentració inicial inferior (130 ppm), no s'aprecia de forma clara la tendència del model a predir rendiments inferiors a aquells determinats experimentalment (tendència observada notablement amb l'atomitzador A). A mesura que s'augmenta aquesta concentració inicial, comença a aparèixer una major discrepància. Tot i així, els valors teòrics només difereixen entre un 10 i un 15 % dels reals, i fonamentalment les majors diferències apareixen per al cabal de gas superior. És destacable l'excel·lent grau de concordança observat en els rendiments per al cabal de gas inferior (sobretot per a les concentracions de 350 i 600 ppm).



**c) Coll de doble llargada de 150 mm de diàmetre i atomitzador A**

L'efecte més immediat de l'allargament del coll en el procés d'absorció és un augment (lleuger) del temps de residència de les gotes, respecte d'aquell obtingut pel mateix atomitzador i el coll simple. Així doncs, si realment existeix un altre mecanisme d'absorció simultani al desenvolupat per les gotes, amb aquesta configuració hauria de tenir menor incidència. De fet si hom compara els gràfics corresponents a l'atomitzador A per al coll simple i les d'aquesta configuració (gràfics 6.3.23-6.3.25), es detecta que, efectivament, per aquesta darrera configuració, les prediccions del model teòric són lleugerament millors. Si més no, no s'observen les grans discrepàncies detectades a baixos cabals de líquid.

També es detecten coincidències pel que fa a la dèbil influència de la variació del cabal de gas portador en l'eficàcia de rentat, tot i que cal tenir present que el marge de cabals emprats és força limitat. No s'observa l'aparició del màxim d'absorció per a cabals de gas de 1400 m<sup>3</sup>/h, observant-se a més a més una inversió en l'ordre habitual (major rendiment per a menor cabal de gas) per a la concentració de gas inicial inferior.

Una altra diferència notable en les relacions model-experiments amb el coll simple, és que, en la configuració actual, un increment en el cabal de líquid ocasiona un increment en el rendiment de la mateixa magnitud tant pels valors reals com pels teòrics. Cal recordar que per al coll simple, els pendents de les corbes teòriques eren més accentuats que en les dades experimentals.

Els rendiments observats són lleugerament inferiors, la qual cosa confirma el fet que realment hi ha un altre mecanisme d'absorció complementari al descrit per les gotes, ja que es compleixen les condicions per a un major rendiment (major temps de residència i major pèrdua de pressió), mentre que aquest no es produeix.

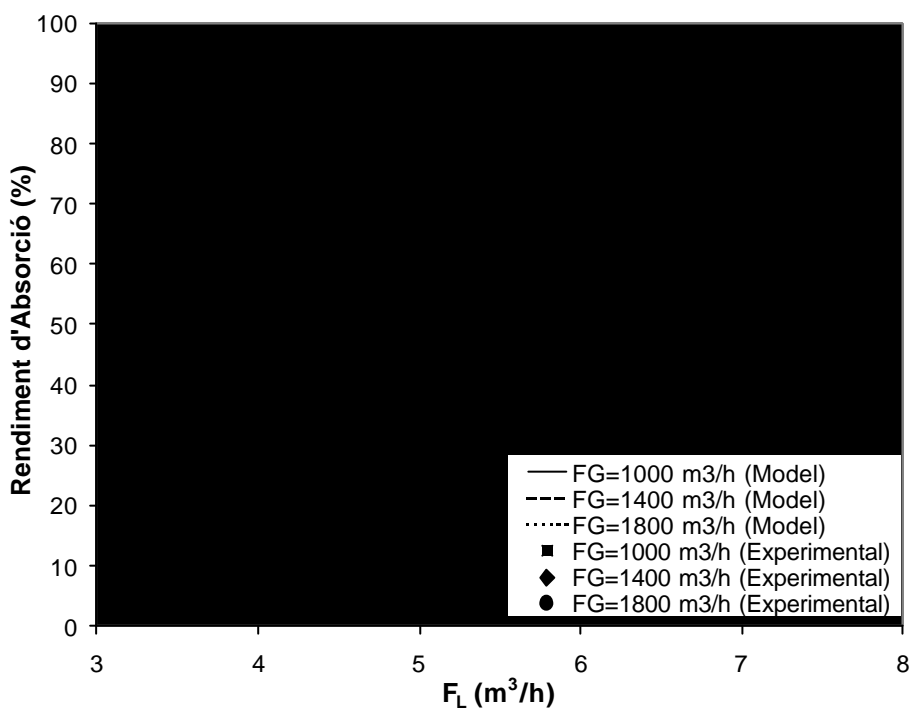


Figura 6.3.23: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al doble coll de 150 mm i l'atomitzador A amb una  $[SO_2]_i=130$  ppm.

