



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO
ESTÁTICO E DINÂMICO DOS PARÂMETROS
OPERACIONAIS DE CASCATAS DE SEPARAÇÃO
ISOTÓPICA POR ULTRACENTRIFUGAÇÃO**

CÉLIA CHRISTIANI PASCHOA PORTOGHESE

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de Reatores
Nucleares de Potência e Tecnologia do
Combustível Nuclear.**

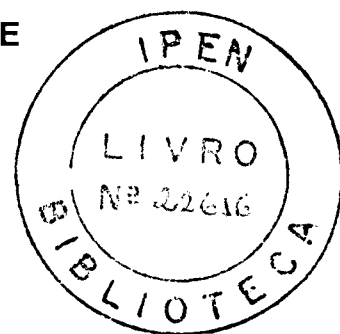
**Orientador:
Dr. Cláudio Rodrigues**

**São Paulo
2002**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO ESTÁTICO E
DINÂMICO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE CASCATAS DE
SEPARAÇÃO ISOTÓPICA POR ULTRACENTRIFUGAÇÃO**

CÉLIA CHRISTIANI PASCHOA PORTOGHESE



**Tese apresentada como parte dos
requisitos para a obtenção do grau de
Doutor em Ciências na Área de
Reatores Nucleares de Potência e
Tecnologia do Combustível Nuclear.**

Orientador:

Dr. Cláudio Rodrigues

SÃO PAULO

2002

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. Cláudio Rodrigues, meu orientador, pela sua orientação e pela confiança depositada em mim durante a elaboração desta tese.

Ao Prof. Dr. Ivo Jordan (in memoriam), por ter me ensinado e orientado nos aspectos teóricos desde o início de meu trabalho com o processo de ultracentrifugação gasosa, dando-me as ferramentas que tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), pelo apoio e incentivo recebido, assim como pela disponibilização de suas instalações para a realização dos ensaios necessários à conclusão do trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), por tornar possível a consolidação de boa parte de minha experiência profissional, criando recursos para a elaboração e publicação desta tese.

Aos meus colegas do CTMSP-II que, direta ou indiretamente colaboraram para a elaboração deste trabalho, de modo especial, às seções responsáveis pelo planejamento e execução dos ensaios de separação isotópica em ultracentrífugas, pelo apoio recebido.

Finalmente agradeço a meus filhos, pelo incentivo, compreensão e colaboração.

MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE CASCATAS DE SEPARAÇÃO ISOTÓPICA POR ULTRACENTRIFUGAÇÃO

Célia Christiani Paschoa Portoghese

RESUMO

Neste trabalho, são apresentados, discutidos e testados, modelos matemáticos que tornam possível o planejamento, a concepção, o dimensionamento e o acompanhamento da operação de cascatas de separação isotópica de urânio que utilizam o processo de ultracentrifugação gasosa. Os modelos a serem utilizados nas fases de planejamento e concepção apresentam hipóteses teóricas, permitindo o cálculo aproximado das vazões e composições isotópicas das correntes internas às cascatas. São apresentados e discutidos doze modelos teóricos, sendo selecionados os de maior aplicabilidade. Os modelos a serem utilizados para o dimensionamento completo de uma cascata antes de sua implantação, chamados modelos semi-empíricos, utilizam resultados experimentais obtidos em ensaios individuais de ultracentrifugas aliados a equações teóricas e permitem o cálculo exato das vazões, pressões e composições isotópicas das correntes internas às cascatas. São apresentados treze modelos semi-empíricos, dos quais cinco são amplamente discutidos e um é validado através da comparação com resultados experimentais. Para o acompanhamento da operação de cascatas, é necessário o desenvolvimento de modelos que simulem seu comportamento fora da condição nominal de projeto. São apresentados três modelos semi-empíricos para essa simulação, dos quais um é validado através da comparação com resultados experimentais. Finalmente, é necessário dispor de ferramentas que simulem o comportamento de cascatas durante transientes. São apresentados e discutidos dois modelos dinâmicos, verificando-se qual deles é capaz de simular melhor o comportamento real de uma cascata durante três tipos distintos de transiente, comparando-se o comportamento simulado por eles com resultados experimentais.

**MATHEMATICAL MODELING OF THE STATIC AND DYNAMIC BEHAVIOR OF
THE OPERATIONAL PARAMETERS OF ISOTOPIC SEPARATION CASCADES
COMPOSED OF ULTRACENTRIFUGES**

Célia Christiani Paschoa Portoghese

ABSTRACT

In this work, several different mathematical models that make it possible to plan, design and follow the operation of uranium isotopic separation cascades using the gaseous ultracentrifugation process are presented, discussed and tested. Models to be used in the planning and conception phases use theoretical hypothesis, making it possible to calculate approximate values for the flow rate and isotopic composition of the cascade internal streams. Twelve theoretical models developed to perform this task are discussed and compared. The theoretical models that have greater applicability are identified. Models to be used for the complete dimensioning of a cascade, before its construction, called semi-empirical models, use experimental results obtained in ultracentrifuges individual tests combined with theoretical equations, allowing to calculate accurate values for the flow rate, pressure and isotopic composition of the cascade internal streams. Thirteen semi-empirical models developed to perform this task are presented, five of them are widely discussed and one of them is validated through comparison with experimental results. In order to follow the operation of a cascade, it is necessary to develop models to simulate its behavior in operational conditions other than the nominal, defined in the project. Three semi-empirical models to make this kind of simulation are presented and one of them is validated through comparison with experimental results. Finally, it is necessary to have tools that simulate the cascade behavior during transients. Two dynamic models developed to perform this task are presented and compared. The dynamic model capable to simulate results closer to the real behavior of a cascade during three different kinds of transient is identified, through comparison between simulated and experimental results.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação do tema.....	1
1.2 Histórico	2
1.3 Importância do tema	6
1.4 Alcance do trabalho.....	6
1.5 Fundamentos teóricos.....	7
1.5.1 Definição dos parâmetros de separação de um elemento	8
1.5.2 Descrição da ultracentrífuga a contracorrente (elemento de separação a ser utilizado).....	11
1.5.3 Cascatas de separação isotópica	17
1.5.4 Equações aplicáveis à cascata ideal.....	19
1.5.5 Características de uma cascata de ultracentrífugas	22
2 OBJETIVOS	26
3 METODOLOGIA.....	27
3.1 Descrição dos modelos matemáticos desenvolvidos	27
3.1.1 Modelos teóricos para a simulação da condição nominal de operação de uma cascata de ultracentrífugas	30
3.1.1.1 Cascata com corte e fator de separação constantes	32
3.1.1.2 Cascata com corte e parâmetros C_1 e C_5 constantes	32
3.1.1.3 Cascata com corte e eficiência constantes	33
3.1.1.4 Cascata com corte simétrico e fator de separação constante.....	33
3.1.1.5 Cascata com corte simétrico e parâmetros C_1 e C_5 constantes.....	34
3.1.1.6 Cascata com corte simétrico e eficiência constante.....	34
3.1.1.7 Cascata com vazão de alimentação e fator de separação constantes.....	35

3.1.1.8	Cascata com vazão de alimentação e parâmetros C_1 e C_5 constantes.....	35
3.1.1.9	Cascata com fator de separação e parâmetros C_1 e C_5 constantes ...	36
3.1.1.10	Cascata com fator de separação e eficiência constantes	37
3.1.1.11	Cascata com eficiência e parâmetros C_1 e C_5 constantes	37
3.1.1.12	Cascata com parâmetros C_1 e C_5 constantes, considerando válidas as equações teóricas para o cálculo de β e γ	38
3.1.2	Modelos semi-empíricos para a simulação da condição nominal de operação de uma cascata de ultracentrífugas	39
3.1.2.1	Cascata sem restrições físicas nas tubulações interestágios	41
3.1.2.2	Cascata com restrições físicas nas tubulações interestágios de produto ou de rejeito	41
3.1.2.2.1	Cascata com vazão de alimentação constante.....	44
3.1.2.2.2	Cascata com corte constante.....	44
3.1.2.2.3	Cascata com corte simétrico.....	44
3.1.2.2.4	Cascata com fator de separação constante.....	45
3.1.2.2.5	Cascata com eficiência constante.....	45
3.1.2.3	Cascata com restrições físicas nas tubulações interestágios de produto e rejeito.....	45
3.1.2.3.1	Cascata com vazão de alimentação e eficiência constantes	46
3.1.2.3.2	Cascata com corte e eficiência constantes	46
3.1.2.3.3	Cascata com corte simétrico e eficiência constante.....	47
3.1.2.3.4	Cascata com fator de separação e eficiência constantes	47
3.1.2.3.5	Cascata com vazão de alimentação e fator de separação constantes	48
3.1.2.3.6	Cascata com corte e fator de separação constantes	48
3.1.2.3.7	Cascata com corte simétrico e fator de separação constante.....	48
3.1.3	Modelos semi-empíricos para a simulação da operação de uma cascata de ultracentrífugas fora da condição nominal.....	49
3.1.4	Modelos para a simulação da operação de uma cascata de ultracentrífugas durante transientes.....	50
3.1.4.1	Cascata sem restrições físicas nas tubulações interestágios	53
3.1.4.2	Cascata com restrições físicas nas tubulações interestágios de produto ou de rejeito	57

3.1.4.3	Cascata com restrições físicas nas tubulações interestágios de produto e de rejeito	61
3.2	Metodologia para a avaliação dos modelos	66
3.2.1	Modelos semi-empíricos	66
3.2.2	Modelos teóricos	68
3.2.3	Modelos dinâmicos	68
4	RESULTADOS	70
4.1	Resultados obtidos utilizando-se os modelos semi-empíricos	71
4.1.1	Modelos para a simulação da condição nominal de operação de uma cascata	71
4.1.2	Modelo para a simulação da operação de uma cascata fora da condição nominal	85
4.2	Resultados obtidos utilizando-se os modelos teóricos	88
4.3	Resultados obtidos utilizando-se os modelos dinâmicos.....	88
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	137
5.1	Resultados obtidos utilizando-se os modelos semi-empíricos..	137
5.1.1	Modelos para a simulação da condição nominal de operação de uma cascata	137
5.1.2	Modelos para a simulação da operação de uma cascata fora da condição nominal	146
5.2	Resultados obtidos utilizando-se os modelos teóricos	148
5.3	Resultados obtidos utilizando-se os modelos dinâmicos.....	167
6	CONCLUSÕES	188
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	204

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1 - Processos de separação isotópica desenvolvidos até hoje.....	3
TABELA 2 - Cascata padrão para comparação dos modelos matemáticos	70
TABELA 3 - Resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando a restrição de vazão de alimentação constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.1)	73
TABELA 4 - Resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando a restrição de corte constante para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.2).....	74
TABELA 5 - Resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando a restrição de corte simétrico para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.3).....	75
TABELA 6 - Resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando a restrição de fator de separação constante para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.4)	76
TABELA 7 - Resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando a restrição de eficiência constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.5) utilizando a UC-2	77

- TABELA 8 - Valores médios e intervalos de confiança com 95% de confiabilidade para os desvios entre os valores calculados e medidos para as cascatas 84
- TABELA 9 - Valores médios e intervalos de confiança com 95% de confiabilidade para os desvios entre os valores calculados e medidos para as diferentes condições de operação da cascata..... 87
- TABELA 10 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de corte e fator de separação constantes para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.1.1) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos 89
- TABELA 11 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de corte constante para todos os estágios e parâmetros C_1 e C_5 constantes para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.2) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos..... 92
- TABELA 12 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de corte constante para todos os estágios e eficiência constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.3) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos..... 95
- TABELA 13 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de corte simétrico e fator de separação constante para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.1.4) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos 98

- TABELA 14 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de corte simétrico para todos os estágios e parâmetros C_1 e C_5 constantes para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.5) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos..... 101
- TABELA 15 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de corte simétrico para todos os estágios e eficiência constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.6) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos..... 104
- TABELA 16 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de vazão de alimentação e fator de separação constantes para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.7) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos 107
- TABELA 17 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de vazão de alimentação e parâmetros C_1 e C_5 constantes para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.8) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos 110
- TABELA 18 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de fator de separação constante para todos os estágios e parâmetros C_1 e C_5 constantes para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.9) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos..... 113
- TABELA 19 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de

- fator de separação constante para todos os estágios e eficiência constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.10) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos..... 116
- TABELA 20 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de eficiência e parâmetros C_1 e C_5 constantes para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.11) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos 119
- TABELA 21 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de parâmetros C_1 e C_5 constantes para todas as ultracentrífugas com o cálculo dos fatores de enriquecimento e empobrecimento utilizando as equações teóricas para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.1.12) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos..... 122
- TABELA 22 - Desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando os modelos dinâmicos H1 e H2 e os calculados utilizando o modelo semi-empírico estático para as três perturbações analisadas 127
- TABELA 23 - Resultados obtidos para as variáveis externas na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão com vazão de alimentação alterada, visando ajustar a composição da corrente de produto, utilizando as restrições de vazão de alimentação constante, fator de separação constante e eficiência constante para todas as ultracentrífugas..... 139
- TABELA 24 - Valores médios e intervalos de confiança com 95% de confiabilidade para os desvios entre os valores calculados utilizando-se o modelo semi-empírico proposto e os valores experimentais..... 145

- TABELA 25 - Valores médios e intervalos de confiança com 95% de confiabilidade para os desvios entre os valores calculados utilizando-se o modelo semi-empírico proposto e os valores experimentais..... 147
- TABELA 26 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de corte constante para todos os estágios e eficiência constante para todas as ultracentrífugas e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos com vazão de alimentação corrigida 154
- TABELA 27 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de corte simétrico para todos os estágios e eficiência constante para todas as ultracentrífugas e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos com vazão de alimentação corrigida 156
- TABELA 28 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de vazão de alimentação e fator de separação constantes para todas as ultracentrífugas com vazão de alimentação 6,4% superior à utilizada inicialmente e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos com vazão de alimentação corrigida 158
- TABELA 29 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de fator de separação e eficiência constantes para todas as ultracentrífugas com vazão de alimentação 4,6% superior à utilizada inicialmente e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos com vazão de alimentação corrigida..... 160
- TABELA 30 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de eficiência e parâmetros C_1 e C_5 constantes para todas as ultracentrífugas com vazão de alimentação 11,7% superior à

utilizada inicialmente e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos com vazão de alimentação corrigida 162

TABELA 31 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de parâmetros C_1 e C_5 constantes e cálculo teórico dos fatores de enriquecimento e empobrecimento para todos os estágios com vazão de alimentação 16,1% superior à utilizada inicialmente e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos com vazão de alimentação corrigida 164

TABELA 32 - Desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando os modelos dinâmicos H1 e H2 ajustados e os calculados utilizando o modelo semi-empírico estático para as três perturbações analisadas 173

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1 - Ultracentrífugas modelo ZG3.....	5
FIGURA 2 - Esquema da ultracentrífuga a contracorrente.....	12
FIGURA 3 - Esquema de interligação entre os estágios de uma cascata.....	18
FIGURA 4 - Perfil de fluxos (n_i versus P_i/P) de uma cascata ideal para $\beta = 1,00214$	19
FIGURA 5 - Interligação entre as ultracentrífugas de uma cascata	24
FIGURA 6 - Esquema do arranjo físico da tubulação de uma cascata de ultracentrífugas.....	25
FIGURA 7 - Cascatas de ultracentrífugas instaladas em Almelo, Holanda.....	25
FIGURA 8 - Esquema da tubulação interestágios de uma cascata sem restrições para a equalização de pressões nos pontos de confluência de correntes.....	53
FIGURA 9 - Esquema da tubulação interestágios de uma cascata com restrições para a equalização de pressões na tubulação de produto (a) ou de rejeito (b) dos estágios	59
FIGURA 10 - Esquema da tubulação interestágios de uma cascata com restrições para a equalização de pressões nas tubulações de produto e de rejeito dos estágios.....	62

- FIGURA 11 - Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas utilizando a restrição de vazão de alimentação constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.1) 78
- FIGURA 12 - Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas utilizando a restrição de corte constante para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.2) 79
- FIGURA 13 - Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas utilizando a restrição de corte simétrico para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.3) 80
- FIGURA 14 - Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas utilizando a restrição de fator de separação constante para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.4) 81
- FIGURA 15 - Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas utilizando a restrição de eficiência constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.5) com a UC-2. 82
- FIGURA 16 - Desvio entre os valores calculados e medidos para as pressões interestágios em função da posição relativa dos estágios ao longo das cascatas..... 83
- FIGURA 17 - Desvio entre os valores calculados e medidos para os fatores de separação em função da posição relativa dos estágios ao longo das cascatas 83
- FIGURA 18 - Desvio entre os valores calculados e medidos para as pressões interestágios em função da posição relativa dos estágios ao longo da cascata para as cinco condições de operação diferentes escolhidas..... 86
- FIGURA 19 - Desvio entre os valores calculados e medidos para os fatores de separação em função da posição relativa dos estágios ao longo da

cascata para as cinco condições de operação diferentes escolhidas.....	86
FIGURA 20 - Comportamento dos desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos e os valores correspondentes calculados utilizando-se o modelo semi-empírico estático ao longo da cascata para uma elevação de 2% na vazão de alimentação	128
FIGURA 21 - Comportamento dos desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos e os valores correspondentes calculados utilizando-se o modelo semi-empírico estático ao longo da cascata para a retirada de 25% das ultracentrífugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5.....	129
FIGURA 22 - Comportamento dos desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos e os valores correspondentes calculados utilizando-se o modelo semi-empírico estático ao longo da cascata para o enchimento com o gás de processo na vazão nominal.....	130
FIGURA 23 - Comportamento da razão isotópica das correntes de produto e rejeito e da relação P/F da cascata durante o transiente – elevação de 2% na vazão de alimentação da cascata	131
FIGURA 24 - Comportamento da pressão da corrente de produto dos estágios durante o transiente – elevação de 2% na vazão de alimentação da cascata.....	132
FIGURA 25 - Comportamento da razão isotópica das correntes de produto e rejeito e da relação P/F da cascata durante o transiente – retirada de 25% das ultracentrífugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5.....	133

- FIGURA 26 - Comportamento da pressão da corrente de produto dos estágios durante o transiente – retirada de 25% das ultracentrifugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5 134
- FIGURA 27 - Comportamento da razão isotópica das correntes de produto e rejeito e da relação P/F da cascata durante o transiente – enchimento da cascata com o gás de processo na vazão nominal..... 135
- FIGURA 28 - Comportamento da pressão da corrente de produto dos estágios durante o transiente – enchimento da cascata com o gás de processo na vazão nominal..... 136
- FIGURA 29 - Comportamento dos desvios relativos às variáveis internas alterando-se a vazão de alimentação da cascata utilizando-se a restrição de vazão de alimentação constante para todas as ultracentrifugas..... 140
- FIGURA 30 - Comportamento dos desvios relativos às variáveis internas alterando-se a vazão de alimentação da cascata utilizando-se a restrição de fator de separação constante para todos os estágios..... 141
- FIGURA 31 - Comportamento dos desvios relativos às variáveis internas alterando-se a vazão de alimentação da cascata utilizando-se a restrição de eficiência constante para todas as ultracentrifugas com a UC-2 142
- FIGURA 32 - Comportamento dos desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos ajustados e os valores correspondentes calculados utilizando-se o modelo semi-empírico estático ao longo da cascata para uma elevação de 2% na vazão de alimentação 174

- FIGURA 33 - Comportamento dos desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos ajustados e os valores correspondentes calculados utilizando-se o modelo semi-empírico estático ao longo da cascata para a retirada de 25% das ultracentrífugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5..... 175
- FIGURA 34 - Comportamento dos desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos ajustados e os valores correspondentes calculados utilizando-se o modelo semi-empírico estático ao longo da cascata para o enchimento com o gás de processo na vazão nominal..... 176
- FIGURA 35 - Comportamento da razão isotópica das correntes de produto e rejeito e da relação P/F da cascata durante o transiente – elevação de 2% na vazão de alimentação da cascata 177
- FIGURA 36 - Comportamento da pressão da corrente de produto dos estágios durante o transiente – elevação de 2% na vazão de alimentação da cascata 178
- FIGURA 37 - Comportamento da razão isotópica das correntes de produto e rejeito e da relação P/F da cascata durante o transiente – retirada de 25% das ultracentrífugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5..... 179
- FIGURA 38 - Comportamento da pressão da corrente de produto dos estágios durante o transiente – retirada de 25% das ultracentrífugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5 180
- FIGURA 39 - Comportamento da razão isotópica das correntes de produto e rejeito e da relação P/F da cascata durante o transiente - enchimento da cascata com o gás de processo na vazão nominal..... 181

FIGURA 40 - Comportamento da pressão da corrente de produto dos estágios durante o transiente – enchimento da cascata com o gás de processo na vazão nominal..... 182

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do tema

Embora os isótopos de um dado elemento químico tenham propriedades químicas e físicas muito semelhantes entre si, apresentam comportamento totalmente diferenciado em reações nucleares.