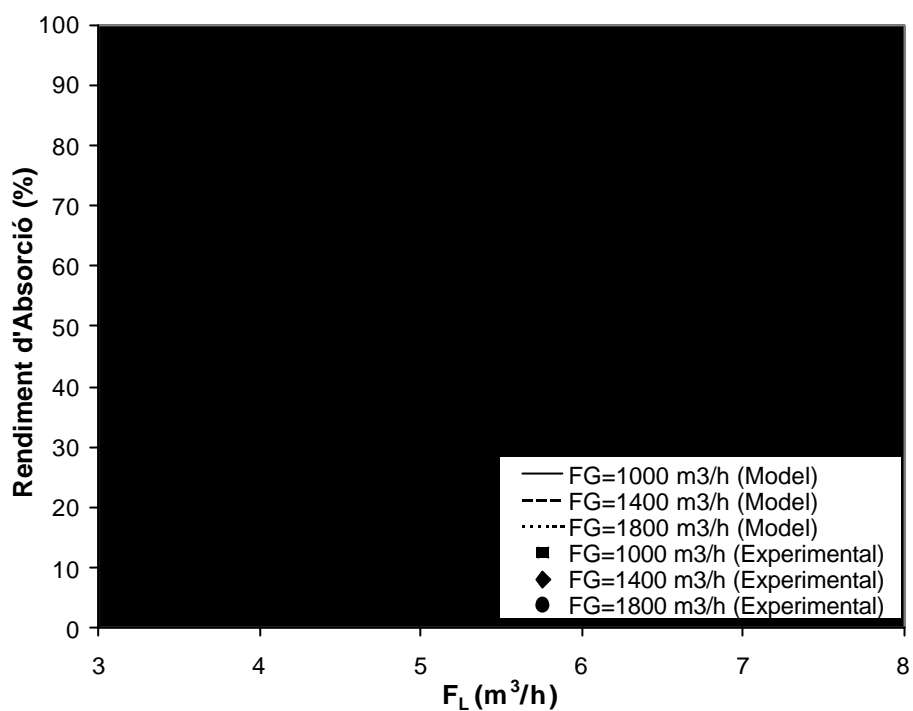


Figura 6.3.24: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al doble coll de 150 mm i l'atomitzador A amb una  $[SO_2]_i=350$  ppm.

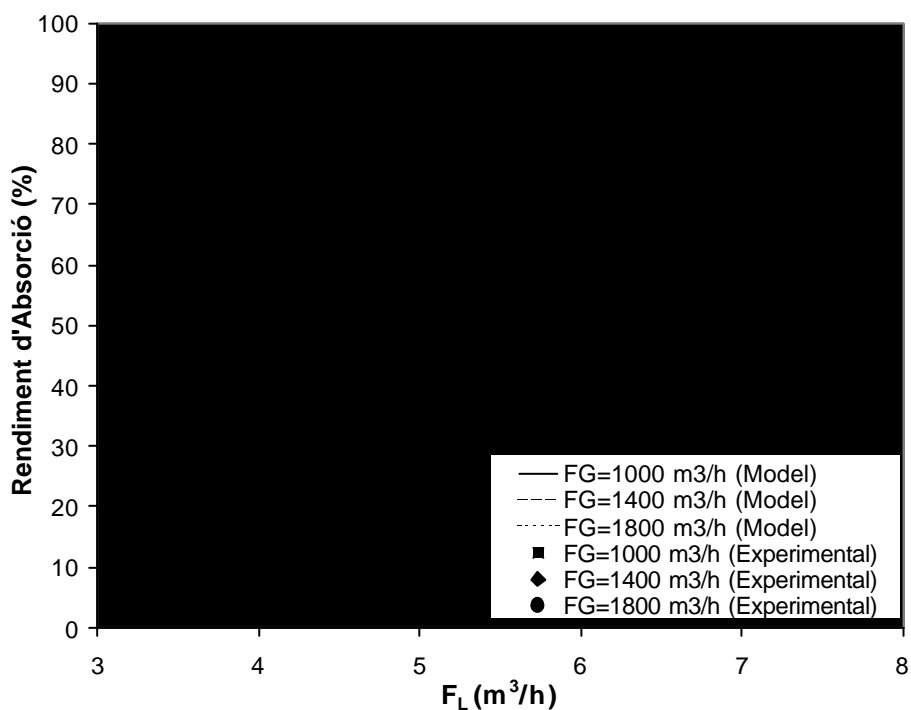


Figura 6.3.25: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al doble coll de 150 mm i l'atomitzador A amb una  $[SO_2]_i=600$  ppm.

Volgin *et al.* (1968) treballaren amb tres colls de diferents llargades (10, 200 i 300 mm), de forma que observaren l'efecte de multiplicar per 20 i per 30 la llargada inicial del coll del tub venturi. Per al coll de 200 mm s'observa un lleuger increment del rendiment, lògicament ocasionat per l'increment en el temps de residència. En augmentar la llargada fins a 300 mm, els rendiments comencen a decreixer a causa, segons els autors, de l'estabilització dels fluxos de gas i de líquid. Probablement, en aquestes condicions, el flux pot considerar-se homogeni i, per tant, amb la condició de 'no lliscament' entre les fases, el coeficient de transferència de matèria per a la fase gas cau pronunciadament. Cooney i Olsen (1987) triplicaren la llargada del coll sense observar grans variacions en l'eficàcia de rentat.

**d) Coll de doble llargada de 150 mm de diàmetre i atomitzador B**

Mentre que per a l'atomitzador A, s'ha determinat que en allargar el coll els resultats teòrics i experimentals coincidien en major mesura que pel cas del coll simple, la observació dels gràfics 6.3.26-6.3.28 porta a concloure que ocorre tot el contrari per a l'atomitzador B.

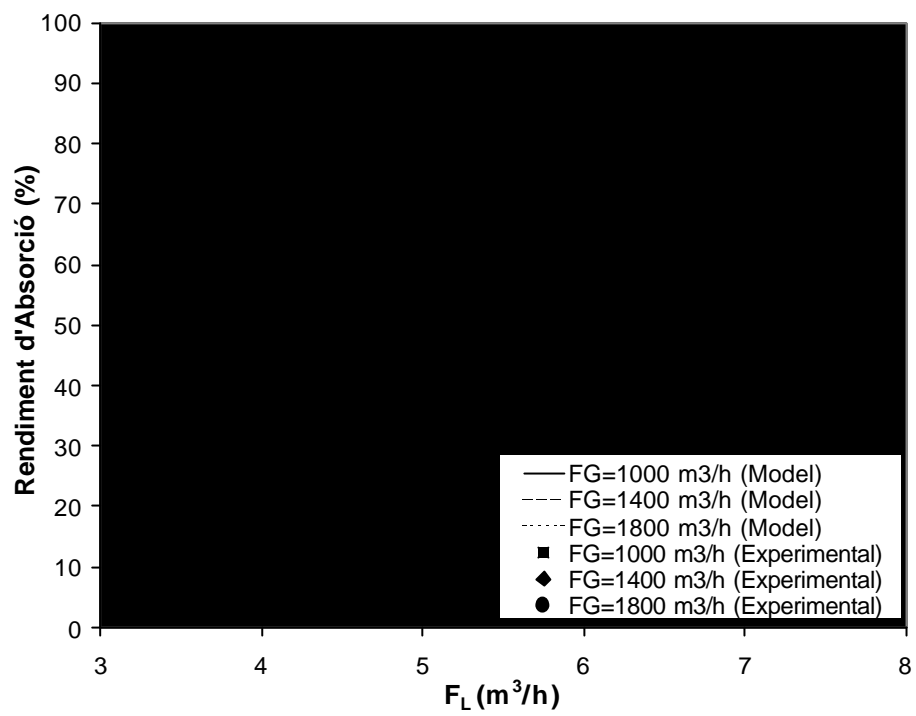


Figura 6.3.26: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al doble coll de 150 mm i l'atomitzador B amb una  $[SO_2]_i=130$  ppm.

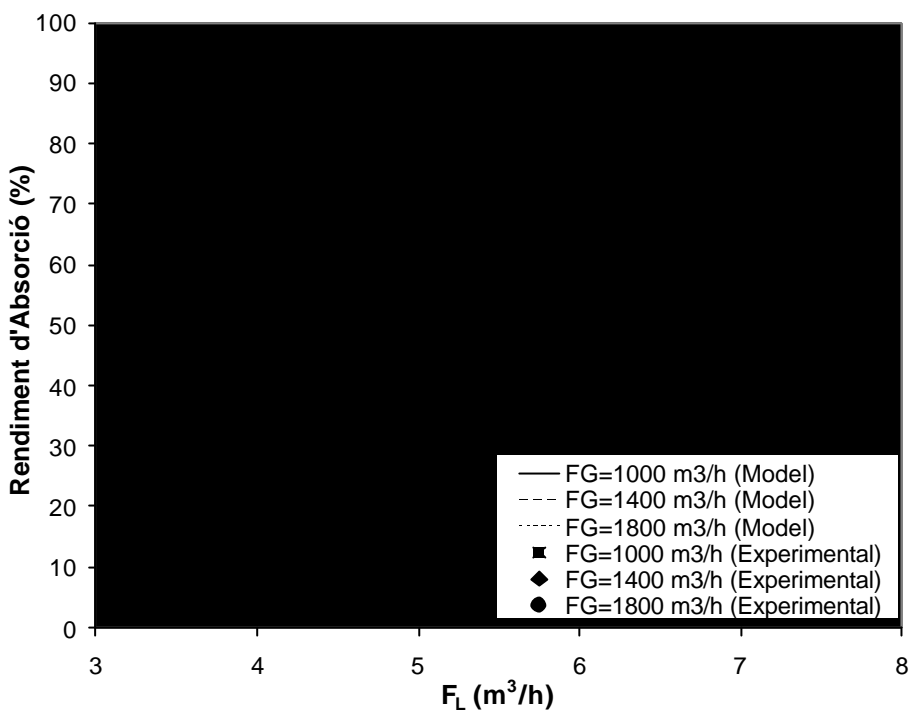


Figura 6.3.27: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al doble coll de 150 mm i l'atomitzador B amb una  $[SO_2]_i = 350$  ppm.

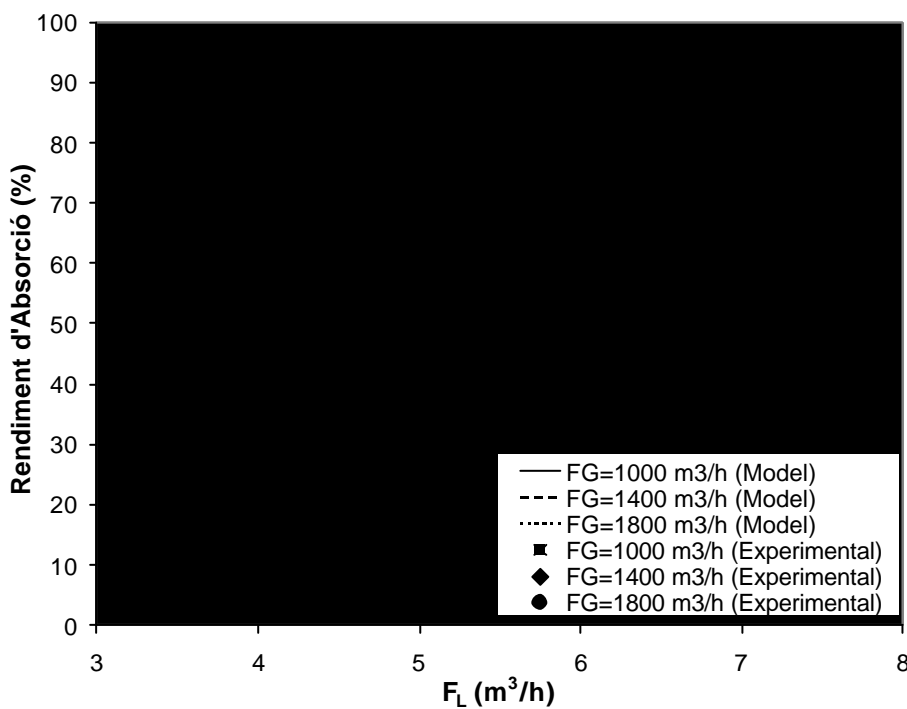


Figura 6.3.28: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al doble coll de 150 mm i l'atomitzador B amb una  $[SO_2]_i = 600$  ppm.