A reação de fissão nuclear, que corresponde ao bombardeamento do núcleo de átomos de certos elementos por nêutrons, provocando uma reação em cadeia, com liberação de grande quantidade de energia, é utilizada, de forma controlada, para a geração de energia elétrica e, de forma não controlada, em artefatos bélicos nucleares.

O urânio é o material mais amplamente utilizado em reações de fissão nuclear controlada com a finalidade de geração de energia. Em seu estado natural, apresenta três isótopos estáveis: o ^{234}U , presente na proporção de 0,006% em peso, o ^{235}U , presente na proporção de 0,711% em peso e o ^{238}U , presente na proporção de 99,283% em peso¹, sendo o seu único isótopo de interesse para a geração de energia o ^{235}U .

De acordo com a proporção de átomos de ^{235}U presentes, o urânio apresenta diferentes aplicações. Urânio com o teor de ^{235}U encontrado na natureza é utilizado na produção de combustível para reatores de água pesada. Urânio com teor de ^{235}U compreendido entre 2 e 4% em peso é utilizado na produção de combustível para reatores de água leve (reatores de água pressurizada, reatores de água fervente e reatores heterogêneos de grafite-água fervente). Urânio com teor de ^{235}U próximo ou superior a 20% em peso é utilizado em reatores de pesquisa ou de ensaio de materiais e em reatores de potência compactos, podendo, também, ser utilizado para a produção de artefatos bélicos nucleares.

Uma vez que o isótopo de interesse do urânio é encontrado na natureza em teores próximos a 0,7% em peso, justifica-se o desenvolvimento de processos de separação isotópica, capazes de elevar esse teor aos níveis necessários à utilização.

O enriquecimento isotópico do urânio é uma das fases mais importantes e complexas do ciclo do combustível nuclear, tendo, a tecnologia envolvida, sido desenvolvida e implementada em poucos países. Na TAB.1, são apresentados os processos de separação isotópica desenvolvidos até hoje, os princípios de cada processo e os países que os desenvolveram².

Dentre os processos desenvolvidos para o enriquecimento de urânio no isótopo ^{235}U , destacam-se o da Difusão Gasosa, por ser o primeiro a ser implementado para produção em larga escala, o da Ultracentrifugação, por ser o mais difundido atualmente e a Separação a Laser, tecnologia em desenvolvimento em vários países.

A maior parte desses processos realiza-se em fase gasosa, sendo o composto mais adequado à utilização o hexafluoreto de urânio (UF_6), uma vez que o flúor não apresenta isótopos e que este é o único composto de urânio que se apresenta em fase gasosa à temperatura ambiente.

Como é mostrado na TAB.1, existem, atualmente em operação, usinas de enriquecimento de urânio utilizando o processo de separação isotópica por ultracentrifugação na Alemanha, Holanda, Reino Unido, Estados Unidos, Rússia, Japão, África do Sul e Brasil. Essas usinas são compostas por unidades, denominadas cascatas, que correspondem a grupos de ultracentrífugas interligadas em série e em paralelo, a fim de produzir a quantidade de material enriquecido e o teor de ^{235}U necessários.

1.2 Histórico

De acordo com o histórico apresentado por Migliavacca², a idéia de separar componentes de massas moleculares diferentes em misturas gasosas por meio de um campo centrífugo surgiu em fins do século XIX, quando Bredig realizou, em 1895, experimentos de centrifugação com essa finalidade. A aplicação dessa idéia à separação isotópica foi proposta por Aston e Lindemann³, em 1919, logo após a descoberta de isótopos nos elementos encontrados na natureza. Os primeiros experimentos de separação isotópica realizados em fase gasosa, durante a década de 1920, com centrífugas bastante rudimentares, todavia, não forneceram os resultados esperados. Somente em meados da década de 1930, Beams e colaboradores tiveram sucesso no uso do processo para a separação de isótopos estáveis^{4, 5, 6}.

TABELA 1 - Processos de separação isotópica desenvolvidos até hoje

Estágio	Processo	Princípio do Processo	País
Produção	Difusão Gasosa	Velocidade de passagem do gás de processo através de membranas porosas.	EUA, Reino Unido, China, França, Consórcio EURODIF ^a , Argentina
	Ultracentrifugação	Força centrífuga atuando sobre o gás de processo em um rotor.	Consórcio URENCO-CENTEC ^b , Japão, Rússia, África do Sul, EUA, Brasil
	Tubo Vórtex (Helicon)	Força centrífuga atuando sobre o gás de processo em elementos de parede fixa.	África do Sul
Desenvolvimento	Laser em vapor de urânio (AVLIS)	Diferenças em espectros de absorção de raios laser em vapor de urânio atômico.	EUA, França, Japão, Austrália, Reino Unido
	Laser em vapor de UF ₆ (MLIS)	Diferenças em espectros de absorção de raios laser em vapor de UF ₆ .	EUA, França, Japão, Austrália e Reino Unido, Alemanha, África do Sul
	Químico	Diferenças no equilíbrio químico de reações de troca isotópica.	Japão (processo ASAHU), França (processo CHEMEX)
	Separação em plasma	Ressonância ciclôtrônica-iônica e centrifugação em plasma de íons de urânio.	EUA, França e Rússia
Desenvolvidos e posteriormente abandonados	Separação eletromagnética	Desvio de íons gasosos positivos em campos elétrico e magnético.	EUA (projeto Manhattan)
	Difusão Térmica	Diferença de temperatura entre duas regiões.	EUA (projeto Manhattan)
	Bocal de Separação	Força centrífuga atuando no escoamento de um jato de gás de processo ao longo de uma parede curva.	Alemanha/Brasil (atualmente abandonado)

a. Consórcio formado por França, Itália, Bélgica, Espanha e Irã.

b. Consórcio formado por Alemanha, Holanda e Inglaterra.

Na época da Segunda Guerra, as investigações prosseguiram nos Estados Unidos, no âmbito do Projeto Manhattan, por Beams e colaboradores⁷, e na Alemanha, por um grupo de pesquisadores chefiados por Groth, Beyerle e

Harteck⁸. Ao contrário do que ocorreu nos Estados Unidos, o desenvolvimento do processo de ultracentrifugação gasosa pelo grupo alemão prosseguiu após o término da guerra, com a construção de três modelos de ultracentrífugas cada vez mais aperfeiçoadas, designadas por UZIIIB, ZG3 e ZG5⁹.

Paralelamente, entre 1946 e 1954, foi estabelecido, na União Soviética, por pesquisadores alemães e russos, sob a chefia de Steenbeck, Zippe e Scheffel, um vasto programa de construção de ultracentrífugas para a separação de isótopos de urânio. Dentro desse programa, Zippe introduziu a ultracentrífuga curta a contracorrente, reproduzida por ele mesmo, durante os anos de 1958 a 1960, nos Estados Unidos¹⁰. Essa ultracentrífuga apresentava um projeto de engenharia mais simples e barato do que as desenvolvidas por Beams e Groth, tornando-se o protótipo básico, do qual descendem todos os projetos de ultracentrífugas atualmente em operação.

Com a introdução desse novo modelo de ultracentrífuga, deu-se, a partir de 1960, a retomada no desenvolvimento do processo na Alemanha, Holanda, Reino Unido e Estados Unidos, passando-se a considerar as informações técnicas a respeito das ultracentrífugas em construção e em operação altamente sigilosas e com divulgação proibida. Ao mesmo tempo, iniciou-se a pesquisa e desenvolvimento do processo em outros países, como Japão, França, Itália, Austrália, África do Sul e Brasil.

O interesse brasileiro pela tecnologia do enriquecimento isotópico por ultracentrifugação teve início na década de 50, quando foram adquiridas da Alemanha, pelo Almirante Álvaro Alberto, três ultracentrífugas de modelo ZG3 (FIG.1)⁹. Essas três ultracentrífugas, cujo embarque nos portos europeus foi vetado pelo governo norte americano, chegaram ao Brasil em fins de 1958, após negociações conduzidas pelo presidente da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), sendo instaladas no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Uma dessas ultracentrífugas foi utilizada, em 1966, pelo Prof. Dr. Ivo Jordan, no primeiro ensaio de enriquecimento de urânio realizado no Brasil¹¹. Logo a seguir, essas ultracentrífugas foram enclausuradas, sendo as pesquisas nessa área abandonadas no país.

Por volta de 1974, houve uma nova tentativa brasileira de importar ultracentrífugas da Alemanha, que foi, novamente, bloqueada pela intervenção

norte americana, sob alegação de que a tecnologia, classificada como estratégica, poderia ser utilizada para a confecção de artefatos nucleares bélicos.

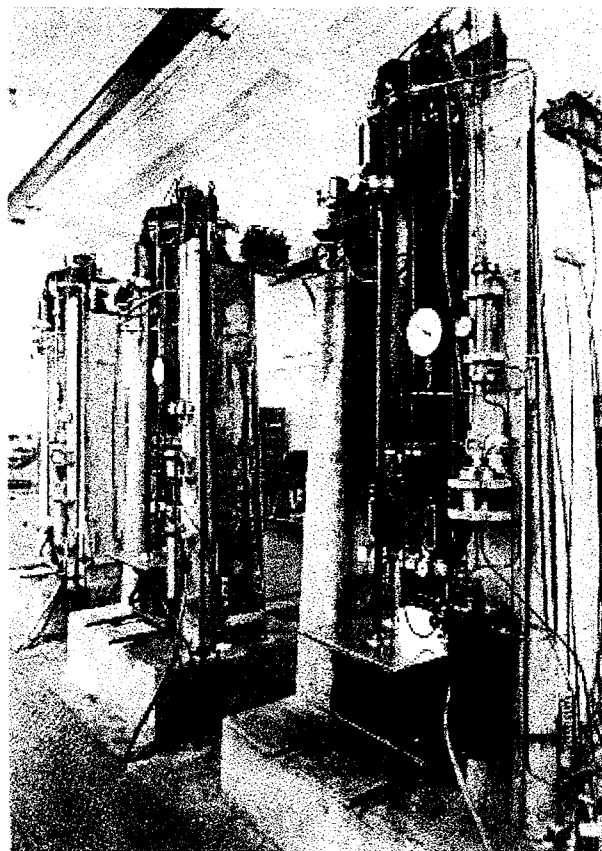


FIGURA 1 - Ultracentrífugas modelo ZG3

Na década de 70, surgiu o interesse da Marinha do Brasil em desenvolver um submarino de propulsão nuclear. Porém, para a utilização em reatores compactos, seria necessário dispor de urânio enriquecido acima de 20 % em peso no isótopo ^{235}U .

Sabendo que o material para a fabricação do combustível necessário não poderia ser adquirido no mercado, e que a tecnologia envolvida nos processos de enriquecimento isotópico não poderia ser adquirida dos países que já a haviam desenvolvido, a Marinha do Brasil optou, no final dessa mesma década, através da criação da Coordenadoria para Projetos Especiais (COPESP), hoje Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), pelo desenvolvimento do processo de separação isotópica por ultracentrifugação para atender às suas necessidades em termos de combustível para reatores

nucleares. O desenvolvimento, tanto da tecnologia envolvida na produção das ultracentrífugas isoladas, como de seu arranjo em cascatas, foi, e continua sendo feito, em parceria com o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), órgão subordinado à CNEN.

Inicialmente, em setembro de 1980, as três ultracentrífugas modelo ZG3, que estavam enclausuradas no IPT, foram transportadas para o IPEN onde, em 1981, foram utilizadas em novos e últimos ensaios de separação isotópica de argônio e urânio. Em abril de 1982, foi realizado o primeiro ensaio de separação isotópica de urânio em ultracentrífugas totalmente projetadas e fabricadas por técnicos brasileiros. Em abril de 1988, foi inaugurada, no Centro Experimental Aramar, a primeira cascata para o enriquecimento isotópico de urânio projetada e construída com tecnologia totalmente nacional.

Atualmente, a tecnologia desenvolvida e aperfeiçoada é também utilizada no projeto e implantação de usinas para o enriquecimento do material a ser utilizado na fabricação do combustível destinado ao abastecimento dos reatores de potência brasileiros.

1.3 Importância do tema

A importância maior desse desenvolvimento está no fato de propiciar ao Brasil a possibilidade de desenvolver recursos que garantam sua autonomia em termos de enriquecimento de urânio, não necessitando recorrer a um mercado restritivo, que nem sempre está ou estará aberto ao suprimento de nossas necessidades em termos de urânio enriquecido, principalmente para reatores de pesquisa, que demandam combustível com teor de ^{235}U próximo ou superior a 20% em peso. Além disso, representa, a médio prazo, uma economia de recursos substancial, relativa aos serviços de enriquecimento contratados no exterior para o abastecimento dos reatores de potência já instalados.

1.4 Alcance do trabalho

Como será demonstrado no decorrer desta tese, a simulação da operação de uma cascata de ultracentrífugas não pode ser feita utilizando-se as equações desenvolvidas para a cascata ideal apresentadas na literatura, em vista das aproximações necessárias inerentes ao arranjo físico. Além disso, para fins de dimensionamento, torna-se necessário levar em consideração a influência das

pressões das correntes de alimentação, de retirada de produto e de retirada de rejeito às quais a ultracentrífuga a ser utilizada é submetida sobre o seu comportamento separativo, o que não é apresentado na teoria de cascatas divulgada na literatura.

O presente trabalho visa a apresentação de modelos matemáticos desenvolvidos para simular o comportamento das pressões, quando necessário, das vazões e composições isotópicas das correntes gasosas internas de cascatas de separação isotópica compostas de ultracentrífugas, quando estas operam em estado estacionário e quando sujeitas a perturbações de natureza interna e externa.

A aplicabilidade deste trabalho abrange as fases de planejamento, concepção e dimensionamento de cascatas de separação isotópica por ultracentrifugação, além de permitir o conhecimento de seus parâmetros operacionais em qualquer condição de operação, possibilitando a diagnose e eventual correção de problemas internos. A simulação do comportamento dinâmico permite a previsão de tempos de estabilização.

Como poderá ser visto ao longo da tese, a quase totalidade dos modelos apresentados neste trabalho é original e inédita. A teoria básica da separação isotópica em cascatas ideais, desenvolvida na década de 50 e início da década de 60, é claramente apresentada em várias obras. A aplicação dessa teoria a cascatas de separação isotópica por ultracentrifugação é encontrada em poucos artigos, sendo a análise de diferentes hipóteses e a comparação com resultados experimentais praticamente inexistente em literatura.

1.5 Fundamentos teóricos

A teoria clássica da separação isotópica foi desenvolvida durante a Segunda Guerra Mundial e início da década de 60¹². De acordo com essa teoria, todo elemento de separação, independente do processo utilizado, quando alimentado com uma mistura isotópica, provoca na mesma um efeito elementar de separação, gerando uma corrente enriquecida no isótopo desejado (produto) e outra empobrecida nesse mesmo isótopo (rejeito). No caso do urânio, o isótopo desejado é o ^{235}U , por ser o isótopo de interesse.

Uma vez que a proporção do isótopo ^{234}U presente no urânio natural é muito pequena, o gás de processo será considerado como sendo constituído por

uma mistura binária dos isótopos ^{235}U e ^{238}U na forma de hexafluoreto de urânio, ou seja, uma mistura de moléculas $^{235}\text{UF}_6$ e $^{238}\text{UF}_6$.

1.5.1 Definição dos parâmetros de separação de um elemento

O grau de separação isotópica obtido, em condições estacionárias, utilizando-se um dado elemento de separação é medido através do fator de separação (α), que relaciona as concentrações do isótopo desejado nas correntes efluentes, definido por:

$$\alpha = \frac{R'}{R''} \quad (1)$$

onde: R' = razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto,

R'' = razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de rejeito,

sendo a razão de abundância isotópica definida como a relação entre o número de átomos do isótopo ^{235}U e o número de átomos do isótopo ^{238}U presentes em cada corrente.

Outros parâmetros utilizados para quantificar a separação efetuada por um elemento são o fator de enriquecimento, definido por:

$$\beta = \frac{R'}{R} \quad (2)$$

e o fator de empobrecimento, definido por:

$$\gamma = \frac{R}{R''} \quad (3)$$

onde R é a razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente que alimenta o elemento de separação.

Das definições acima, resulta a relação:

$$\alpha = \beta\gamma \quad (4)$$

Define-se processo de separação simétrico como aquele realizado em condições operacionais para as quais $\beta = \gamma$.

Outro parâmetro importante para o elemento de separação é o corte (θ), definido como a relação entre a vazão mássica da corrente de produto (L') e a vazão mássica da corrente de alimentação (L):

$$\theta = \frac{L'}{L} \quad (5)$$

Aplicando, ao elemento de separação, as equações de balanço de material para o elemento U e para o isótopo ^{235}U , obtemos:

$$L = L' + L'' \quad (6)$$

e

$$Lz = L'y + L''x \quad (7)$$

onde: L'' = vazão mássica da corrente de rejeito produzida pelo elemento,
 y = fração mássica do ^{235}U na corrente de produto produzida pelo elemento,
 z = fração mássica do ^{235}U na corrente de alimentação introduzida no elemento,
 x = fração mássica do ^{235}U na corrente de rejeito produzida pelo elemento.