Les prediccions del model difereixen en major grau de les dades experimentals per aquesta combinació de paràmetres geomètrics. Això porta a pensar que per aquesta configuració on, com ja s'ha comentat, les distribucions de grandàries de gotes proporcionen àrees interfacials inferiors, les interaccions entre la pel·lícula de líquid i les gotes del centre de la canonada tenen més importància, juntament amb altres possibles mecanismes d'absorció.

Aquestes interaccions porten a pensar que probablement caldria incloure en el model el fenomen d'arrossegament-deposició descrit en el capítol 5.3. Aquestes asseveracions són recolzades pel fet que, sobretot per a les concentracions inicial de gas contaminant inferiors, un augment en el cabal de gas promou una major eficàcia de rentat, a la vegada que també s'accentua l'aparició dels esmentats fenòmens de deposició i d'arrossegament. Probablement aquestes interaccions es traduirien en la formació de petites gotes des de la pel·lícula amb diàmetres inferiors als de les gotes produïdes per l'atomitzador. Això afavoreix el procés d'absorció sempre i quan la gota tingui un volum suficient com per no exhaurir el reactiu que conté durant el seu temps de vida. Volgin *et al.* (1968) intentaren emprar ones ultrasòniques per a disminuir el diàmetre de les gotes formades, observant que els rendiments d'absorció empitjoraven. Una altra possible causa pot ser associada a la major dificultat de circulació interna a mesura que disminueix el diàmetre, la qual portarà associada una menor eficàcia per a la fase líquida (Baboolal *et al.* 1981).

e) Coll simple de 100 mm de diàmetre i atomitzador B

Tal i com s'ha comentat en l'apartat 6.3.1, les característiques de circulació dels fluids pel coll del tub venturi, fan que els rendiments

determinats siguin afectats per fenòmens descrits en aquest estudi en capítols anteriors, i que són fruit d'un disseny poc adequat. Malgrat que els rendiments que presenta el sistema jet-venturi '*scrubber*' emprat en aquest estudi són força elevats, cal recordar que el fenomen de la inundació del coll provoca que els cabals de gas manipulables siguin inferiors als de la resta de configuracions, amb unes pèrdues de pressió molt elevades, i que s'accentuen a mesura que s'incrementa  $F_G$ .

En qualsevol cas, per aquesta configuració, les discrepàncies entre valors experimentals i teòrics es fa molt accentuada per a tot el rang de cabals de líquid emprats. És evident doncs que existeix en aquest cas un altre mecanisme d'absorció simultani al de les gotes, però en tot cas aquest mecanisme és completament diferent al relacionat amb la resta de combinacions de paràmetres geomètrics. A la pràctica, el fenomen d'inundació observat, fa que el sistema jet-venturi es comporti més aviat com una columna de bombolleig, ja que el gas ha de circular a través de l'acumulació de líquid a l'entrada del coll.

Tal i com es pot veure en els gràfics 6.3.29-6.3.31, en aquesta configuració es fa evident la nul·la influència del cabal de gas en el rendiment d'absorció. Fins i tot, i tal i com es comentà en l'apartat 6.3.1, la influència de la concentració inicial del contaminant és força dèbil.



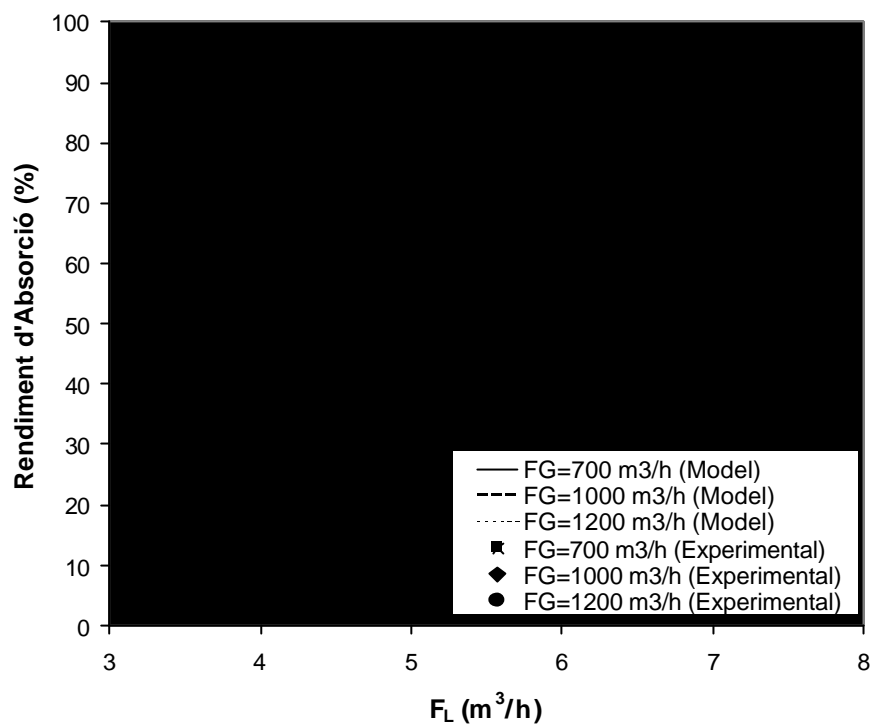


Figura 6.3.29: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al coll simple de 100 mm i l'atomitzador B amb una  $[\text{SO}_2]_i=200$  ppm.