Das equações (5), (6) e (7), resulta a relação:

$$\theta = \frac{z - x}{y - x} \quad (8)$$

As definições de fração mássica (z) e razão de abundância isotópica (R) nos permitem estabelecer, para o urânio, as seguintes relações de conversibilidade entre essas duas formas de expressão da concentração do isótopo desejado em uma mistura isotópica binária:

$$y = \frac{R * 235 / 238}{1 + R * 235 / 238} \quad (9)$$

e

$$R = \frac{y}{1 - y} \frac{238}{235} \quad (10)$$

Substituindo, na equação (8), y e x pela relação de conversibilidade (9) correspondente e utilizando as equações (2), (3) e (4), obtém-se:

$$\theta = \frac{(\gamma - 1)[1 + z(\beta - 1)]}{\alpha - 1} \quad (11)$$

ou, quando o elemento opera em processo de separação simétrico:

$$\theta = \frac{1 + z(\beta - 1)}{\beta + 1} \quad (12)$$

O último parâmetro de grande importância na quantificação da separação isotópica realizada por um dado elemento é o poder de separação, que foi introduzido em virtude da necessidade de avaliar o desempenho do elemento de separação tanto em termos de quantidade quanto em termos de qualidade da separação conseguida.

A definição de poder de separação baseia-se na atribuição de uma propriedade abstrata a uma mistura isotópica, denominada "valor", definida por uma função que depende apenas de sua composição isotópica. Essa função foi estabelecida por Dirac, em 1941, com base na imposição de sempre ocorrer um aumento de valor numa dada mistura isotópica binária ao submetê-la a um processo de separação, decorrente do trabalho realizado pelo dispositivo utilizado. Desta forma, a função escolhida apresenta valor nulo para $x' = 0,5$, sendo x' a fração molar do isótopo ^{235}U e cresce até infinito quando x' se aproxima de 0 e 1, sendo expressa por:

$$V(x') = (2x' - 1) \ln \frac{x'}{1 - x'} = \frac{R - 1}{R + 1} \ln R \quad (13)$$

Nos casos em que há o escoamento de uma mistura isotópica, define-se, para a corrente, um fluxo de valor, dado por:

$$U = L V(x') \quad (14)$$

com L expresso em kgU/a.

O poder de separação é, então, definido como a variação do fluxo de valor provocada pela passagem da mistura isotópica através do elemento de separação, sendo calculado através do balanço:

$$\delta U = L' V(y') + L'' V(x') - L V(z') \quad (15)$$

onde: y' = fração molar do ^{235}U na corrente de produto produzida pelo elemento,
 z' = fração molar do ^{235}U na corrente de alimentação introduzida no elemento,

x' = fração molar do ^{235}U na corrente de rejeito produzida pelo elemento.

Utilizando as definições de função de valor e corte, essa equação pode ser convertida em:

$$\delta U = \left[\theta \frac{R' - 1}{R' + 1} \ln R' + (1 - \theta) \frac{R'' - 1}{R'' + 1} \ln R'' - \frac{R - 1}{R + 1} \ln R \right] * G * \frac{238}{352} \quad (16)$$

com G = vazão mássica da corrente de alimentação, expressa em kgUF_6/a .

O poder de separação, calculado pela expressão acima, é expresso em Unidades de Trabalho Separativo por ano (UTS/a).

1.5.2 Descrição da ultracentrífuga a contracorrente (elemento de separação a ser utilizado)

O esquema de uma ultracentrífuga a contracorrente é mostrado na FIG.2¹³.

A descrição detalhada do princípio do processo de separação isotópica por ultracentrifugação pode ser encontrada na literatura especializada^{13, 14, 15}.

Em linhas gerais, o gás de processo é introduzido na região central de um cilindro girando em alta velocidade. Macroscopicamente falando, a ação da força centrífuga sobre o gás cria um perfil radial de pressões, partindo-se do alto vácuo, no centro do cilindro, para pressões mais elevadas, nas proximidades de sua parede. O efeito da força centrífuga sobre a massa molecular de cada um dos isótopos é diferenciado, fazendo com que se estabeleçam, na mistura isotópica gasosa, perfis de pressão parcial distintos para os dois isótopos. O resultado deste efeito é uma concentração radial do isótopo de maior massa molecular (^{238}U) numa região mais próxima à parede do cilindro, enquanto que o de menor

massa molecular (^{235}U) tende a concentrar-se numa região mais afastada da mesma.

Esse é o chamado efeito de separação radial que, por ser a diferença de massa molecular entre os isótopos muito pequena, é pouco significativo.

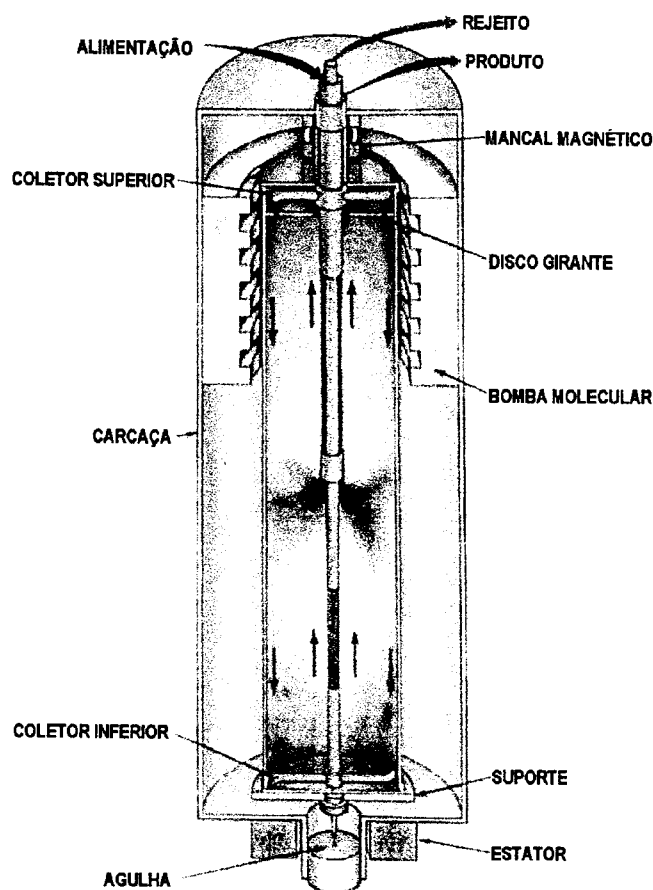


FIGURA 2 - Esquema da ultracentrífuga a contracorrente

Provocando-se uma contracorrente gasosa na direção axial do cilindro, esse efeito de separação é amplificado através do fenômeno de transporte de massa por difusão e convecção entre duas correntes de composições isotópicas diferentes entre si.

Essa contracorrente pode ser gerada por meios térmicos, aquecendo-se um dos extremos do cilindro e resfriando-se o outro, ou por meios mecânicos, provocando-se uma distorção no perfil radial de pressões em um dos extremos do cilindro através da introdução de um coletor estacionário. Na geração da contracorrente por meios mecânicos, na verdade, os dois mecanismos se

combinam, na medida em que o choque do gás, em alta velocidade, com o coletor estacionário, provoca o seu aquecimento¹⁶.

Estabelecem-se desta forma, no interior do cilindro, perfis tridimensionais de pressões parciais diferenciados para os dois isótopos. Em uma das extremidades, na região mais próxima à parede, obtém-se uma corrente gasosa com a máxima concentração do isótopo de maior massa molecular, enquanto que na extremidade oposta, em uma região mais afastada da parede, obtém-se outra corrente gasosa com a máxima concentração do isótopo de menor massa molecular.

A retirada de material é feita no ponto de máxima concentração dos dois isótopos, nos dois extremos do cilindro, gerando duas correntes externas: a de produto, enriquecida no isótopo ^{235}U em relação à de alimentação, e a de rejeito, empobrecida no isótopo ^{235}U em relação à de alimentação.

Comparativamente aos demais processos, é característica da ultracentrifugação a obtenção de um alto grau de separação isotópica em uma única etapa de enriquecimento, porém, com baixa capacidade de processamento.

No caso da ultracentrifugação, o fator de separação varia pouco com o corte¹⁷, podendo ser considerado, em primeira aproximação, apenas como função da vazão de alimentação. Já os fatores de enriquecimento e de empobrecimento dependem, além da vazão de alimentação, do corte ao qual está submetido o elemento.

A otimização do desempenho separativo de uma ultracentrífuga é feita sempre maximizando o poder de separação, tanto em relação à vazão de alimentação quanto em relação ao corte. Para uma dada vazão de alimentação, obtém-se o máximo poder de separação sempre em condições de simetria, isto é, utilizando o valor de corte para o qual $\beta=\gamma$, que é sempre próximo a 0,5.

A relação que permite o cálculo dos fatores β e γ em função da vazão de alimentação e do corte das ultracentrífugas pode ser obtida experimentalmente, como será descrito adiante. No entanto, há casos em que se deseja calcular os parâmetros de separação de uma ultracentrífuga que ainda não foi otimizada, ou sequer existe, não sendo, portanto, possível a determinação experimental das curvas citadas. Nesses casos, necessitamos de relações teóricas.

A resolução simplificada da equação de difusão-convecção no interior de uma ultracentrífuga proposta por Cohen, resultando na chamada "equação de Cohen-Onsager", fornece, para os fatores de enriquecimento e empobrecimento, as seguintes expressões¹⁸:

$$\beta = \frac{C_1 + \theta G}{\theta G + C_1 \exp[-(C_1 + \theta G)z_e / C_5]} \quad (17)$$

$$\gamma = \frac{C_1 \exp\{[C_1 - (1 - \theta)G]z_s / C_5\} - (1 - \theta)G}{C_1 - (1 - \theta)G} \quad (18)$$

com:

$$C_1 = \frac{\Delta M \omega^2 L}{RT} I_1 = \frac{\Delta M \omega^2}{RT} \int_0^a F(r) r dr \quad (19)$$

$$C_5 = \pi a^2 \rho D + \frac{L^2}{2\pi \rho D} I_3 = \pi a^2 \rho D + \frac{1}{2\pi \rho D} \int_0^a F^2(r) \frac{dr}{r} \quad (20)$$

sendo: z_e o comprimento da seção de enriquecimento da ultracentrífuga,

z_s o comprimento da seção de recuperação da ultracentrífuga,

ΔM a diferença entre as massas moleculares dos dois isótopos,

ω a velocidade angular do cilindro,

a o raio interno do cilindro,

R a constante universal dos gases,

T a temperatura média do gás no interior do cilindro,

ρ a densidade da mistura gasosa no interior do cilindro,

D o coeficiente de difusão mútua dos dois componentes da mistura isotópica, e

$F(r)$ a chamada função de fluxo, que fisicamente representa a vazão mássica total ascendente entre a posição radial 0 (eixo do cilindro) e a posição radial r , dada por :

$$F(r) = 2\pi \int_0^r \rho w(r') r' dr' \quad (21)$$

onde $\rho w(r)$ é a densidade de fluxo da contracorrente gasosa na posição radial r .

Os parâmetros C_1 e C_5 podem ser calculados admitindo-se uma dada distribuição para a densidade de fluxo (perfil de fluxo), ou obtendo-a através da utilização de métodos numéricos para a resolução das equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento que descrevem o escoamento do gás no interior da ultracentrífuga.

Como os perfis de fluxo estudados até hoje nos levam a resultados aproximados, que podem não corresponder à realidade e não dispomos, ainda, de um método numérico eficaz para o cálculo desse perfil, foi proposto, pelo Prof. Dr. Ivo Jordan, um procedimento alternativo para o cálculo dos parâmetros C_1 e C_5 , descrito a seguir.

O poder de separação de uma ultracentrífuga pode ser calculado por¹⁸:

$$\delta U = e \delta U_{\max}^t = e_i e_c e_F \delta U_{\max}^t \quad (22)$$

sendo e sua eficiência, δU_{\max}^t o valor máximo teórico do poder de separação, dado por:

$$\delta U_{\max}^t = \frac{\pi \rho D z}{2} \left(\frac{\Delta M \omega^2 a^2}{2RT} \right)^2 \quad (23)$$

e_i a eficiência da idealidade, devida ao fato da ultracentrífuga ser uma cascata quadrada e não ideal, cujo valor máximo é próximo a 0,8145, e_c a eficiência da circulação interna, que representa a perda por difusão de retorno na direção axial, dada por:

$$e_c = \frac{m^2}{1+m^2} \quad (24)$$

sendo:

$$m = \frac{\sqrt{2 \int_0^a [F(r)]^2 \frac{dr}{r}}}{2\pi a \rho D} \quad (25)$$

e e_F a eficiência do perfil de fluxo, devida à diferença entre o perfil de fluxo real e o ótimo, dada por:

$$e_F = \frac{4 * \left[\frac{1}{a^2} \int_0^a F(r) r dr \right]^2}{\int_0^a [F(r)]^2 \frac{dr}{r}} \quad (26)$$

Os parâmetros C_1 e C_5 podem ser expressos em função das eficiências definidas como:

$$C_1 = \frac{\sqrt{2}\Delta M}{2RT} \pi \rho D \omega^2 a^3 \sqrt{e_F} m = \frac{\sqrt{2}\Delta M}{2RT} \pi \rho D \omega^2 a^3 \sqrt{\frac{e_F e_C}{1-e_C}} = b \sqrt{\frac{e/e_l}{1-e_C}} \quad (27)$$

$$C_5 = \pi a^2 \rho D (1+m^2) = \pi a^2 \rho D \frac{1}{1-e_C} = C'_5 \frac{1}{1-e_C} \quad (28)$$

Admitindo-se que a eficiência da idealidade tenha seu valor máximo no ponto ótimo de operação da ultracentrífuga e utilizando a relação:

$$\alpha_{ot} = \beta_{ot} * \gamma_{ot} \quad (29)$$

ou, em termos das eficiências:

$$\beta_{ot} = \frac{b \sqrt{\frac{e/e_l}{1-e_C}} + \theta_{ot} G_{ot}}{\theta_{ot} G_{ot} + b \sqrt{\frac{e/e_l}{1-e_C}} \exp \left[- \left(b \sqrt{\frac{e/e_l}{1-e_C}} + \theta_{ot} G_{ot} \right) \frac{z_e (1-e_C)}{C'_5} \right]}$$

$$\gamma_{ot} = \frac{b \sqrt{\frac{e/e_l}{1-e_C}} \exp \left[\left(b \sqrt{\frac{e/e_l}{1-e_C}} - (1-\theta_{ot}) G_{ot} \right) \frac{z_s (1-e_C)}{C'_5} \right] - (1-\theta_{ot}) G_{ot}}{\left(b \sqrt{\frac{e/e_l}{1-e_C}} - (1-\theta_{ot}) G_{ot} \right)}$$

$$\alpha_{ot} = \beta_{ot} * \gamma_{ot} \quad (30)$$

onde \underline{e} é a eficiência global obtida no ponto ótimo de operação da ultracentrífuga, podemos encontrar o valor de e_C para o qual a eficiência e_l apresenta seu valor máximo e, desta forma, calcular os valores dos parâmetros C_1 e C_5 sem a

necessidade de conhecer o perfil de fluxo interno. Esses valores de C_1 e C_5 , no entanto, são válidos apenas no ponto ótimo de operação da ultracentrífuga.

1.5.3 Cascatas de separação isotópica

Quando se deseja produzir urânio enriquecido, são especificados a quantidade de material e o nível de enriquecimento no isótopo ^{235}U a serem obtidos.

O efeito de separação provocado por um único elemento nem sempre é suficiente para atingir, em uma única etapa, o nível de enriquecimento especificado.

A fim de obter-se um efeito multiplicativo dessa separação isotópica individual, é necessária a interligação de elementos de separação em série, constituindo estágios. Nos casos em que os elementos de separação apresentam baixa taxa de processamento, a fim de obter-se um efeito multiplicativo da quantidade de material a ser processado, conectam-se elementos de separação em paralelo em cada estágio. Um conjunto de estágios de separação compõe uma cascata de separação isotópica.

Para elementos de separação cujo ponto ótimo corresponde à operação em processo simétrico, os estágios de separação são interligados de tal forma que a corrente de alimentação de um estágio genérico i é formada pela mistura da corrente de produto do estágio $i-1$ com a corrente de rejeito do estágio $i+1$, conforme é mostrado na FIG.3¹³.

A parte da cascata que leva o material de alimentação até o nível de enriquecimento desejado compõe a chamada seção de enriquecimento. A fim de reduzir a quantidade de material alimentada à cascata para obter a taxa de produção desejada, incluem-se na mesma estágios de recuperação, ou seja, estágios cuja finalidade é empobrecer a corrente de rejeito do estágio onde é introduzida a corrente de alimentação. Esse conjunto de estágios compõe a chamada seção de recuperação, que normalmente é dimensionada através de um balanço entre o custo do material de alimentação e o custo operacional da recuperação do material.

Segundo a teoria clássica da separação isotópica¹², a distribuição de fluxos interestágios que minimiza o fluxo interno total de material e,

conseqüentemente, o consumo de energia, corresponde ao perfil da cascata ideal, mostrado na FIG.4¹³.

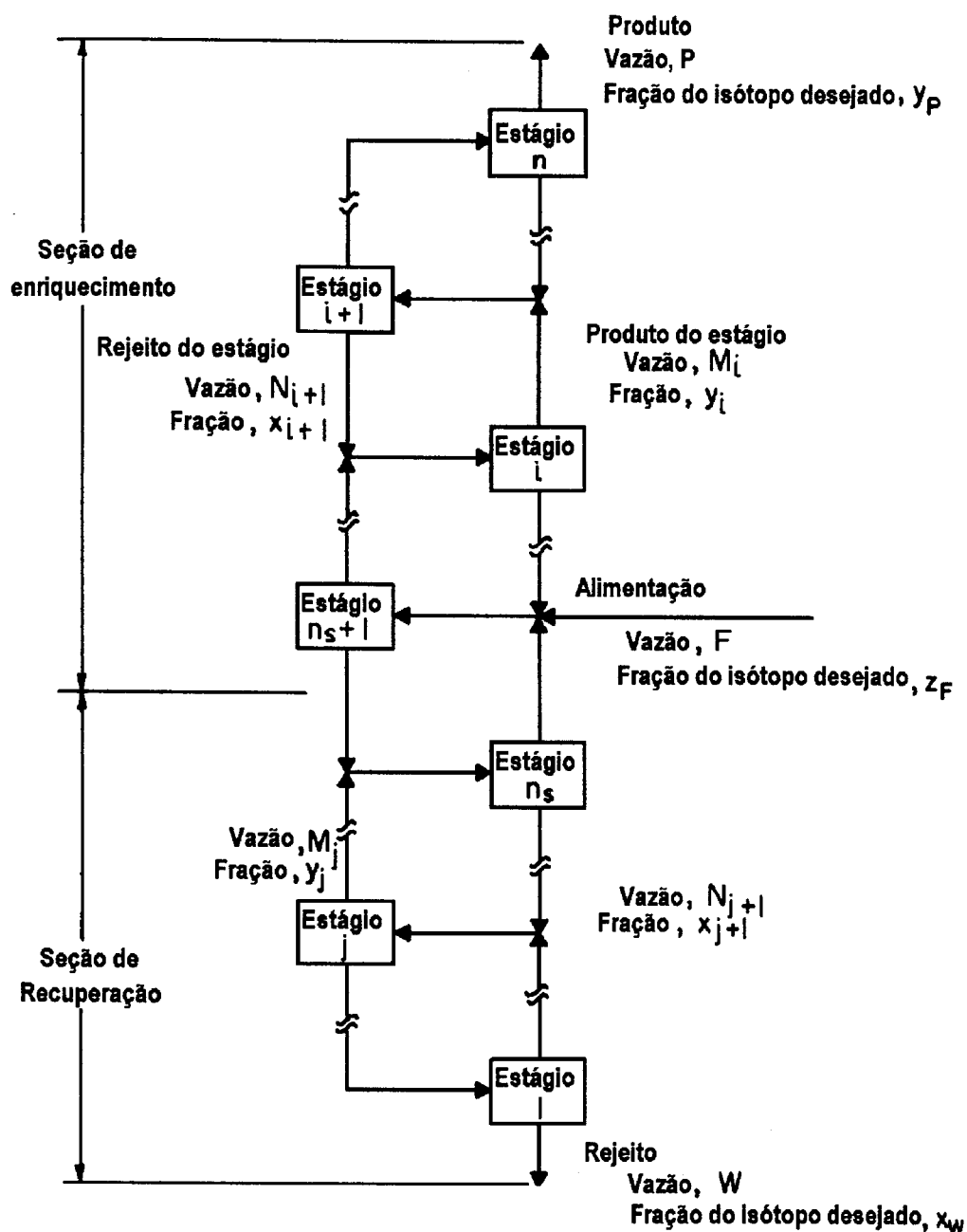


FIGURA 3 - Esquema de interligação entre os estágios de uma cascata

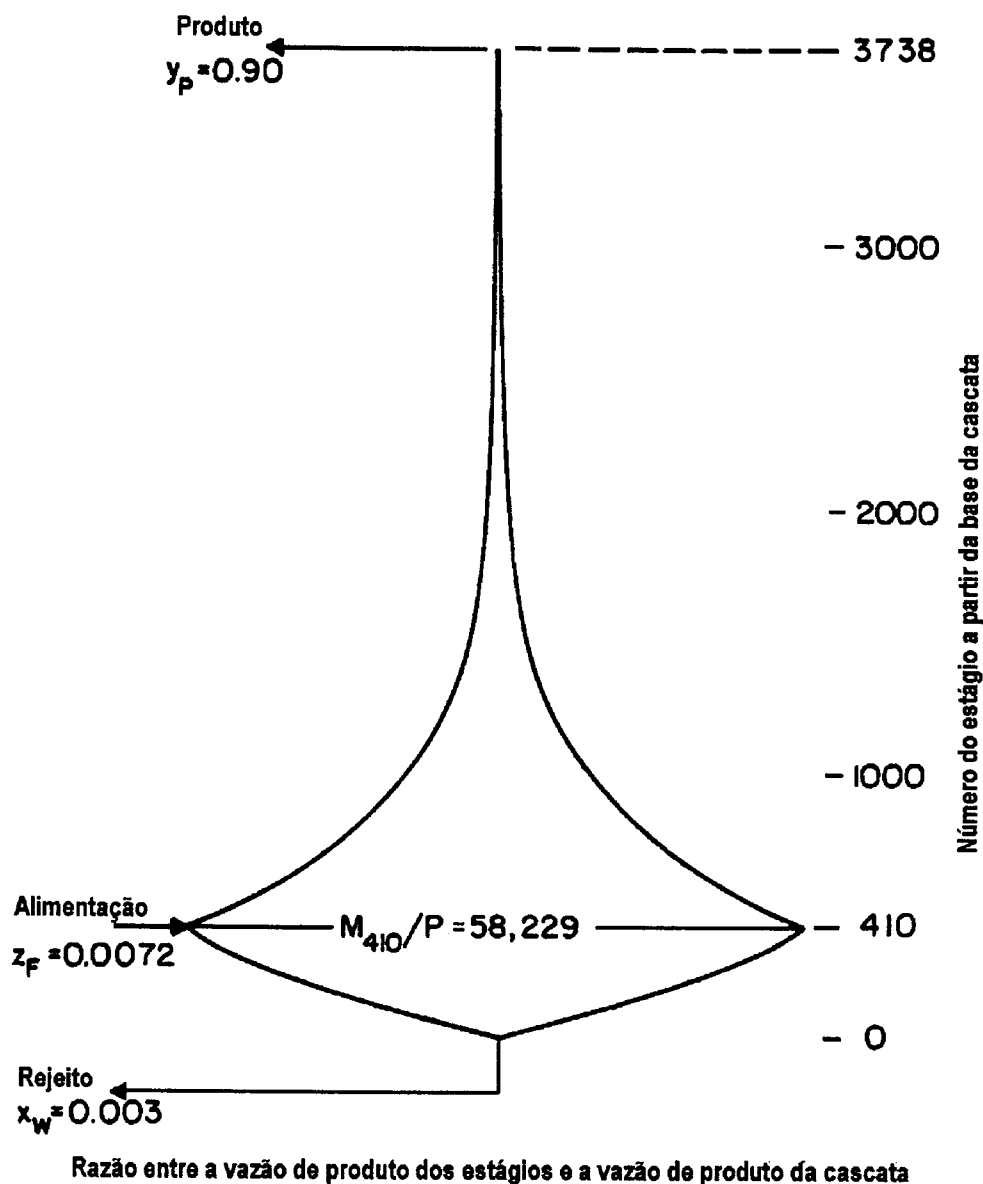


FIGURA 4 - Perfil de fluxos (n_i versus P/P) de uma cascata ideal para $\beta = 1,00214$

1.5.4 Equações aplicáveis à cascata ideal

A teoria geral da cascata ideal foi desenvolvida por Cohen¹² e é apresentada nas obras de Benedict et al.¹³, Pratt¹⁹ e Villani¹⁴.

De acordo com Benedict et al.¹³, a cascata ideal apresenta duas características importantes: possui o fator de enriquecimento constante em todos os estágios e não apresenta diferenças de composição isotópica entre as correntes que se misturam para compor a alimentação dos estágios de separação. Uma consequência dessas duas características é a operação de

todos os estágios em processo de separação simétrico e com o mesmo fator de separação.

Como já foi mencionado, o dimensionamento de uma cascata de separação isotópica parte do estabelecimento de uma tarefa de separação a ser executada, que constitui-se na definição da quantidade de material a ser produzida (vazão de produto), do teor de ^{235}U a ser obtido nas correntes de produto e rejeito e do teor de ^{235}U no material a ser utilizado como alimentação.

Uma vez estabelecidas as razões de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto R_p e na corrente de rejeito R_w a serem obtidas, assim como a da corrente de alimentação a ser utilizada R_f , pode-se calcular o número de estágios necessário nas seções de enriquecimento ($n-n_s$) e recuperação (n_s), respectivamente, por¹³:

$$n - n_s = \frac{\ln(R_p / R_f)}{\ln \beta} \quad (31)$$

$$n_s = \frac{\ln(R_f / R_w)}{\ln \beta} - 1 \quad (32)$$

sendo n o número de estágios total da cascata, e a relação entre a vazão de produto e a de alimentação da cascata (P/F), por:

$$P/F = \frac{z_f - x_w}{y_p - x_w} \quad (33)$$

Estabelecida a vazão de produto desejada P , as vazões de alimentação dos estágios das seções de enriquecimento e de recuperação podem ser calculadas, respectivamente, por¹³:

$$F_i = \frac{P}{1-\theta_i} * \frac{1}{\beta-1} [y_p(1-\beta^{i-n-1}) + (1-y_p)\beta(\beta^{n-i+1} - 1)] \quad i = n_s+1, \dots, n \quad (34)$$

e

$$F_i = \frac{W}{\theta_i} * \frac{1}{\beta-1} [x_w\beta(\beta^i - 1) + (1-x_w)(1-\beta^{-i})] \quad i = 1, \dots, n_s \quad (35)$$

onde W é calculado por:

$$W = \frac{1-P/F}{P/F} * P = \frac{y_p - z_f}{z_f - x_w} * P \quad (36)$$

e o corte dos estágios, por estes operarem em processo de separação simétrico, é calculado, de acordo com a equação (12), por:

$$\theta_i = \frac{1 + z_i(\beta - 1)}{\beta + 1} \quad i=1, \dots, n \quad (37)$$

Esse conjunto de equações, aliado às equações de balanço de material aplicadas ao isótopo ^{235}U nos pontos de mistura de correntes internos à cascata e às relações entre as composições das correntes de alimentação, produto e rejeito de cada estágio, estabelecidas pela definição dos fatores de separação, enriquecimento e empobrecimento aplicadas ao caso simétrico, resultam em um sistema de equações não lineares que, resolvido, fornece a distribuição interna de vazões e composições na cascata.

A linearização desse sistema de equações pode ser obtida utilizando-se uma simplificação bastante comum, que corresponde a considerar todas as correntes envolvidas com baixas concentrações isotópicas, denominada "caso diluído" ($1-y \cong 1$). Dessa simplificação, resultam as seguintes expressões para o corte e para a vazão de alimentação dos estágios:

$$\theta_i = \frac{1}{\beta + 1} \quad i=1, \dots, n \quad (38)$$

$$F_i = P * \frac{\beta + 1}{\beta - 1} * \frac{\beta^{n-n_s} - \beta^{i-(n_s+1)}}{\beta^{i-(n_s+1)}} \quad i = n_s+1, \dots, n \quad (39)$$

e

$$F_i = P * \frac{\beta + 1}{\beta - 1} * (\beta^{n-n_s} - 1) \frac{\beta^{n_s+1} - \beta^{n_s+1-i}}{\beta^{n_s+1} - 1} \quad i = 1, \dots, n_s \quad (40)$$

A capacidade separativa de uma cascata ideal pode ser calculada por¹³:

$$\Delta U = \left[P/F \frac{R_p - 1}{R_p + 1} \ln R_p + (1 - P/F) \frac{R_w - 1}{R_w + 1} \ln R_w - \frac{R_f - 1}{R_f + 1} \ln R_f \right] * F * \frac{238}{352} \quad (41)$$

onde F é a vazão de alimentação da cascata, em kgUF₆/a. Para a cascata ideal, o valor de ΔU calculado pela expressão acima é igual à somatória do poder de separação de todos os elementos que a compõem, uma vez que não existem perdas por mistura de correntes com composições isotópicas diferentes nos pontos de confluência internos.

1.5.5 Características de uma cascata de ultracentrífugas

A baixa capacidade de processamento de uma ultracentrífuga faz com que os estágios de uma cascata sejam compostos por unidades idênticas interligadas em paralelo, o que eleva a quantidade de material que pode ser processada.

Nesse caso, uma vez que os estágios são compostos por pequenas unidades de separação, é economicamente viável a manutenção de um perfil de fluxos muito próximo ao da cascata ideal, sendo o desvio em relação a este causado pela aproximação do número de ultracentrífugas calculado para cada estágio a valores inteiros ou, por razões inerentes ao arranjo físico da cascata, a valores inteiros próximos aos calculados.

Esse desvio faz com que as ultracentrífugas deixem de operar em seu ponto ótimo, e as equações desenvolvidas para o cálculo das vazões e composições isotópicas da cascata ideal perdem a validade. Outro efeito dessa aproximação é que a somatória dos poderes de separação de todas as ultracentrífugas que compõem a cascata deixa de ser igual à capacidade separativa calculada a partir das vazões e composições das correntes externas, uma vez que deixa de ser respeitada a condição de não haver mistura de correntes com composições isotópicas diferentes nos pontos de confluência internos à cascata.

Para cascatas não ideais, define-se eficiência (E) como sendo a razão entre a capacidade separativa da cascata ideal equivalente, calculada a partir das vazões e composições das correntes externas utilizando a equação (41), e a

somatória dos poderes de separação de todos os elementos que a compõem ($\sum_j \delta U_j$):

$$E = \frac{\Delta U_{id}}{\sum_j \delta U_j} \quad (42)$$

No caso das cascatas de ultracentrífugas, valores de eficiência em torno de 99% são comuns.

Um esquema da interligação entre as ultracentrífugas que constituem os estágios e entre os vários estágios que constituem uma cascata de ultracentrífugas pode ser visto na FIG.5²⁰. Como é mostrado nessa figura, tubulações comuns coletam as correntes de produto e rejeito e distribuem a alimentação às ultracentrífugas de um mesmo estágio. Essas tubulações comuns, denominadas tubulações interestágios, são interligadas respeitando o esquema de mistura de correntes apresentado na FIG.3.

A realização da mesma tarefa de separação por todas as ultracentrífugas que constituem um mesmo estágio está vinculada à similaridade construtiva entre elas, traduzida pela igualdade entre as pressões das correntes de alimentação, produto e rejeito em ultracentrífugas diferentes para uma mesma vazão de alimentação e um mesmo corte. Caso não haja essa igualdade, o desempenho dos estágios de separação poderá ser prejudicado²¹.

Como foi mencionado no tópico 1.5.2 acima, existe uma diferença de pressão entre o centro do rotor de cada ultracentrífuga e os pontos de coleta de suas correntes de produto e rejeito. Quando a tubulação de alimentação de um determinado estágio, e, portanto, a região central do cilindro das ultracentrífugas que o constituem, é interligada à tubulação de coleta de produto do estágio anterior, e, portanto, ao ponto de coleta da corrente de produto das ultracentrífugas que o constituem, e à tubulação de coleta de rejeito do estágio posterior e, portanto, ao ponto de coleta da corrente de rejeito das ultracentrífugas que o constituem, estabelece-se, por diferença de pressão, um fluxo de material que parte dos pontos de coleta das ultracentrífugas dos dois estágios não consecutivos e alimenta as ultracentrífugas do estágio localizado entre eles. Essa é a força motriz que possibilita o escoamento das correntes interestágios da cascata.

Um esquema do arranjo físico mais compacto da tubulação interestágios que possibilita o encaminhamento das correntes internas em uma cascata de ultracentrífugas de acordo com o esquema mostrado na FIG.5 pode ser visto na FIG.6²⁰. Nos casos em que a pressão da corrente de produto das ultracentrífugas de um dado estágio, ao atingir a tubulação interestágios correspondente, é diferente da pressão da corrente de rejeito das ultracentrífugas do estágio não consecutivo ao atingir a tubulação interestágios correspondente, promovendo a mistura das duas correntes, torna-se necessária a instalação de dispositivos ativos ou passivos que promovam, na corrente de maior pressão, a perda de carga necessária á equalização das pressões, possibilitando a operação das ultracentrífugas correspondentes com o corte desejado. No caso do esquema apresentado na FIG.6, a pressão da corrente de rejeito das ultracentrífugas é mais alta que a pressão da corrente de produto, o que torna necessária a instalação de um dispositivo de controle de vazão na tubulação de rejeito de todos os estágios da cascata.

Um exemplo do arranjo físico real das ultracentrífugas e tubulações que constituem uma cascata pode ser visto na FIG.7²⁰, que corresponde a uma foto das cascatas de ultracentrífugas holandesas, instaladas em Almelo.

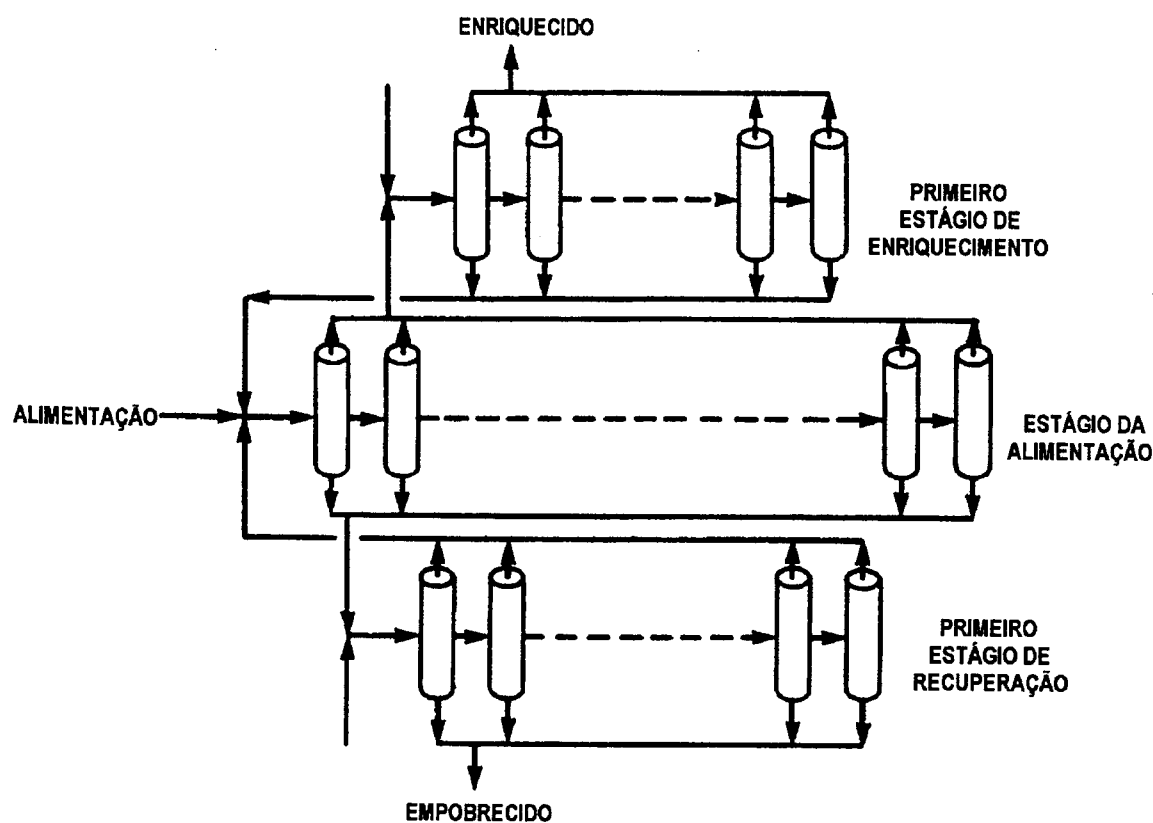


FIGURA 5 - Interligação entre as ultracentrífugas de uma cascata

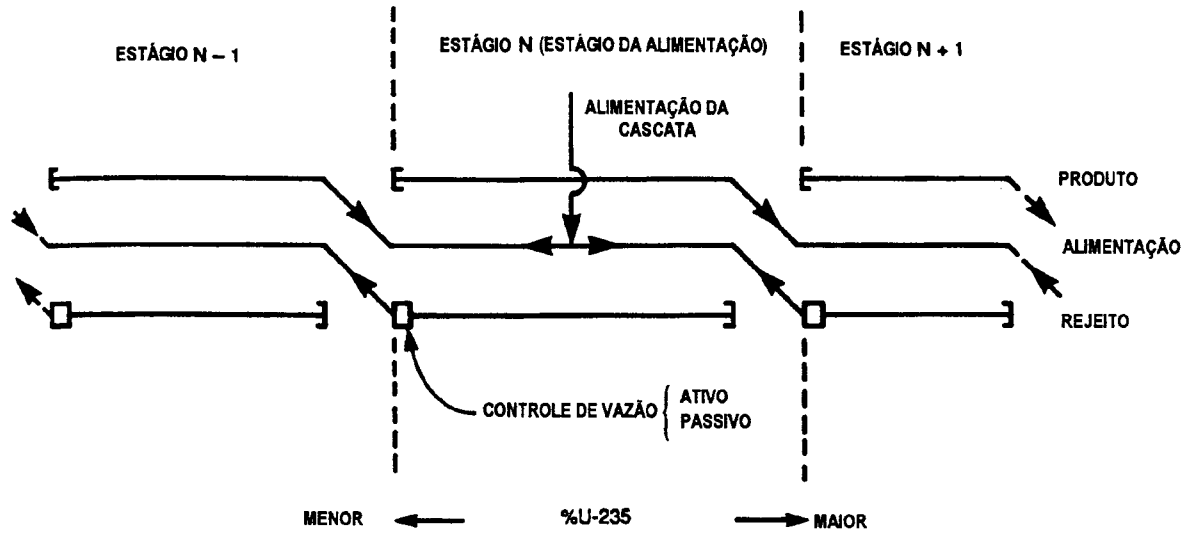


FIGURA 6 - Esquema do arranjo físico da tubulação de uma cascata de ultracentrífugas