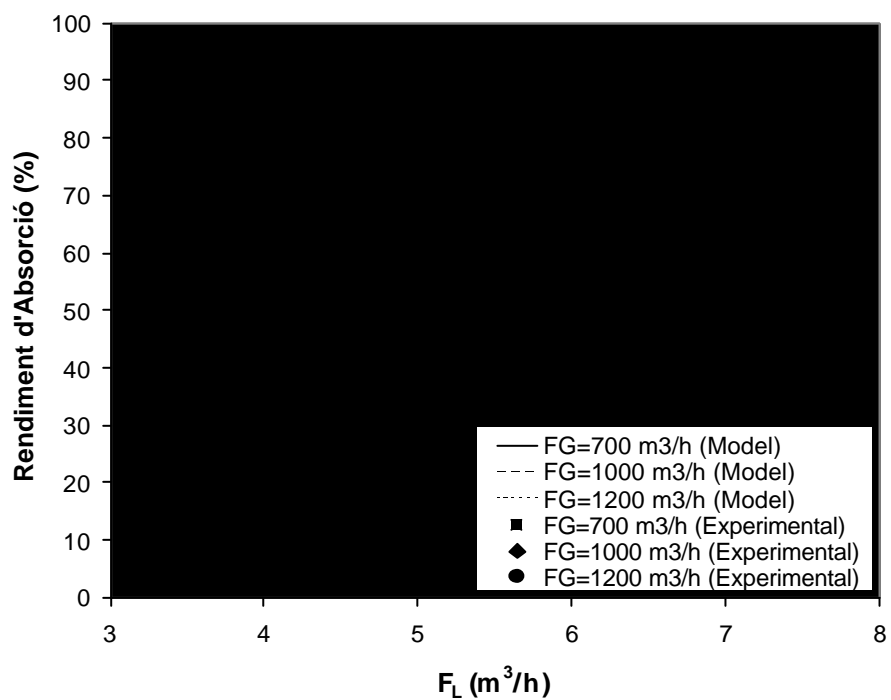


Figura 6.3.30: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al coll simple de 100 mm i l'atomitzador B amb una  $[\text{SO}_2]_i=300$  ppm.

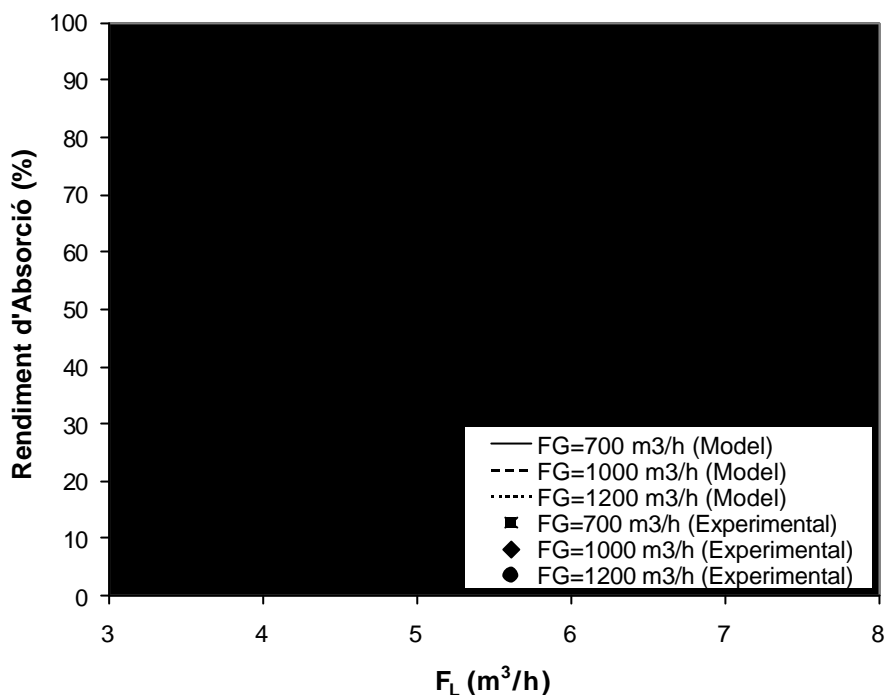


Figura 6.3.30: Comparació entre els resultats experimentals i el model teòric per al coll simple de 100 mm i l'atomitzador B amb una  $[SO_2]_i=400$  ppm.

Altres possibles fenòmens que poden ajudar a explicar els elevats rendiments obtinguts, fan referència al fet que tal i com determinaren Briens *et al.* (1992) la zona de bombolleig ofereix coeficients de transferència de matèria superiors a la zona de flux anular. A més a més, segons Virkar i Sharma (1975), també es produeix transferència de matèria en el tanc separador, de forma que aquesta serà més accentuada com menor sigui la velocitat dels fluids, i major el temps de contacte.

### 6.3.2.3 MODELITZACIÓ DE L'ABSORCIÓ DE $SO_2$ CONSIDERANT ABSORCIÓ EN LA PEL·LÍCULA DE LÍQUID

Dels treballs existents en la bibliografia, només un (Hills *et al.*, 1996) considera la possibilitat que la pel·lícula de líquid pot desenvolupar un paper determinant en el procés global d'absorció. Els autors determinaren que l'àrea interfacial proporcionada per aquesta pel·lícula podia ser aproximadament del mateix ordre de magnitud que la proporcionada per les gotes en el seu sistema venturi 'scrubber' tipus Pease-Anthony.

Malgrat que Johstone *et al.* (1954) admeten que no hi ha transferència de matèria a mesura que les gotes es desplacen radialment cap a les parets, és evident que el líquid que circula per aquestes pot comportar-se com un reactor de pel·lícula de líquid descendent. Malgrat que els processos estudiats són de cinètiques molt ràpides, existeix absorció al llarg de tot el tub venturi tal i com observaren Uchida i Wen (1973).

L'aparició de rendiments experimentals majors que els previstos amb els models més optimistes també fou observat per Cooney i Olsen (1987) en referència al seu model per a l'absorció de sulfur d'hidrogen elaborat en un altre treball (Cooney, 1985).

Per tal de mostrar de forma senzilla la influència de la pel·lícula de líquid en el procés global d'absorció, s'empra una aproximació consistent a considerar el sistema format per les gotes i el film com dos reactors en paral·lel. Malgrat que aquesta és una simplificació de la hidrodinàmica del sistema, ja que és ben sabut que les interaccions entre ambdós sistemes són molt importants, permet comprovar si el model millora ostensiblement o pel contrari, el tipus de fenomen a considerar no fa referència a la pel·lícula.

Per a la resolució del model per al líquid que flueix per a les parets, descrit en l'apartat 6.1.4, es considerarà que el gruix de la pel·lícula era

pràcticament constant. Aquesta suposició no representa un error important ja que, segons es comprovà en el capítol 5.3, el cabal de líquid que circula per les parets es manté gairebé constant i, malgrat que el diàmetre del tub venturi varia respecte la coordenada axial, els càlculs pel gruix de la pel·lícula mostraren poca variació. Per altra banda aquest paràmetre no té una incidència molt important en el càlcul de la velocitat de transferència de matèria.

El paràmetre més influent en l'eficàcia d'absorció de la pel·lícula és la velocitat relativa entre el gas i el líquid, essent més favorable quan la primera és considerablement major que la segona (McCready i Hanratty, 1985). Durant el càlcul del coeficient de transferència de matèria, es constatà que aquest paràmetre experimenta importants fluctuacions per a diferents zones del tub venturi a causa de les variacions en el diàmetre de l'equip. Per aquest motiu, els coeficients avaluats foren obtinguts mitjançant mitjanes ponderades al llarg de la coordenada axial.

Per tal d'evitar incloure un nombre excessiu de gràfics, només es presenten aquells que permetin observar la millora (o no) de les prediccions del model teòric, en afegir la contribució de la pel·lícula en el procés d'absorció. Aquests gràfics contenen la informació dels rendiments obtinguts per a cada combinació de concentració inicial, cabal de líquid absorbent i cabal de gas portador, per a cadascuna de les combinacions de paràmetres geomètrics descrits (gràfics 6.3.31-6.3.35).

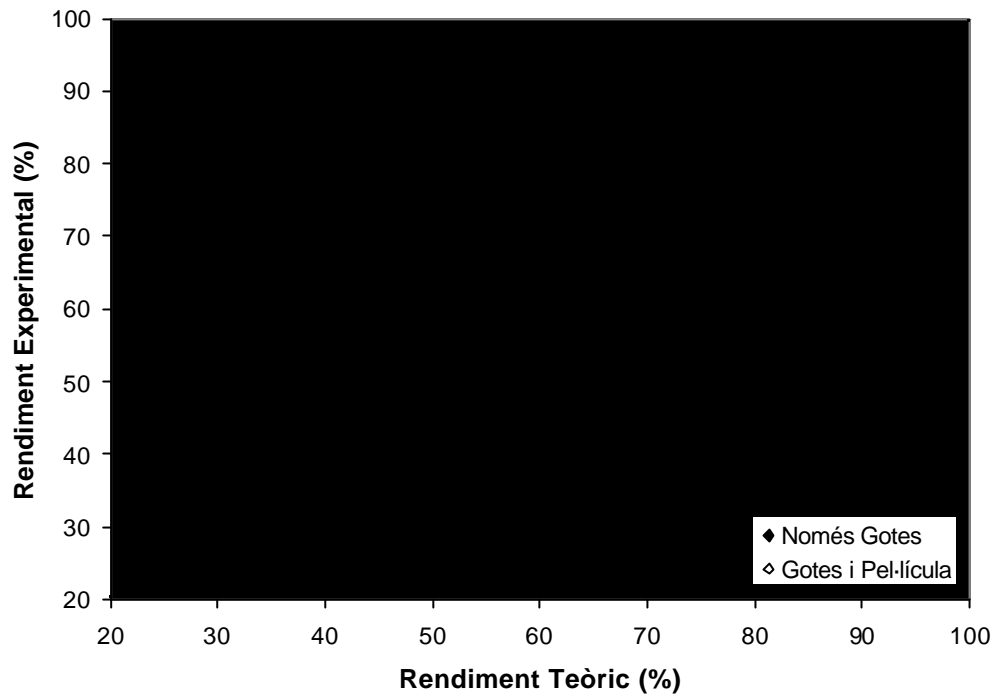


Figura 6.3.31: Comparació entre els resultats experimentals i els models teòrics per al coll simple de 150 mm i l'atomitzador A.