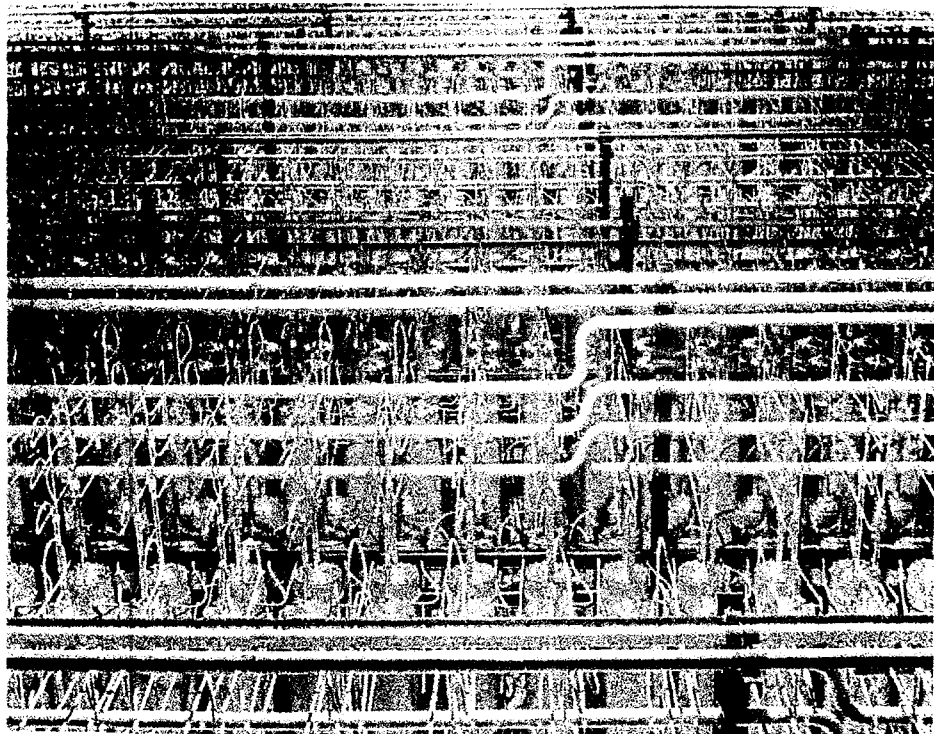


FIGURA 7 - Cascatas de ultracentrífugas instaladas em Almelo, Holanda

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo a apresentação da modelagem matemática necessária ao planejamento, à concepção, ao projeto e ao acompanhamento da operação de cascatas de separação isotópica de urânio utilizando o processo de ultracentrifugação gasosa.

Constitui-se na descrição de modelos matemáticos desenvolvidos para simular o comportamento de cascatas de ultracentrífugas destinadas ao enriquecimento de urânio no isótopo ^{235}U operando em condições estacionárias e durante transientes. Serão apresentados quatro tipos distintos de modelos, capazes de fornecer informações necessárias em diferentes etapas do projeto de uma instalação de enriquecimento isotópico de urânio por ultracentrifugação:

- modelos teóricos para a simulação da condição nominal de operação de uma cascata em estado estacionário;
- modelos semi-empíricos para a simulação da condição nominal de operação de uma cascata em estado estacionário;
- modelos semi-empíricos para a simulação da operação de uma cascata fora da condição nominal;
- modelos para a simulação da operação de uma cascata durante transientes provocados externa ou internamente.

A validação dos modelos semi-empíricos para a simulação da operação em estado estacionário e dos modelos para a simulação da operação durante transientes será feita, para os modelos utilizados na prática, comparando-se os valores calculados com valores experimentais equivalentes. A verificação dos modelos teóricos para a simulação da operação em estado estacionário e dos modelos para a simulação da operação durante transientes, com a correspondente avaliação das hipóteses utilizadas e ajustes necessários, será feita comparando-se os valores calculados com os correspondentes obtidos utilizando-se os modelos semi-empíricos propostos.

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição dos modelos matemáticos desenvolvidos

Por razões econômicas, como foi exposto anteriormente, o cálculo de uma cascata de ultracentrífugas, a ser construída para realizar uma dada tarefa de separação, é feito utilizando-se, dentro do possível, a teoria desenvolvida para a cascata ideal.

Desta forma, conhecido o ponto ótimo de operação das ultracentrífugas a serem utilizadas, caracterizado pela vazão de alimentação G_{ot} , pelo corte θ_{ot} e pelo fator de enriquecimento β_{ot} , pode-se calcular, aplicando-se as equações (31) e (32), o número de estágios necessário nas seções de enriquecimento ($n-n_s$) e recuperação (n_s), respectivamente, por:

$$n - n_s = \frac{\ln(R_p / R_f)}{\ln(\beta_{ot})} \quad (43)$$

e

$$n_s = \frac{\ln(R_f / R_w)}{\ln(\beta_{ot})} - 1 \quad (44)$$

sendo os resultados obtidos arredondados para o valor inteiro mais próximo.

O número de ultracentrífugas em cada estágio pode ser calculado através da razão entre a vazão de alimentação do estágio, calculada utilizando as equações (34) e (35) ou (39) e (40), desenvolvidas para a cascata ideal, e a vazão de alimentação ótima de uma ultracentrífuga. Utilizando-se a aproximação correspondente ao caso de baixas concentrações (caso diluído), obtemos²²:

$$n_i = \frac{n_t}{\beta_{ot} - 1} * \frac{\beta_{ot}^{(n-n_s)} - \beta_{ot}^{[i-(n_s+1)]}}{\beta_{ot}^{[i-(n_s+1)]}} \quad i=n_s+1, \dots, n \quad (45)$$

$$n_i = n_t * \frac{\beta_{ot}^{(n-n_s)} - 1}{\beta_{ot} - 1} * \frac{\beta_{ot}^{(n_s+1)} - \beta_{ot}^{(n_s+1-i)}}{\beta_{ot}^{(n_s+1)} - 1} \quad i=1, \dots, n_s \quad (46)$$

onde n_t é o número de ultracentrífugas a ser utilizado no estágio do topo da cascata, sendo os resultados aproximados para o valor inteiro mais próximo ou mais conveniente, de acordo com as restrições do arranjo físico a ser utilizado para a cascata. Alguns autores²³ utilizam a formulação da cascata ideal sem a aproximação referente ao caso diluído. Porém, como trata-se de um cálculo sujeito a aproximações de ordem superior à causada pela não utilização das equações completas, será adotada a formulação simplificada.

Definido o número de ultracentrífugas por estágio, torna-se necessário o cálculo das vazões e composições das correntes de alimentação, produto e rejeito de cada um dos estágios. As séries de equações a serem utilizadas para tal são:

- balanço de material para o elemento U aplicado aos pontos de confluência de correntes da cascata:

$$\begin{aligned} F_1 - W_2 &= 0 \\ - P_{i-1} + F_i - W_{i+1} - \delta_i F_c &= 0, \quad i=2, \dots, n-1 \\ - P_{n-1} + F_n &= 0 \end{aligned} \quad (47)$$

onde δ_i é a "função delta de Kronecker", ou seja:

$$\delta_i = 1 \text{ se } i = n_s + 1 \text{ (estágio da alimentação da cascata)}$$

$$\delta_i = 0 \text{ se } i \neq n_s + 1$$

e F_c é a vazão de alimentação da cascata;

- balanço de material para o elemento U aplicado aos estágios da cascata:

$$F_i = P_i + W_i \quad i=1, \dots, n \quad (48)$$

- definição de corte aplicada aos estágios da cascata:

$$\theta_i = P_i / F_i \quad i=1, \dots, n \quad (49)$$

- balanço de material para o isótopo ^{235}U aplicado aos pontos de confluência de correntes da cascata:

$$\begin{aligned} F_1 z_1 - W_2 x_2 &= 0 \\ - P_{i-1} y_{i-1} + F_i z_i - W_{i+1} x_{i+1} - \delta_i F_c z_f &= 0 \quad i=2, \dots, n-1 \\ - P_{n-1} y_{n-1} + F_n z_n &= 0 \end{aligned} \quad (50)$$

onde: y_i = fração mássica do ^{235}U na corrente de produto do estágio i ;
 z_i = fração mássica do ^{235}U na corrente de alimentação do estágio i ;
 x_i = fração mássica do ^{235}U na corrente de rejeito do estágio i ;
 z_f = fração mássica do ^{235}U na corrente de alimentação da cascata;

- balanço de material para o isótopo ^{235}U aplicado aos estágios da cascata:

$$F_i z_i = P_i y_i + W_i x_i \quad i=1, \dots, n \quad (51)$$

- definição de fator de enriquecimento aplicada aos estágios da cascata:

$$\beta_i = R_{pi} / R_{fi}, \text{ ou } y_i = \frac{\beta_i z_i}{1 + z_i(\beta_i - 1)} \quad i=1, \dots, n \quad (52)$$

- definição de fator de empobrecimento aplicada aos estágios da cascata:

$$\gamma_i = R_{fi} / R_{wi}, \text{ ou } x_i = \frac{z_i}{\gamma_i - z_i(\gamma_i - 1)} \quad i=1, \dots, n \quad (53)$$

As equações (47) a (53) constituem um sistema de $(7n)$ equações a $(9n+2)$ incógnitas.

Como o valor de z_f é conhecido e como, ao calcularmos uma cascata, normalmente conhecemos a vazão de produto ou de alimentação desejada, na verdade, trata-se de um sistema de $7n$ equações a $9n$ incógnitas. Caso não tenha sido estabelecido o valor da vazão de alimentação ou de produto da cascata, pode-se impor a condição de que as ultracentrífugas do estágio da alimentação operem com a vazão de alimentação ótima (G_{ot}). Esta é uma condição bastante razoável, uma vez que, de acordo com o perfil da cascata ideal, o estágio da alimentação é sempre o que contém o maior número de ultracentrífugas em toda a cascata.

A fim de converter o conjunto de equações descrito em um sistema com solução única, devemos recorrer a $2n$ equações adicionais ou restrições ao comportamento dos estágios da cascata, o que resulta nos modelos descritos a seguir.

Calculadas as vazões e composições das correntes interestágios, pode-se completar o cálculo dos parâmetros separativos internos da cascata considerada obtendo-se, para cada estágio, o poder de separação de cada ultracentrífuga utilizando a equação (16). A capacidade separativa da cascata poderá, então, ser calculada pela somatória do poder de separação de todas as ultracentrífugas que a compõem:

$$\Delta U = \sum_{i=1}^n n_i \delta U_i \quad (54)$$

e sua eficiência poderá ser calculada utilizando a equação (42).

3.1.1 Modelos teóricos para a simulação da condição nominal de operação de uma cascata de ultracentrífugas

Entende-se por condição nominal de operação de uma cascata de ultracentrífugas aquela utilizada em seu dimensionamento, ou seja, aquela que atende aos requisitos definidos na tarefa de separação estabelecida para ser realizada por ela.

Há casos em que é desejável o cálculo aproximado dos parâmetros operacionais de uma cascata, sem que seja necessário conhecer com exatidão o escoamento interno das correntes interestágios ou o comportamento separativo da ultracentrífuga a ser utilizada em sua montagem. É o que ocorre no planejamento de empreendimentos futuros, ou mesmo na fase inicial de concepção de uma cascata.

Nesses casos, é conveniente a utilização de um modelo teórico que represente, da melhor forma possível, o desempenho a ser obtido durante a operação de uma cascata.

As características que uma cascata de ultracentrífugas apresentaria se fosse ideal e que podem ser utilizadas como aproximações ou restrições à operação dos estágios para compor as $2n$ equações adicionais necessárias à resolução do sistema de equações (47) a (53) descrito anteriormente são a

operação de todas as ultracentrífugas em seu ponto ótimo, de máximo poder de separação, e a condição de não haver mistura de correntes com composições isotópicas diferentes nos pontos de confluência internos à cascata. Essas duas características geram as seguintes aproximações ou restrições:

- operação de todas as ultracentrífugas com a mesma vazão de alimentação;
- operação de todos os estágios com o mesmo corte;
- operação de todos os estágios com o corte simétrico;
- operação de todos os estágios com o mesmo fator de separação;
- operação de todas as ultracentrífugas com a mesma eficiência;
- operação de todas as ultracentrífugas com os mesmos valores para os parâmetros C_1 e C_5 , definidos pelas equações (27) e (28);
- operação dos estágios de modo a não haver mistura de correntes com composições isotópicas diferentes entre si.

No entanto, a não ocorrência de mistura de correntes com composições isotópicas diferentes nos pontos de confluência internos às cascatas está vinculada à operação de todos os estágios com o mesmo fator de separação e em processo de separação simétrico e só pode ser obtida nessas condições. Desta forma, essa condição não poderá ser imposta dentro dos modelos matemáticos propostos, sendo obtida como consequência apenas nos casos em que forem combinadas as restrições de fator de separação constante e corte simétrico em todos os estágios, como poderá ser confirmado na análise dos resultados a ser apresentada oportunamente.

A combinação das restrições ou aproximações restantes duas a duas, eliminando-se as opções mutuamente exclusivas, gera os modelos descritos a seguir. São consideradas mutuamente exclusivas as restrições à vazão de alimentação e ao corte, uma vez que, se forem adotadas simultaneamente, obrigam todas as ultracentrífugas da cascata a operarem exatamente no mesmo ponto, o que só seria possível se a cascata fosse ideal, ou seja, se não houvessem aproximações no número de ultracentrífugas por estágio. Pela mesma razão, são consideradas mutuamente exclusivas as restrições à vazão de alimentação e à eficiência das ultracentrífugas, uma vez que, para uma dada

vazão de alimentação, a curva do poder de separação em função do corte apresenta um ponto de máximo, que corresponde ao corte simétrico^{17,24}.

3.1.1.1 Cascata com corte e fator de separação constantes

Essas duas restrições foram utilizadas por vários autores^{25, 26, 27, 28, 29, 30}, correspondendo à imposição de que todos os estágios da cascata operem com o mesmo corte θ_{ot} e com o mesmo fator de separação α_{ot} . Sua utilização corresponde à incorporação das seguintes equações:

$$\begin{aligned} \theta_i &= \theta_{ot} & i=1, \dots, n \\ e \\ \alpha_i &= \alpha_{ot} & i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (55)$$

ao sistema de equações (47) a (53), convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

3.1.1.2 Cascata com corte e parâmetros C_1 e C_5 constantes

Esse modelo corresponde à imposição de que todos os estágios da cascata trabalhem com o mesmo corte θ_{ot} , aliada à utilização de uma das relações teóricas definidas pelas equações (17) e (18) para o cálculo dos fatores de enriquecimento ou empobrecimento dos estágios da cascata, admitindo-se que os parâmetros C_1 e C_5 , calculados utilizando as equações (27), (28) e (30) com a otimização das eficiências feita como descrito no tópico 1.5.2, sejam constantes para todas as ultracentrífugas da cascata.

A utilização dessa restrição de corte associada a essa aproximação para o cálculo dos fatores de enriquecimento ou empobrecimento corresponde à incorporação das seguintes equações:

$$\begin{aligned} \theta_i &= \theta_{ot} & i=1, \dots, n \\ e \\ \beta_i &= \frac{C_1 + \theta_i G_i}{\theta_i G_i + C_1 \exp[-(C_1 + \theta_i G_i) z_e / C_5]} & i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (56)$$

ou

$$\gamma_i = \frac{C_1 \exp\{[C_1 - (1 - \theta_i) G_i] z_s / C_5\} - (1 - \theta_i) G_i}{C_1 - (1 - \theta_i) G_i} \quad i=1, \dots, n$$

ao sistema de equações (47) a (53), convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

3.1.1.3 Cascata com corte e eficiência constantes

Esse modelo corresponde à imposição de que todos os estágios da cascata operam com o mesmo corte θ_{ot} e que todas as ultracentrífugas da cascata apresentam a mesma eficiência, ou seja, operam com o mesmo poder de separação δU_{ot} , calculado pela equação (16).

A utilização dessas duas restrições ao comportamento dos estágios corresponde à incorporação das seguintes equações:

$$\theta_i = \theta_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

e (57)

$$\left[\theta_i \frac{R_{pi} - 1}{R_{pi} + 1} \ln(R_{pi}) + (1 - \theta_i) \frac{R_{wi} - 1}{R_{wi} + 1} \ln(R_{wi}) - \frac{R_{fi} - 1}{R_{fi} + 1} \ln(R_{fi}) \right] * G_i * \frac{238}{352} = \delta U_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

ao sistema de equações (47) a (53), convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

3.1.1.4 Cascata com corte simétrico e fator de separação constante

Esse modelo corresponde à imposição de que todos os estágios da cascata operam com o corte correspondente ao processo de separação simétrico ($\beta = \gamma$) e com o mesmo fator de separação α_{ot} .

A utilização dessas duas restrições ao comportamento dos estágios corresponde à incorporação das seguintes equações:

$$\beta_i = \gamma_i \quad i=1, \dots, n$$

e (58)

$$\alpha_i = \alpha_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

ao sistema de equações (47) a (53), convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

3.1.1.5 Cascata com corte simétrico e parâmetros C_1 e C_5 constantes

Esse modelo corresponde à imposição de que todos os estágios da cascata trabalham com o corte correspondente ao processo de separação simétrico ($\beta = \gamma$), aliada à utilização de uma das relações teóricas definidas pelas equações (17) e (18) para o cálculo dos fatores de enriquecimento ou empobrecimento dos estágios da cascata, admitindo-se que os parâmetros C_1 e C_5 , calculados utilizando as equações (27), (28) e (30) com a otimização das eficiências feita como descrito no tópico 1.5.2, sejam constantes para todas as ultracentrífugas da cascata.

A utilização dessa restrição de corte associada a essa aproximação para o cálculo dos fatores de enriquecimento ou empobrecimento corresponde à incorporação das seguintes equações:

$$\beta_i = \gamma_i \quad i=1, \dots, n$$

e

$$(59)$$

$$\beta_i = \frac{C_1 + \theta_i G_i}{\theta_i G_i + C_1 \exp[-(C_1 + \theta_i G_i) z_e / C_5]} \quad i=1, \dots, n$$

ou

$$\gamma_i = \frac{C_1 \exp\{[C_1 - (1 - \theta_i) G_i] z_s / C_5\} - (1 - \theta_i) G_i}{C_1 - (1 - \theta_i) G_i} \quad i=1, \dots, n$$

ao sistema de equações (47) a (53), convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

3.1.1.6 Cascata com corte simétrico e eficiência constante

Esse modelo corresponde à imposição de que todos os estágios da cascata operam com o corte correspondente ao processo de separação simétrico ($\beta = \gamma$) e que todas as ultracentrífugas da cascata apresentam a mesma eficiência, ou, seja, operam com o mesmo poder de separação δU_{ot} , calculado pela equação (16).

A utilização dessas duas restrições ao comportamento dos estágios corresponde à incorporação das seguintes equações:

$$\beta_i = \gamma_i \quad i=1, \dots, n$$

$$e \quad (60)$$

$$\left[\theta_i \frac{R_{pi} - 1}{R_{pi} + 1} \ln(R_{pi}) + (1 - \theta_i) \frac{R_{wi} - 1}{R_{wi} + 1} \ln(R_{wi}) - \frac{R_{fi} - 1}{R_{fi} + 1} \ln(R_{fi}) \right] * G_i * \frac{238}{352} = \delta U_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

ao sistema de equações (47) a (53), convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

3.1.1.7 Cascata com vazão de alimentação e fator de separação constantes

Esse modelo corresponde à imposição de que todas as ultracentrífugas da cascata operam com a mesma vazão de alimentação G_{ot} e com o mesmo fator de separação α_{ot} .

A utilização dessas duas restrições ao comportamento dos estágios corresponde à incorporação das seguintes equações:

$$G_i = G_{ot} \quad \text{ou} \quad F_i = n_i G_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

$$e \quad (61)$$

$$\alpha_i = \alpha_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

ao sistema de equações (47) a (53), convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

3.1.1.8 Cascata com vazão de alimentação e parâmetros C_1 e C_5 constantes

Esse modelo corresponde à imposição de que todas as ultracentrífugas da cascata trabalham com a mesma vazão de alimentação G_{ot} , aliada à utilização de uma das relações teóricas definidas pelas equações (17) e (18) para o cálculo dos fatores de enriquecimento ou empobrecimento dos estágios da cascata, admitindo-se que os parâmetros C_1 e C_5 , calculados utilizando as equações (27), (28) e (30) com a otimização das eficiências feita como descrito no tópico 1.5.2, sejam constantes para todas as ultracentrífugas da cascata.

A utilização dessa restrição de vazão de alimentação associada a essa aproximação para o cálculo dos fatores de enriquecimento ou empobrecimento corresponde à incorporação das seguintes equações:

$$G_i = G_{ot} \quad \text{ou} \quad F_i = n_i G_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

e (62)

$$\beta_i = \frac{C_1 + \theta_i G_{ot}}{\theta_i G_{ot} + C_1 \exp[-(C_1 + \theta_i G_{ot})z_e / C_5]} \quad i=1, \dots, n$$

ou

$$\gamma_i = \frac{C_1 \exp\{[C_1 - (1 - \theta_i)G_{ot}]z_s / C_5\} - (1 - \theta_i)G_{ot}}{C_1 - (1 - \theta_i)G_{ot}} \quad i=1, \dots, n$$

ao sistema de equações (47) a (53), convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

3.1.1.9 Cascata com fator de separação e parâmetros C_1 e C_5 constantes

Esse modelo corresponde à imposição de que todos os estágios da cascata trabalham com o mesmo fator de separação α_{ot} , aliada à utilização de uma das relações teóricas definidas pelas equações (17) e (18) para o cálculo dos fatores de enriquecimento ou empobrecimento dos estágios da cascata, admitindo-se que os parâmetros C_1 e C_5 , calculados utilizando as equações (27), (28) e (30) com a otimização das eficiências feita como descrito no tópico 1.5.2, sejam constantes para todas as ultracentrífugas da cascata.

A utilização dessa restrição para o fator de separação associada a essa aproximação para o cálculo dos fatores de enriquecimento ou empobrecimento corresponde à incorporação das seguintes equações:

$$\alpha_i = \alpha_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

e (63)

$$\beta_i = \frac{C_1 + \theta_i G_i}{\theta_i G_i + C_1 \exp[-(C_1 + \theta_i G_i)z_e / C_5]} \quad i=1, \dots, n$$

ou

$$\gamma_i = \frac{C_1 \exp\{[C_1 - (1 - \theta_i)G_i]z_s / C_5\} - (1 - \theta_i)G_i}{C_1 - (1 - \theta_i)G_i} \quad i=1, \dots, n$$

ao sistema de equações (47) a (53), convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

3.1.1.10 Cascata com fator de separação e eficiência constantes

Esse modelo corresponde à imposição de que todos os estágios da cascata operam com o mesmo fator de separação α_{ot} e que todas as ultracentrífugas da cascata apresentam a mesma eficiência, ou, seja, operam com o mesmo poder de separação δU_{ot} , calculado pela equação (16).

A utilização dessas duas restrições ao comportamento dos estágios corresponde à incorporação das seguintes equações:

$$\alpha_i = \alpha_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

e (64)

$$\left[\theta_i \frac{R_{pi} - 1}{R_{pi} + 1} \ln(R_{pi}) + (1 - \theta_i) \frac{R_{wi} - 1}{R_{wi} + 1} \ln(R_{wi}) - \frac{R_{fi} - 1}{R_{fi} + 1} \ln(R_{fi}) \right] * G_i * \frac{238}{352} = \delta U_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

ao sistema de equações (47) a (53), convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

3.1.1.11 Cascata com eficiência e parâmetros C_1 e C_5 constantes

Esse modelo corresponde à imposição de que todas as ultracentrífugas da cascata apresentam a mesma eficiência, ou seja, operam com o mesmo poder de separação δU_{ot} , aliada à utilização de uma das relações teóricas definidas pelas equações (17) e (18) para o cálculo dos fatores de enriquecimento ou empobrecimento dos estágios da cascata, admitindo-se que os parâmetros C_1 e C_5 , calculados utilizando as equações (27), (28) e (30) com a otimização das eficiências feita como descrito no tópico 1.5.2, sejam constantes para todas as ultracentrífugas da cascata.

A utilização dessa restrição para o poder de separação associada a essa aproximação para o cálculo dos fatores de enriquecimento ou empobrecimento corresponde à incorporação das seguintes equações:

$$\left[\theta_i \frac{R_{pi} - 1}{R_{pi} + 1} \ln(R_{pi}) + (1 - \theta_i) \frac{R_{wi} - 1}{R_{wi} + 1} \ln(R_{wi}) - \frac{R_{fi} - 1}{R_{fi} + 1} \ln(R_{fi}) \right] * G_i * \frac{238}{352} = \delta U_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

e (65)

$$\beta_i = \frac{C_1 + \theta_i G_i}{\theta_i G_i + C_1 \exp[-(C_1 + \theta_i G_i) z_e / C_5]} \quad i=1, \dots, n$$

ou

$$\gamma_i = \frac{C_1 \exp\{[C_1 - (1 - \theta_i)G_i]z_s / C_5\} - (1 - \theta_i)G_i}{C_1 - (1 - \theta_i)G_i} \quad i=1, \dots, n$$

ao sistema de equações (47) a (53), convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

3.1.1.12 Cascata com parâmetros C_1 e C_5 constantes, considerando válidas as equações teóricas para o cálculo de β e γ

Esse modelo corresponde à utilização das duas relações teóricas definidas pelas equações (17) e (18) para o cálculo dos fatores de enriquecimento e empobrecimento dos estágios da cascata, admitindo-se que os parâmetros C_1 e C_5 , calculados utilizando as equações (27), (28) e (30) com a otimização das eficiências feita como descrito no tópico 1.5.2, sejam constantes para todas as ultracentrífugas da cascata.

A utilização dessa aproximação para o cálculo dos fatores de enriquecimento e empobrecimento, sem que seja imposta qualquer restrição ao comportamento dos estágios corresponde à incorporação das seguintes equações:

$$\beta_i = \frac{C_1 + \theta_i G_i}{\theta_i G_i + C_1 \exp[-(C_1 + \theta_i G_i)z_e / C_5]} \quad i=1, \dots, n$$

e

(66)

$$\gamma_i = \frac{C_1 \exp\{[C_1 - (1 - \theta_i)G_i]z_s / C_5\} - (1 - \theta_i)G_i}{C_1 - (1 - \theta_i)G_i} \quad i=1, \dots, n$$

ao sistema de equações (47) a (53), convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

A resolução de todos esses sistemas de equações não lineares apresentados permite o cálculo de todas as variáveis operacionais dos estágios da cascata, com exceção das pressões.

3.1.2 Modelos semi-empíricos para a simulação da condição nominal de operação de uma cascata de ultracentrífugas

Uma vez que o escoamento do gás entre os estágios de uma cascata é proporcionado pela diferença de pressão entre os pontos de retirada de material e o ponto de alimentação das ultracentrífugas, como foi mencionado no tópico 1.5.5, torna-se imprescindível, para o dimensionamento completo de uma cascata de ultracentrífugas e a determinação precisa de sua condição nominal de operação, a inclusão das pressões das correntes de alimentação, produto e rejeito de cada estágio entre os parâmetros operacionais a serem determinados. A manutenção dessas pressões nos valores especificados em projeto durante a operação da cascata garantirá a execução da tarefa de separação prevista para cada uma das ultracentrífugas instaladas³¹.

Para que seja possível estabelecer os valores de pressão que as correntes de alimentação, produto e rejeito de cada estágio de uma dada cascata, operando com uma dada vazão de alimentação, deverão apresentar, torna-se necessário o desenvolvimento de modelos matemáticos que levem em conta o comportamento separativo real das ultracentrífugas que a constituirão em função das pressões de suas correntes de alimentação, produto e rejeito. A realização de ensaios individuais com ultracentrífugas nos mostram que a pressão da corrente de alimentação (p_f) é função apenas da vazão de alimentação utilizada, enquanto que as pressões das correntes de produto (p_p) e rejeito (p_w) dependem também do corte com o qual elas operam¹⁷.

O estabelecimento do comportamento separativo das ultracentrífugas em função das pressões de suas correntes de alimentação, produto e rejeito consiste na determinação das relações entre seus fatores de enriquecimento e empobrecimento e os parâmetros que determinam seu ponto de operação, ou seja, a vazão de alimentação, a pressão da corrente de produto ou de rejeito, cuja escolha é indiferente, e o corte. Como resultado complementar, obtém-se, desses ensaios, a relação entre a pressão da corrente de rejeito ou de produto e esses mesmos três parâmetros operacionais.

A inclusão das pressões de operação nas tubulações interestágios (p_{fi} , p_{pi} e p_{wi}) entre as variáveis a serem determinadas eleva o número de incógnitas do sistema constituído pelas equações (47) a (53) para $12n$.

A aplicação da relação experimental entre a pressão da corrente de alimentação e a vazão de alimentação das ultracentrífugas a todos os estágios da cascata:

$$p_{fi} = f(G_i) \quad i=1, \dots, n \quad (67)$$

eleva o número de equações disponíveis a $8n$.

A aplicação das relações experimentais entre os fatores de enriquecimento e empobrecimento, a vazão de alimentação, a pressão da corrente de produto ou de rejeito e o corte das ultracentrífugas e a relação experimental entre a pressão da corrente de rejeito ou produto das ultracentrífugas e esses mesmos três parâmetros operacionais a todos os estágios da cascata:

$$\beta_i = f(G_i, p_{pi}, \theta_i) \quad \text{ou} \quad \beta_i = f(G_i, p_{wi}, \theta_i) \quad i=1, \dots, n \quad (68)$$

$$\gamma_i = f(G_i, p_{pi}, \theta_i) \quad \text{ou} \quad \gamma_i = f(G_i, p_{wi}, \theta_i) \quad i=1, \dots, n \quad (69)$$

$$p_{wi} = f(G_i, p_{pi}, \theta_i) \quad \text{ou} \quad p_{pi} = f(G_i, p_{wi}, \theta_i) \quad i=1, \dots, n \quad (70)$$

eleva o número de equações disponíveis a $11n$. No entanto, no conjunto dos dados experimentais utilizados para o estabelecimento dessas três relações, está implícita a utilização da equação de balanço de material para o isótopo desejado, uma vez que todos os pontos experimentais obedecem à equação (8). Logo, a série de equações (51) não pode ser utilizada, o que reduz o número de equações disponíveis a $10n$.

Observando o esquema de mistura de correntes interno às cascatas mostrado na FIG.3 e o esquema do arranjo físico das tubulações correspondentes mostrado na FIG.6, verifica-se que as correntes que se misturam para compor a alimentação das ultracentrífugas de um dado estágio apresentarão sempre a mesma pressão.

O ajuste das condições de operação das ultracentrífugas de cada estágio, de modo a tornar possível essa igualdade de pressões sem comprometer a realização da tarefa de separação proposta, é feito, quando necessário, através da introdução de restrições físicas ativas (válvulas de controle de fluxo) ou

passivas (placas de orifício) nas tubulações de coleta de produto e/ou de rejeito dos estágios.

A determinação da necessidade de introdução de tais restrições físicas é baseada nos resultados obtidos nos ensaios individuais com ultracentrífugas para a determinação de seu ponto ótimo de operação. Uma análise dos casos possíveis nos leva à elaboração dos modelos semi-empíricos descritos a seguir.

3.1.2.1 Cascata sem restrições físicas nas tubulações interestágios

No caso de ultracentrífugas que apresentam, nas proximidades de seu ponto ótimo de operação, pressões iguais para as correntes de alimentação, produto e rejeito, é viável a aplicação da condição de igualdade de pressões aos pontos de confluência de correntes da cascata sem que haja necessidade de instalação de restrições físicas nas tubulações interestágios, gerando as equações:

$$p_{p,i-1} = p_{f,i} \quad i=2,\dots,n \quad (71)$$

e

$$p_{w,i+1} = p_{f,i} \quad i=1,\dots,n-1 \quad (72)$$

que elevam o número de equações disponíveis a $12n-2$. Impondo-se as seguintes restrições ao comportamento do último e do primeiro estágio da cascata, respectivamente:

$$p_{p,n} = p_{f,n} \quad (73)$$

e

$$p_{w,1} = p_{f,1} \quad (74)$$

torna-se possível converter o conjunto de equações disponível em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única. Na prática, o ajuste dessas pressões impostas para esses dois estágios é efetuado através da utilização de válvulas de controle de fluxo.

3.1.2.2 Cascata com restrições físicas nas tubulações interestágios de produto ou de rejeito

No caso de ultracentrífugas que apresentam, nas proximidades de seu ponto ótimo de operação, pressões iguais para as correntes de alimentação e

produto ou rejeito e pressão superior para a corrente de rejeito ou produto, torna-se necessária a instalação de restrições físicas nas tubulações de rejeito ou de produto dos estágios, a fim de possibilitar a equalização de pressões nos pontos de confluência de correntes da cascata. Nesse caso, apenas uma das séries de equações (71) e (73) ou (72) e (74) pode ser utilizada, passando-se, então, a dispor de um sistema de $11n$ equações.

Introduz-se, porém, no sistema de equações em estudo, mais uma série de n incógnitas a serem determinadas, que correspondem à área das restrições físicas (A_{pi} ou A_{wi}) a serem instaladas na tubulação interestágios correspondente para cada estágio da cascata, a fim de tornar possível a equalização de pressões necessária.

Considerando-se um sistema constituído por um gás, à temperatura T , presente em uma tubulação, escoando através de um orifício de área A de uma região à pressão p_1 para uma outra região à pressão p_2 . De acordo com a teoria desenvolvida para descrever o escoamento de gases a baixas pressões através de orifícios em regime viscoso³², a vazão do gás aumenta com a queda da razão de pressões $r = p_2/p_1$ até que a velocidade linear do gás no orifício atinja a velocidade do som no gás considerado. Abaixo dessa razão de pressões, denominada razão de pressões crítica, a vazão do gás passa a ser função apenas de sua pressão e temperatura a montante do orifício (p_1, T).

A razão de pressões crítica pode ser calculada por:

$$r_c = \left(\frac{2}{\nu + 1} \right)^{\nu/(\nu-1)} \quad (75)$$

sendo ν a razão entre os calores específicos do gás a pressão constante e a volume constante (C_p/C_v) na temperatura T .

A relação entre a vazão volumétrica do gás (Q), a temperatura (T) e a razão de pressões (r) é dada por:³³

$$Q = AC_o \sqrt{\frac{\nu RT}{M} \left(\frac{2}{\nu-1} \right) \left(r^{2/\nu} - r^{(\nu+1)/\nu} \right)} \quad (76)$$

onde $r = p_2/p_1$ em condições de escoamento subsônicas, ou seja, para $r > r_c$, e $r = r_c$ em condições de escoamento sônicas, ou seja, para $r \leq r_c$, M é a massa

molecular do gás de processo, R é a constante universal dos gases e C_o é um coeficiente de ajuste que depende da forma do orifício e da pressão do gás.