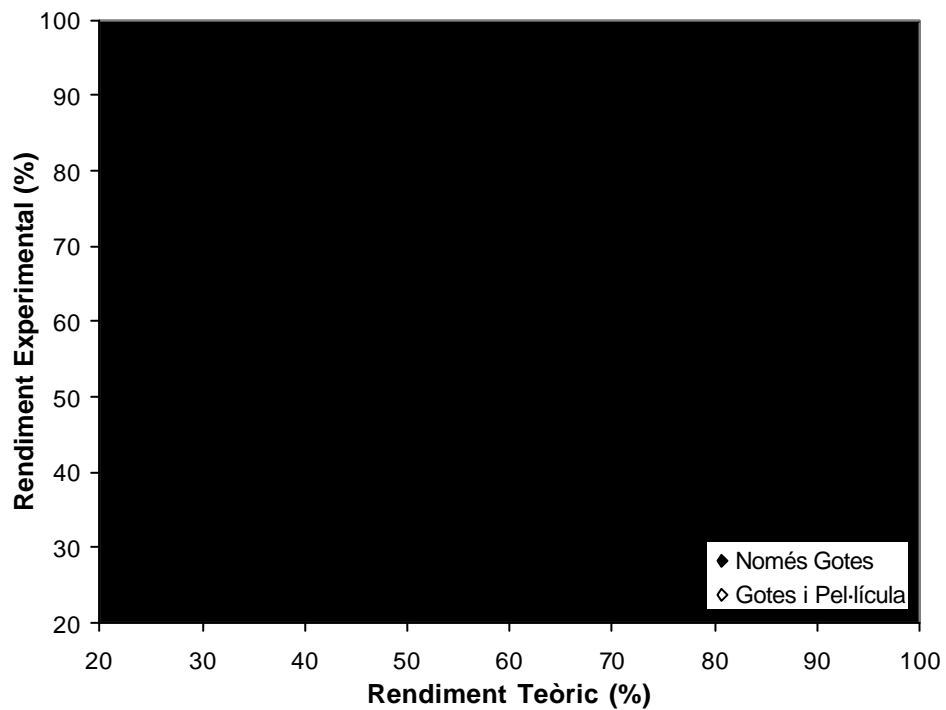


Figura 6.3.32: Comparació entre els resultats experimentals i els models teòrics per al coll simple de 150 mm i l'atomitzador B.

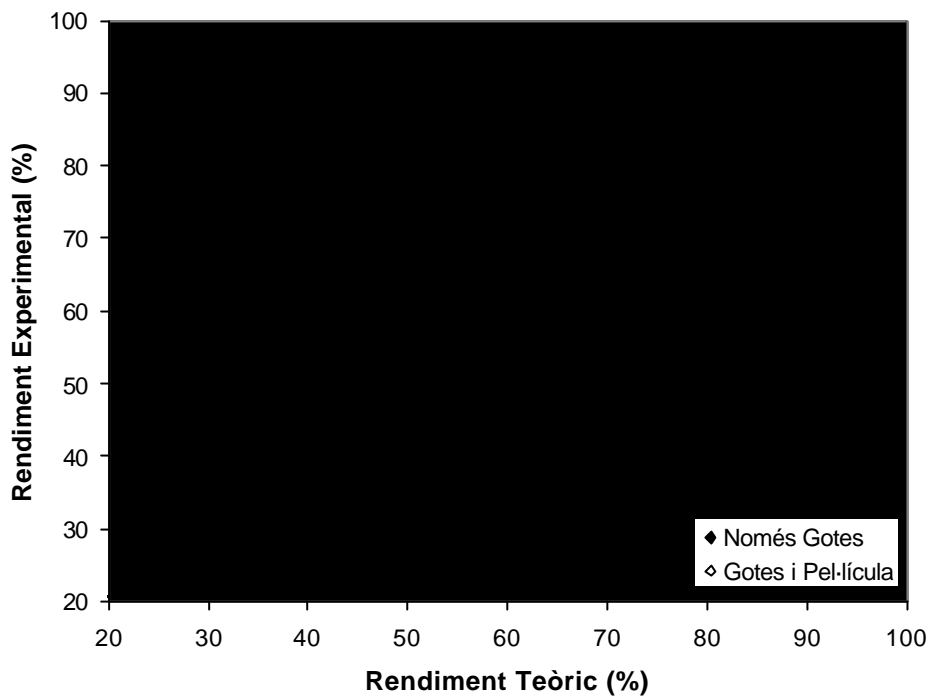


Figura 6.3.33: Comparació entre els resultats experimentals i els models teòrics per al doble coll de 150 mm i l'atomitzador A.

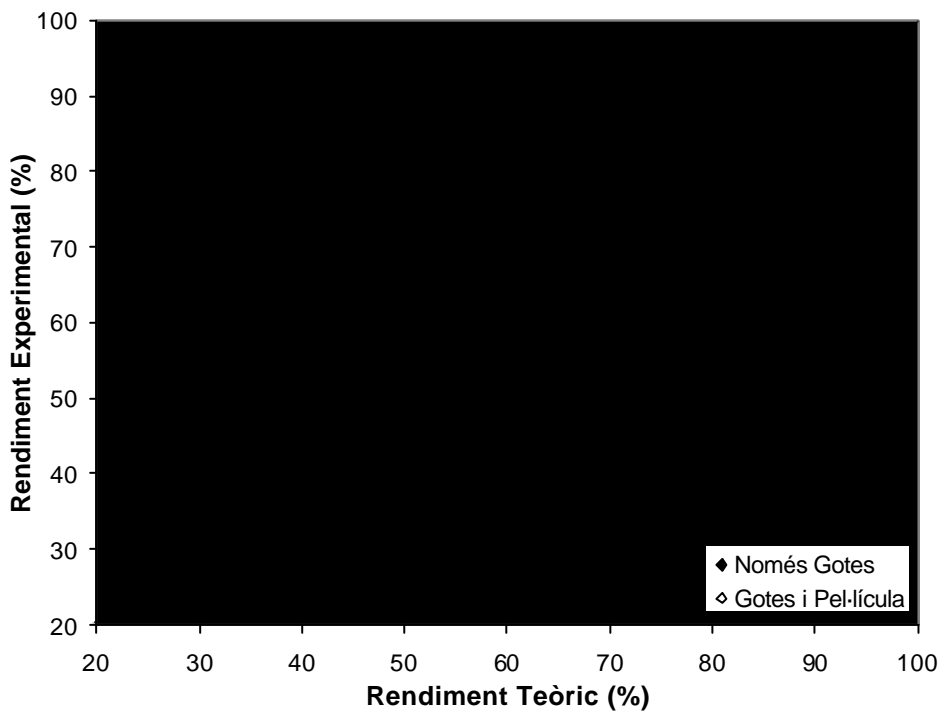


Figura 6.3.34: Comparació entre els resultats experimentals i els models teòrics per al doble coll de 150 mm i l'atomitzador B.

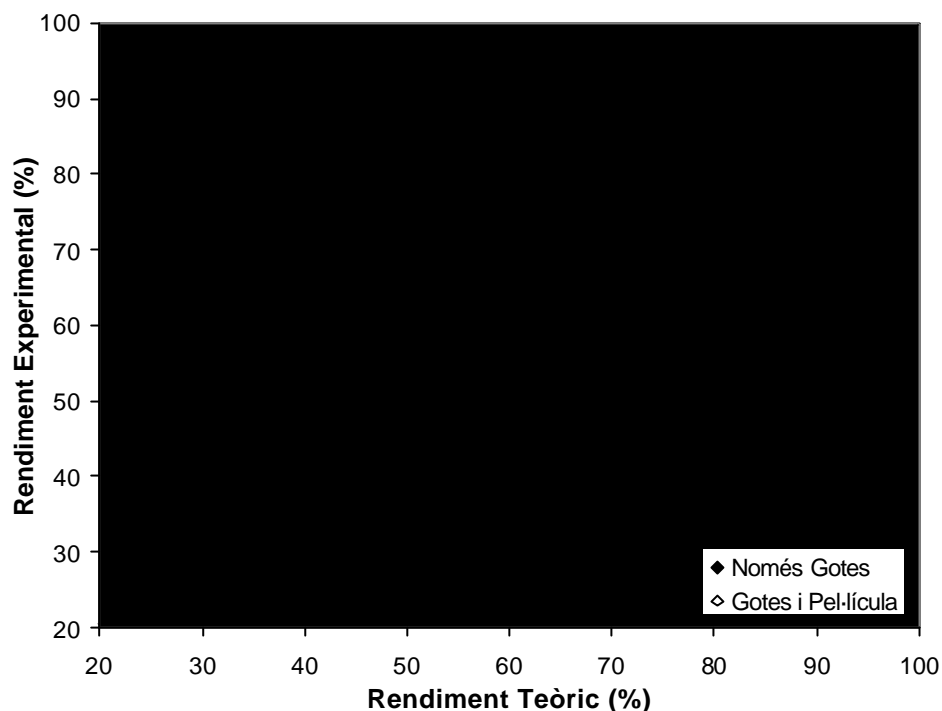


Figura 6.3.35: Comparació entre els resultats experimentals i els models teòrics per al coll simple de 100 mm i l'atomitzador B.

Es fa evident en totes les representacions, amb l'excepció probable de la gràfica 6.3.32, una millora en les prediccions dels models un cop ha estat addicionat la contribució de la pel·lícula com a reactor químic.

Pel coll simple de 150 mm i l'atomitzador A (gràfic 6.3.31) s'observa un lleuger desplaçament del núvol de punts cap a l'esquerra, afavorint doncs una millora per a la predicció dels rendiments teòrics més elevats. Els rendiments teòrics més baixos continuen essent els que presenten majors discrepàncies. Pel que fa al mateix atomitzador però amb el doble coll, la millora és prou clara (gràfic 6.3.33), i en cap moment s'assoleixen les diferències entre valors experimentals i teòrics observats en el coll simple pel mateix atomitzador.

Els punts per al doble coll i l'atomitzador B, sense tenir en compte la pel·lícula de líquid, presenten una forta dispersió, la qual és mantinguda en afegir l'efecte de la pel·lícula. En general, però, les prediccions presenten una lleugera millora, tal i com es constata en el gràfic 6.3.31.

Pel que fa al coll simple de 100 mm i l'atomitzador B, l'addició de la pel·lícula de líquid també suposa una lleugera millora en les prediccions. Tot i així, aquestes presenten uns errors molt importants, només comparables amb aquells obtinguts per al coll simple de 150 mm i l'atomitzador A.

En els càlculs efectuats, s'observà que la configuració que es veia modificada en major mesura fou la del coll de 100 mm, assolint-se rendiments del 13 % com a valor màxim. La combinació de paràmetres geomètrics que tingué els rendiments més baixos per aquest mecanisme d'absorció fou la corresponent al coll simple de 150 mm i l'atomitzador B. Per aquesta combinació s'obtingueren rendiments d'entre un 7-8 %.

Considerant doncs la contribució només de la pel·lícula de líquid, una possible ordenació de menor a major rendiment d'absorció seria (valors teòrics):

$$\%R (150-B) < \%R (2x150-B) < \%R (2x150-A) < \%R (150-A) < (\%R (100-B))$$

si es compara amb l'ordenació de menor a major fracció de líquid que flueix per les parets (apartat 6.3.1.1):

$$? (100-B) < ? (2x150-B) < ? (150-B) < ? (2x150-A) < ? (150-A)$$

es constata una certa coincidència (exceptuant el cas del coll de 100 mm), de forma que en general una major fracció de líquid per les parets porta associada una millora superior en el rendiment d'absorció de la



pel·lícula. És clar però que el diàmetre del coll és un dels paràmetres més influents.

També és molt significatiu el fet que la ordenació de percentatges de rendiment de la pel·lícula presenta moltes similituds amb els percentatges d'absorció del sistema global, indicant l'estreta vinculació existent entre allò que ocorre en la pel·lícula i el resultat final del procés d'absorció.