Considerando-se que, nas baixas pressões de operação características do processo de ultracentrifugação, o gás de processo se comporta como um gás ideal, a relação entre sua vazão volumétrica e sua vazão mássica (Q_m) pode ser obtida utilizando-se a lei dos gases perfeitos:

$$p_1 Q = \frac{Q_m RT}{M} \quad (77)$$

Substituindo-se, na equação (76), a variável Q pela relação correspondente à equação (77) e isolando-se a área do orifício A , obtém-se:

$$A = \frac{Q_m}{p_1 C_o \sqrt{\frac{\nu M}{RT} \left(\frac{2}{\nu-1} \right) \left(r^{2/\nu} - r^{(\nu+1)/\nu} \right)}} \quad (78)$$

Aplicando-se a equação (78) às restrições físicas instaladas em todos os estágios da cascata, obtém-se:

$$A_{wi} = \frac{W_i}{p_{wi} C_o \sqrt{\frac{\nu M}{RT} \left(\frac{2}{\nu-1} \right) \left(r^{2/\nu} - r^{(\nu+1)/\nu} \right)}} \quad i=1, \dots, n \quad (79)$$

ou

$$A_{pi} = \frac{P_i}{p_{pi} C_o \sqrt{\frac{\nu M}{RT} \left(\frac{2}{\nu-1} \right) \left(r^{2/\nu} - r^{(\nu+1)/\nu} \right)}} \quad i=1, \dots, n \quad (80)$$

de acordo com a pressão que necessita de redução para a equalização, o que leva a um sistema de $12n$ equações algébricas não lineares a $13n$ incógnitas, ou seja, um sistema indeterminado.

Dentre as restrições à operação dos estágios da cascata derivadas das características de uma cascata ideal utilizadas no tópico 3.1.1, podem ser aplicadas, na prática, a fim de compor a série de n equações adicionais necessárias à resolução do sistema de equações disponível:

- a operação de todas as ultracentrífugas com a mesma vazão de alimentação;
- a operação de todos os estágios com o mesmo corte;
- a operação de todos os estágios com corte simétrico;
- a operação de todos os estágios com o mesmo fator de separação;
- a operação de todas as ultracentrífugas com a mesma eficiência.

A inclusão de cada uma dessas restrições entre as equações disponíveis gera os modelos descritos a seguir.

3.1.2.2.1 Cascata com vazão de alimentação constante

Esse modelo corresponde à imposição de que todas as ultracentrífugas da cascata operam com a vazão de alimentação ótima G_{ot} , ou seja, à incorporação da restrição:

$$G_i = G_{ot} \quad i=1,\dots,n \quad (81)$$

ao sistema de equações disponível, fazendo com que ele apresente uma única solução.

3.1.2.2.2 Cascata com corte constante

Esse modelo corresponde à imposição de que todos os estágios da cascata operam com o corte correspondente ao ponto ótimo de operação das ultracentrífugas θ_{ot} , ou seja, à incorporação da restrição:

$$\theta_i = \theta_{ot} \quad i=1,\dots,n \quad (82)$$

ao sistema de equações disponível, fazendo com que ele apresente uma única solução.

3.1.2.2.3 Cascata com corte simétrico

Esse modelo corresponde à imposição de que todas as ultracentrífugas da cascata operam em processo de separação simétrico, ou seja, à incorporação da restrição:

$$\beta_i = \gamma_i \quad i=1,\dots,n \quad (83)$$

ao sistema de equações disponível, fazendo com que ele apresente uma única solução.

3.1.2.2.4 Cascata com fator de separação constante

Esse modelo corresponde à imposição de que todos os estágios da cascata operam com o fator de separação correspondente ao obtido no ponto ótimo de operação das ultracentrífugas α_{ot} , ou seja, à incorporação da restrição:

$$\alpha_i = \alpha_{ot} \quad i=1,\dots,n \quad (84)$$

ao sistema de equações disponível, fazendo com que ele apresente uma única solução.

3.1.2.2.5 Cascata com eficiência constante

Esse modelo corresponde à imposição de que todas as ultracentrífugas da cascata operam com o poder de separação correspondente ao ponto ótimo de operação δU_{ot} , ou seja, à incorporação da restrição:

$$\delta U_i = \delta U_{ot} \quad i=1,\dots,n \quad (85)$$

ao sistema de equações disponível, fazendo com que ele apresente uma única solução.

Em todos os casos analisados, o ajuste das pressões das correntes de produto (p_{pn}) e de rejeito (p_{w1}) da cascata nos valores estabelecidos é feito, na prática, utilizando-se válvulas de controle de fluxo.

3.1.2.3 Cascata com restrições físicas nas tubulações interestágios de produto e rejeito

No caso de ultracentrífugas que apresentam, nas proximidades de seu ponto ótimo de operação, pressões da corrente de alimentação inferiores às das correntes de produto e rejeito, torna-se necessária a utilização de restrições físicas tanto na tubulação de produto como na tubulação de rejeito dos estágios da cascata, a fim de proporcionar a equalização das pressões nos pontos de

confluência de correntes. Nesse caso, nenhuma das séries de equações (71) e (73) ou (72) e (74) pode ser utilizada.

São introduzidas, então, no sistema de equações em estudo, mais duas séries de n incógnitas a serem determinadas, que correspondem à área das restrições físicas (A_{pi} e A_{wi}) a serem instaladas nas tubulações de coleta das correntes de produto e rejeito para cada estágio da cascata, a fim de tornar possível a equalização de pressões necessária. A área das restrições físicas necessárias pode ser calculada utilizando-se as séries de equações (79) e (80), o que leva a um sistema de $12n$ equações a $14n$ incógnitas.

Combinando-se as restrições à operação dos estágios utilizadas no tópico 3.1.2.2 duas a duas e eliminando-se os casos em que as restrições são mutuamente exclusivas, obtemos os modelos descritos a seguir. Aqui são consideradas mutuamente exclusivas apenas as restrições à vazão de alimentação e ao corte dos estágios, uma vez que, para uma mesma vazão de alimentação, o poder de separação pode variar com as pressões de operação¹⁷.

3.1.2.3.1 Cascata com vazão de alimentação e eficiência constantes

Esse modelo corresponde à imposição de que todas as ultracentrífugas da cascata operam com a vazão de alimentação ótima G_{ot} e com o poder de separação correspondente ao ponto ótimo de operação δU_{ot} , ou seja, à incorporação das restrições:

$$\begin{aligned}
 G_i &= G_{ot} & i=1, \dots, n \\
 e & & \\
 \delta U_i &= \delta U_{ot} & i=1, \dots, n
 \end{aligned}
 \tag{86}$$

ao sistema de equações disponível, fazendo com que ele apresente uma única solução.

3.1.2.3.2 Cascata com corte e eficiência constantes

Esse modelo corresponde à imposição de que todos os estágios da cascata operam com o corte correspondente ao ponto ótimo de operação das ultracentrífugas θ_{ot} e que todas as ultracentrífugas da cascata operam com o poder de separação correspondente ao ponto ótimo de operação δU_{ot} , ou seja, à incorporação das restrições:

$$\begin{aligned} \theta_i &= \theta_{ot} & i=1, \dots, n \\ e \\ \delta U_i &= \delta U_{ot} & i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (87)$$

ao sistema de equações disponível, fazendo com que ele apresente uma única solução.

3.1.2.3.3 Cascata com corte simétrico e eficiência constante

Esse modelo corresponde à imposição de que todas as ultracentrífugas da cascata operam em processo de separação simétrico e com o poder de separação correspondente ao ponto ótimo de operação δU_{ot} , ou seja, à incorporação das restrições:

$$\begin{aligned} \beta_i &= \gamma_i & i=1, \dots, n \\ e \\ \delta U_i &= \delta U_{ot} & i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (88)$$

ao sistema de equações disponível, fazendo com que ele apresente uma única solução.

3.1.2.3.4 Cascata com fator de separação e eficiência constantes

Esse modelo corresponde à imposição de que todos os estágios da cascata operam com o fator de separação correspondente ao ponto ótimo de operação das ultracentrífugas α_{ot} e que todas as ultracentrífugas da cascata operam com o poder de separação correspondente ao ponto ótimo de operação δU_{ot} , ou seja, à incorporação das restrições:

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \alpha_{ot} & i=1, \dots, n \\ e \\ \delta U_i &= \delta U_{ot} & i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (89)$$

ao sistema de equações disponível, fazendo com que ele apresente uma única solução.

3.1.2.3.5 Cascata com vazão de alimentação e fator de separação constantes

Esse modelo corresponde à imposição de que todas as ultracentrífugas da cascata operam com a vazão de alimentação ótima G_{ot} e de que todos os estágios da cascata operam com o fator de separação correspondente ao ponto ótimo de operação das ultracentrífugas α_{ot} , ou seja, corresponde à incorporação das seguintes restrições:

$$G_i = G_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

e

$$\alpha_i = \alpha_{ot} \quad i=1, \dots, n$$
(90)

ao sistema de equações disponível, convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

3.1.2.3.6 Cascata com corte e fator de separação constantes

Esse modelo corresponde à imposição de que todos os estágios da cascata operam com o corte θ_{ot} e o fator de separação α_{ot} correspondentes ao ponto ótimo de operação das ultracentrífugas, ou seja, corresponde à incorporação das seguintes restrições:

$$\theta_i = \theta_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

e

$$\alpha_i = \alpha_{ot} \quad i=1, \dots, n$$
(91)

ao sistema de equações disponível, convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única.

3.1.2.3.7 Cascata com corte simétrico e fator de separação constante

Esse modelo corresponde à imposição de que todas as ultracentrífugas da cascata operam em processo de separação simétrico e de que todos os estágios da cascata operam com o fator de separação correspondente ao ponto ótimo de operação das ultracentrífugas α_{ot} , ou seja, corresponde à incorporação das seguintes restrições:

$$\beta_i = \gamma_i \quad i=1, \dots, n$$

e

$$\alpha_i = \alpha_{ot} \quad i=1, \dots, n$$

(92)

ao sistema de equações disponível, convertendo-o em um sistema de equações algébricas não lineares com solução única. Neste caso, deverá sempre ser obtida uma solução em que não haja mistura de correntes com composições isotópicas diferentes nos pontos de confluência internos, uma vez que o modelo combina as duas condições necessárias e suficientes para que a condição de não mistura ocorra.

Em todos os casos analisados, o ajuste das pressões das correntes de produto (p_{pn}) e rejeito (p_{w1}) da cascata é feito, na prática, utilizando-se válvulas de controle de fluxo.

Para todos os modelos semi-empíricos apresentados, a área de escoamento equivalente à posição de abertura das válvulas de controle de fluxo, ajustada para a obtenção das pressões p_{pn} e p_{w1} , associada às vazões P_n e W_1 , pode ser calculada através da utilização das equações (80), aplicada ao estágio n , e (79), aplicada ao estágio 1.

3.1.3 Modelos semi-empíricos para a simulação da operação de uma cascata de ultracentrífugas fora da condição nominal

Uma vez determinada a condição nominal de operação de uma cascata através dos modelos semi-empíricos descritos no tópico 3.1.2 acima, essa cascata está completamente dimensionada em termos de número de estágios, número de ultracentrífugas por estágio, restrições físicas internas a serem instaladas nas tubulações interestágios e vazão de alimentação, a fim de atender à tarefa de separação para ela especificada.

Para que seja possível o domínio pleno sobre a operação dessa cascata em estado estacionário, é necessária a elaboração de modelos matemáticos capazes de simular sua operação em condições diferentes da de projeto, ou seja, com uma vazão de alimentação diferente da nominal, com um valor da razão P/F diferente do nominal, ou ainda com números de ultracentrífugas por estágio diferentes dos especificados no projeto.

No caso de uma cascata dimensionada utilizando-se o modelo descrito no tópico 3.1.2.1, ou seja, sem restrições físicas nas tubulações de coleta das correntes de produto e rejeito dos estágios, o sistema constituído pelas séries de equações (47), (48), (49), (50), (52), (53), (67), (68), (69), (70), (71) e (72), aliadas às restrições (73) e (74) continua sendo válido para o cálculo dos parâmetros operacionais da cascata, podendo ser utilizado sem alterações para a simulação da operação da mesma cascata em condições diferentes da nominal.

No caso de uma cascata dimensionada utilizando-se qualquer um dos modelos descritos no tópico 3.1.2.2, ou seja, com restrições físicas nas tubulações interestágios de produto ou de rejeito, o sistema constituído pelas séries de equações (47), (48), (49), (50), (52), (53), (67), (68), (69), (70) e (71) aliada à restrição (73) ou (72) aliada à restrição (74) continua sendo válido para o cálculo dos parâmetros operacionais da cascata. Uma vez que a área das restrições físicas presentes nas tubulações interestágios da cascata é conhecida, as séries de equações (79) ou (80) podem ser utilizadas como relações adicionais entre a vazão e a pressão da corrente de rejeito ou entre a vazão e a pressão da corrente de produto de cada estágio, convertendo o sistema de equações disponível em um sistema com solução única.

Da mesma forma, no caso de uma cascata dimensionada utilizando-se qualquer um dos modelos descritos no tópico 3.1.2.3, ou seja, com restrições físicas nas tubulações interestágios de produto e de rejeito, o sistema constituído pelas séries de equações (47), (48), (49), (50), (52), (53), (67), (68), (69), (70), (79) e (80) pode ser utilizado para o cálculo dos parâmetros operacionais da cascata, uma vez que as áreas das restrições físicas presentes nas tubulações interestágios são conhecidas.

3.1.4 Modelos para a simulação da operação de uma cascata de ultracentrífugas durante transientes

A fim de complementar o conjunto de modelos matemáticos para a simulação da operação de cascatas de separação isotópica de urânio por ultracentrifugação, resta-nos a elaboração de modelos capazes de simular o comportamento dos parâmetros operacionais de uma cascata fora das condições estacionárias, ou seja, durante transientes. Nesse caso, não é possível a utilização das relações experimentais entre os parâmetros de separação das

ultracentrífugas e seus parâmetros operacionais, uma vez que elas são válidas apenas em condições estacionárias.

Alguns autores^{34, 35, 36, 37, 38} desenvolveram as equações para a simulação do comportamento dinâmico de uma cascata quando sujeita a alterações na composição da corrente de alimentação, mantidas as vazões constantes. Essas equações, obtidas simplesmente incluindo a variável temporal, na forma de atrasos entre a geração das correntes de produto e rejeito nas ultracentrífugas e a sua mistura nos pontos de confluência de correntes interestágios, nas equações de balanço de material já apresentadas, são dependentes dos tempos de residência do gás no interior da ultracentrífuga e nas tubulações por onde escoam as correntes de produto e de rejeito dos estágios da cascata.

Olander³⁹ desenvolveu uma formulação mais abrangente, que considera o efeito dos transientes no comportamento interno da ultracentrífuga. O modelo apresentado por ele permite a análise de transientes causados por perturbações na vazão de alimentação, na frequência de rotação e na composição da corrente de alimentação das ultracentrífugas, não considerando, porém, a perturbação no corte que possa ser causada por esses transientes.

A formulação desenvolvida por Olander parte das equações dinâmicas do gradiente de concentração axial desenvolvidas por Cohen¹² para as seções de enriquecimento e de recuperação da ultracentrífuga, aliadas à equação dinâmica de balanço de material para o isótopo ²³⁵U aplicada à ultracentrífuga. As equações do gradiente de concentração são simplificadas admitindo-se a existência de um perfil de concentrações linear ao longo do eixo da ultracentrífuga, resultando:

$$\frac{1}{g} \frac{\delta x}{\delta \eta} = (1 + \lambda P)x - \lambda P x_p - \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right) \frac{\delta}{\delta \tau} \left\{ \frac{l}{l_0} \left[x_w (1 - \eta) + \frac{1}{2} (x_p - x_w) (1 - \eta^2) \right] \right\} \quad (93)$$

para a seção de enriquecimento ($\eta_f \leq \eta \leq 1$) e

$$\frac{1}{g} \frac{\delta x}{\delta \eta} = (1 - \lambda W)x + \lambda W x_w + \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right) \frac{\delta}{\delta \tau} \left\{ \frac{l}{l_0} \left[x_w \eta + \frac{1}{2} (x_p - x_w) \eta^2 \right] \right\} \quad (94)$$

para a seção de recuperação ($0 \leq \eta \leq \eta_f$).

A aplicação da equação dinâmica de balanço de material para o isótopo ^{235}U à ultracentrífuga, admitindo-se a existência de um perfil de concentrações linear ao longo de seu eixo, resulta:

$$\lambda F x_f = \lambda P x_p + \lambda W x_w + \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right) \frac{d}{d\tau} \left[\frac{l}{l_0} (x_p + x_w) \right] \quad (95)$$

Nessas três equações, F, P e W são, respectivamente, as vazões mássicas das correntes de alimentação, produto e rejeito das ultracentrífugas, x_f , x_p e x_w são, respectivamente, as frações mássicas do isótopo ^{235}U nas correntes de alimentação, produto e rejeito, os parâmetros g e λ são análogos aos parâmetros C_1 e C_5 definidos no tópico 1.5.2, η é o adimensional de posição axial ($\eta = z/(z_e + z_s)$), τ é o adimensional de tempo ($\tau = t/(\lambda_0 l_0)$), x é a fração mássica do isótopo ^{235}U na posição axial η e l é o inventário do gás de processo na ultracentrífuga.

Dependendo do mecanismo gerador da perturbação, todos os parâmetros das equações (93) a (95) podem ser dependentes do tempo. A estratégia geral de resolução proposta por Olander consiste em integrar a equação (93) entre a posição adimensional 0 e a posição adimensional correspondente ao ponto de injeção da corrente de alimentação η_f , integrar a equação (94) desse mesmo ponto à posição adimensional 1 e igualar as duas equações obtidas, resultando numa equação diferencial linear que relaciona as concentrações x_p e x_w com suas derivadas temporais. Essa equação, juntamente com a equação (95), gera um sistema de equações diferenciais de primeira ordem acopladas, que pode ser resolvido numericamente.

No estudo do comportamento dinâmico de cascatas, esse procedimento, válido para a análise de perturbações em uma ultracentrífuga, deverá ser executado em cada estágio. Acoplando-se os n sistemas de equações diferenciais assim obtidos às séries de equações dinâmicas de balanço de material para o elemento (U) e para o isótopo ^{235}U aplicadas aos trechos de tubulação interestágios e aos estágios da cascata, obtém-se um sistema de equações diferenciais de primeira ordem, que pode ser integrado numericamente.

De acordo com a presença e a localização das restrições físicas responsáveis pela equalização das pressões nas tubulações interestágios, serão obtidos os sistemas de equações diferenciais descritos a seguir.

3.1.4.1 Cascata sem restrições físicas nas tubulações interestágios

No caso de cascatas que não apresentam restrições físicas para a equalização de pressões interestágios, as equações dinâmicas de balanço de material para o elemento U podem ser aplicadas aos trechos de tubulação interestágios correspondentes ao volume de controle VC1 indicado na FIG.8, resultando:

$$\frac{dm_{fpw1}(t)}{dt} = n_2 G_2''(t) - n_1 G_1(t)$$

$$\frac{dm_{fpwi}(t)}{dt} = n_{i-1} G_{i-1}'(t) + n_{i+1} G_{i+1}''(t) - n_i G_i(t) + \delta_i F_c(t) \quad i=2, \dots, n-1 \quad (96)$$

$$\frac{dm_{fpwn}(t)}{dt} = n_{n-1} G_{n-1}'(t) - n_n G_n(t)$$

onde m_{fpwi} é a massa de gás presente no trecho de tubulação considerado, G_i , G_i' e G_i'' são, respectivamente, as vazões mássicas das correntes de alimentação, produto e rejeito de uma ultracentrífuga do estágio i .

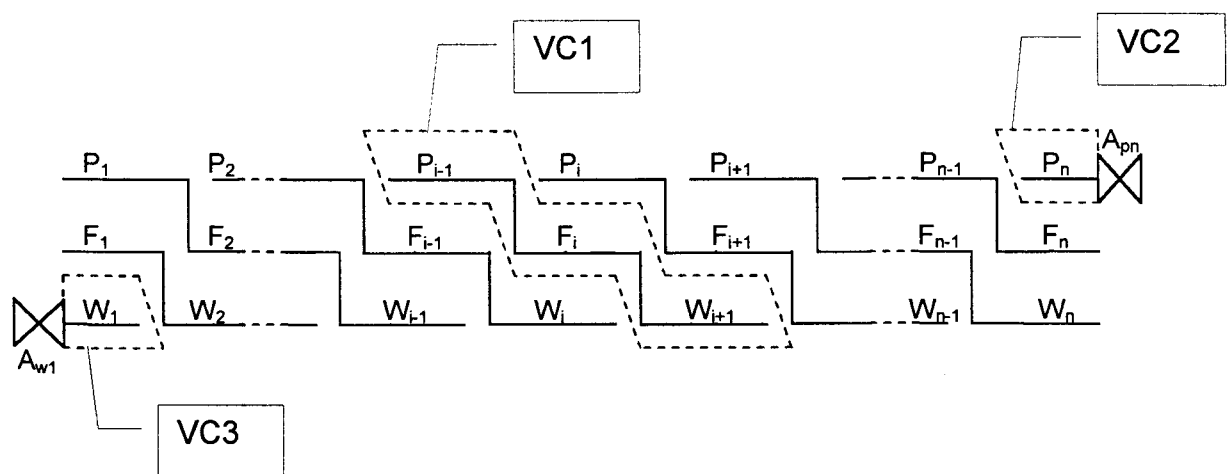


FIGURA 8 - Esquema da tubulação interestágios de uma cascata sem restrições para a equalização de pressões nos pontos de confluência de correntes

A aplicação da equação dinâmica de balanço de material para o isótopo ^{235}U aos trechos de tubulação correspondentes ao volume de controle VC1 dos estágios 2 a n-1, nos quais há mistura de correntes provenientes de ultracentrífugas pertencentes a estágios diferentes, resulta na série de equações:

$$\frac{d[m_{fpwi}(t)z_i(t)]}{dt} = n_{i-1}G'_{i-1}(t)y_{i-1}(t) + n_{i+1}G''_{i+1}(t)x_{i+1}(t) - n_i G_i(t)z_i(t) + \delta_i F_c(t)z_f(t) \quad i=2, \dots, n-1 \quad (97)$$

onde z_i , y_i e x_i são, respectivamente, as frações mássicas do isótopo ^{235}U nas correntes de alimentação, produto e rejeito do estágio i . Utilizando-se a aproximação de comportamento ideal para o gás de processo, válida devido às baixas pressões de operação, pode-se expressar a massa de gás nos trechos de tubulação em função da pressão de alimentação p_{fi} de cada estágio, o que resulta nas séries de equações:

$$\frac{dp_{f1}(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{fpw1}} [n_2 G_2''(t) - n_1 G_1(t)]$$

$$\frac{dp_{fi}(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{fpwi}} [n_{i-1} G'_{i-1}(t) + n_{i+1} G''_{i+1}(t) - n_i G_i(t) + \delta_i F_c(t)] \quad i=2, \dots, n-1 \quad (98)$$

$$\frac{dp_{fn}(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{fpwn}} [n_{n-1} G'_{n-1}(t) - n_n G_n(t)]$$

e

$$\frac{dz_i(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{fpwi} p_{fi}(t)} [n_{i-1} G'_{i-1}(t) y_{i-1}(t) + n_{i+1} G''_{i+1}(t) x_{i+1}(t) - n_i G_i(t) z_i(t) + \delta_i F_c(t) z_f(t) - \frac{MV_{fpwi}}{RT} z_i(t) \frac{dp_{fi}(t)}{dt}] \quad i=2, \dots, n-1 \quad (99)$$

onde V_{fpwi} é o volume do trecho de tubulação considerado.

A aplicação da equação dinâmica de balanço de material para o elemento U aos trechos de tubulação correspondentes aos volumes de controle VC2 (tubulação de produto da cascata) e VC3 (tubulação de rejeito da cascata), indicados na FIG.8, gera, utilizando-se a aproximação de comportamento ideal para o gás de processo, as equações:

$$\frac{dp_{pn}(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{pn}} [n_n G'_n(t) - P_{r,n}(t)] \quad (100)$$

e

$$\frac{dp_{w1}(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{w1}} [n_1 G''_1(t) - W_{r,1}(t)] \quad (101)$$

onde $P_{r,n}$ e $W_{r,1}$ são as vazões mássicas das correntes de produto e de rejeito da cascata que escoam através das restrições físicas de área A_{pn} e A_{w1} no instante t , respectivamente.

A aplicação da equação dinâmica de balanço de material para o elemento U às ultracentrífugas de cada estágio resulta na série de equações:

$$\frac{dl_i(t)}{dt} = G_i(t) - G'_i(t) - G''_i(t) \quad i=1, \dots, n \quad (102)$$

A aplicação do procedimento proposto por Olander às ultracentrífugas de cada estágio resulta nas séries de equações:

$$\begin{aligned} \lambda_i(t) l_i(t) [G_{pi}(t) \frac{dy_i(t)}{dt} + G_{wi}(t) \frac{dx_i(t)}{dt}] &= [H_{wi}(t) - \lambda_i(t) G_{wi}(t) \frac{dl_i(t)}{dt}] x_i(t) - \\ &- [H_{pi}(t) + \lambda_i(t) G_{pi}(t) \frac{dl_i(t)}{dt}] y_i(t) \quad i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (103)$$

onde:

$$G_{pi}(t) = \frac{G_{pei}(t)}{a_i(t)} + \frac{G_{psi}(t)}{b_i(t)}$$

$$G_{wi}(t) = \frac{G_{wei}(t)}{a_i(t)} + \frac{G_{wsi}(t)}{b_i(t)}$$

$$G_{pei}(t) = \frac{E_{ei}(t)[1+a_i(t)]}{[a_i(t)]^2} + \frac{[a_i(t)]^2 - 1 - [1+a_i(t)\eta_f]^2}{2[a_i(t)]^2}$$

$$G_{psi}(t) = \frac{-E_{si}(t)}{[b_i(t)]^2} + \frac{1 + [1+b_i(t)\eta_f]^2}{2[b_i(t)]^2}$$

$$G_{wei}(t) = \frac{-E_{ei}(t)}{[a_i(t)]^2} + \frac{1 + [1-a_i(t)(1-\eta_f)]^2}{2[a_i(t)]^2}$$

$$G_{wsi}(t) = \frac{-E_{si}(t)[b_i(t)-1]}{[b_i(t)]^2} + \frac{[b_i(t)]^2 - 1 - [1-b_i(t)(1-\eta_f)]^2}{2[b_i(t)]^2}$$

$$H_{pi}(t) = \frac{E_{ei}(t) + \lambda_i(t)G_i'(t)}{a_i(t)}$$

$$H_{wi}(t) = \frac{E_{si}(t) - \lambda_i(t)G_i''(t)}{b_i(t)}$$

$$E_{ei}(t) = \exp[-a_i(t)(1 - \eta_f)]$$

$$E_{si}(t) = \exp[b_i(t)\eta_f]$$

$$a_i(t) = g_i(t)[1 + \lambda_i(t)G_i'(t)]$$

$$b_i(t) = g_i(t)[1 - \lambda_i(t)G_i''(t)]$$

$$g_i(t) = z_u C_{1i}(t) / C_{5i}(t)$$

$$\lambda_i(t) = 1 / C_{1i}(t)$$

e

$$\begin{aligned} \frac{l_i(t)}{2} \left[\frac{dx_i(t)}{dt} + \frac{dy_i(t)}{dt} \right] &= G_i(t)z_i(t) - G_i'(t)y_i(t) - G_i''(t)x_i(t) - \\ &- \frac{1}{2} [y_i(t) + x_i(t)] \frac{dl_i(t)}{dt} \quad i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (104)$$

sendo z_u o comprimento útil do rotor da ultracentrífuga ($z_u = z_e + z_s$), η_f a posição relativa de injeção da alimentação no interior do rotor e C_{1i} e C_{5i} os parâmetros resultantes da resolução da equação de difusão-convecção no interior da ultracentrífuga e que podem ser calculados, em função das três componentes da eficiência, através das equações (27) e (28), como foi descrito no tópico 1.5.2.

A integração dessas $5n$ equações torna possível o cálculo dos valores da pressão de alimentação, da fração mássica das correntes de produto e rejeito e do inventário gasoso das ultracentrífugas de todos os estágios, além da fração mássica da corrente de alimentação dos estágios 2 a $n-1$ e da pressão das correntes de produto e de rejeito da cascata no instante $t+dt$.

Como pode ser observado na FIG.8, nas tubulações de alimentação dos estágios 1 e n não existe mistura de correntes. Portanto, a cada instante, a fração mássica do isótopo ^{235}U na corrente de alimentação do estágio 1 é igual à da corrente de rejeito do estágio 2. Da mesma forma, a cada instante, a fração mássica do isótopo ^{235}U na corrente de alimentação do estágio n é igual à da corrente de produto do estágio $n-1$. Assim, pode-se calcular a fração mássica do isótopo ^{235}U na corrente de alimentação desses dois estágios no instante $t+dt$.

Como não existem restrições físicas nas tubulações interestágios da cascata, continuam válidas, a cada instante, as igualdades de pressão descritas pelas equações (71) e (72), o que torna possível obter os valores das pressões das correntes de produto dos estágios 1 a $n-1$ e das correntes de rejeito dos estágios 2 a n no instante $t+dt$.

Continua válida, também, a cada instante, a relação entre a vazão e a pressão da corrente de alimentação das ultracentrífugas, o que permite o cálculo das vazões de alimentação no instante $t+dt$.

Uma vez que as relações vazão-pressão características do escoamento através de orifícios também não perdem a validade durante os transientes e que a área de escoamento equivalente à posição de abertura das duas válvulas de controle de fluxo utilizadas (A_{pn} e A_{w1}) é conhecida, pode-se calcular as vazões das correntes de produto $P_{r,n}$ e de rejeito $W_{r,1}$ da cascata, que escoam através dessas válvulas no instante $t+dt$, utilizando-se, respectivamente, a equação (80) aplicada ao estágio n e a equação (79) aplicada ao estágio 1.

Para que seja possível completar o cálculo de todas as variáveis no instante $t+dt$ e iniciar-se o próximo passo de integração, resta-nos calcular as vazões das correntes de produto e de rejeito das ultracentrífugas de todos os estágios da cascata nesse instante.

3.1.4.2 Cascata com restrições físicas nas tubulações interestágios de produto ou de rejeito

No caso de cascatas que apresentam restrições físicas para a equalização de pressões em apenas uma das tubulações de cada estágio, os trechos de tubulação interestágios podem ser divididos nos volumes de controle mostrados na FIG.9 (a), caso as restrições físicas estejam localizadas nas tubulações interestágios de produto, ou FIG.9 (b), caso as restrições físicas estejam localizadas nas tubulações interestágios de rejeito.

A aplicação da equação dinâmica de balanço de material para o elemento (U) aos volumes de controle VC1 e VC2 gera, utilizando-se a aproximação de comportamento ideal para o gás de processo, as respectivas séries de equações:

$$\frac{dp_{f1}(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{fw1}} [n_2 G_2''(t) - n_1 G_1(t)]$$

$$\frac{dp_{fi}(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{fwi}} [P_{r,i-1}(t) + n_{i+1} G_{i+1}''(t) - n_i G_i(t) + \delta_i F_c(t)] \quad i=2, \dots, n-1 \quad (105)$$

$$\frac{dp_{fn}(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{fwn}} [P_{r,n-1}(t) - n_n G_n(t)]$$

e

$$\frac{dp_{pi}(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{pi}} [n_i G_i'(t) - P_{r,i}(t)] \quad i=1, \dots, n \quad (106)$$

caso as restrições físicas estejam localizadas nas tubulações de produto dos estágios, onde $P_{r,i}$ é a vazão mássica da corrente de produto do estágio i que atravessa a restrição física de área A_{pi} no instante t , ou:

$$\frac{dp_{f1}(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{fp1}} [W_{r,2}(t) - n_1 G_1(t)]$$

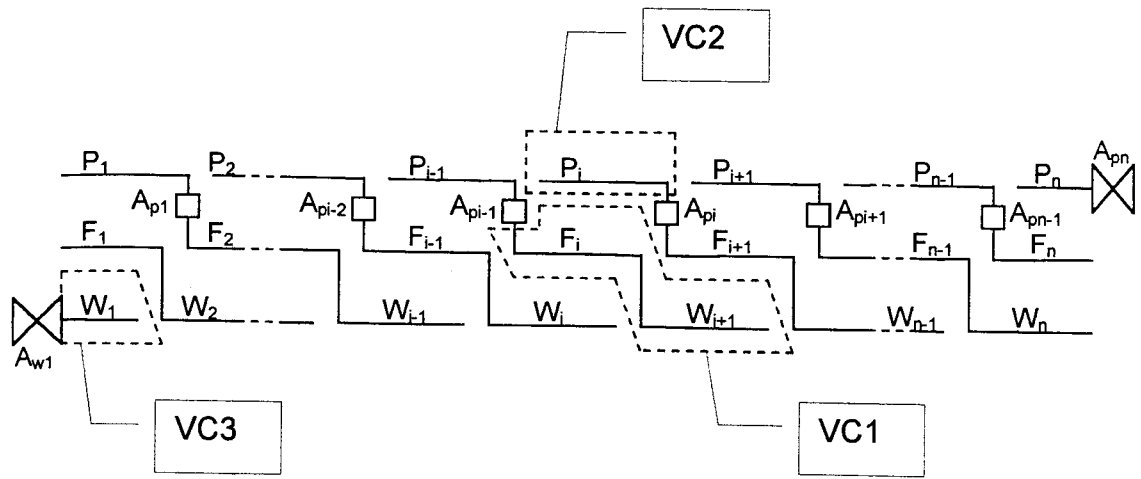
$$\frac{dp_{fi}(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{fpi}} [n_{i-1} G_{i-1}'(t) + W_{r,i+1}(t) - n_i G_i(t) + \delta_i F_c(t)] \quad i=2, \dots, n-1 \quad (107)$$

$$\frac{dp_{fn}(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{fpn}} [n_{n-1} G_{n-1}'(t) - n_n G_n(t)]$$

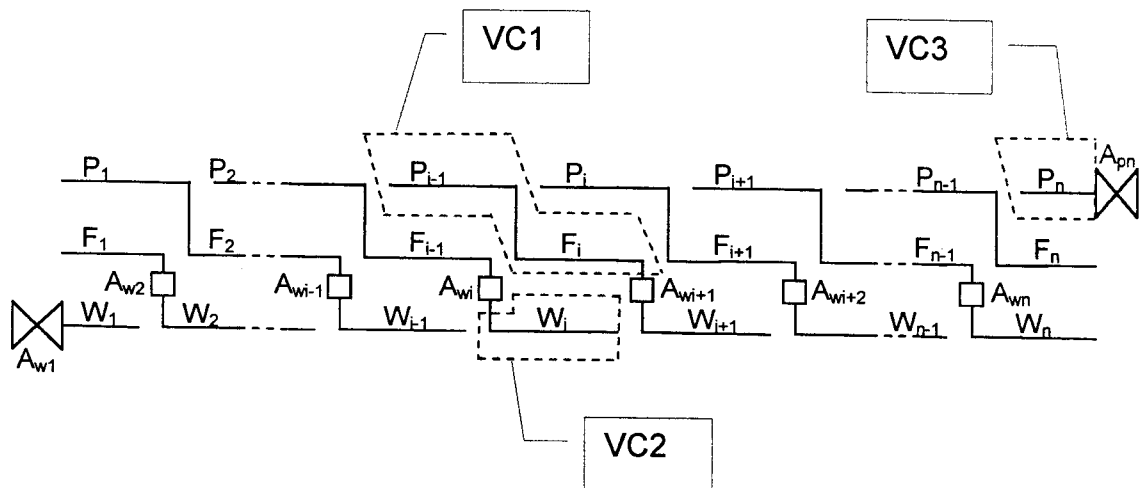
e

$$\frac{dp_{wi}(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{wi}} [n_i G_i''(t) - W_{r,i}(t)] \quad i=1, \dots, n \quad (108)$$

caso as restrições físicas estejam localizadas nas tubulações de rejeito dos estágios onde $W_{r,i}$ é a vazão mássica da corrente de rejeito do estágio i que atravessa a restrição física de área A_{wi} no instante t .



(a)



(b)

FIGURA 9 - Esquema da tubulação interestágios de uma cascata com restrições para a equalização de pressões na tubulação de produto (a) ou de rejeito (b) dos estágios

A aplicação da equação dinâmica de balanço de material para o isótopo ^{235}U aos trechos de tubulação correspondentes ao volume de controle VC1 dos estágios 2 a $n-1$, nos quais há mistura de correntes provenientes de ultracentrifugas pertencentes a estágios diferentes, resulta, utilizando-se a aproximação de comportamento ideal para o gás de processo, na série de equações:

$$\frac{dz_i(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{fwi}P_{fi}(t)} [P_{r,i-1}(t)y_{i-1}(t) + n_{i+1}G''_{i+1}(t)x_{i+1}(t) - n_i G_i(t)z_i(t) + \delta_i F_c(t)z_f(t) - \frac{MV_{fwi}}{RT} z_i(t) \frac{dp_{fi}(t)}{dt}] \quad i=2, \dots, n-1 \quad (109)$$

caso as restrições físicas estejam localizadas nas tubulações de produto dos estágios, ou:

$$\frac{dz_i(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{fpi}P_{fi}(t)} [n_{i-1}G'_{i-1}(t)y_{i-1}(t) + W_{r,i+1}(t)x_{i+1}(t) - n_i G_i(t)z_i(t) + \delta_i F_c(t)z_f(t) - \frac{MV_{fpi}}{RT} z_i(t) \frac{dp_{fi}(t)}{dt}] \quad i=2, \dots, n-1 \quad (110)$$

caso as restrições físicas estejam localizadas nas tubulações de rejeito dos estágios.

A aplicação da equação dinâmica de balanço de material para o elemento U ao trecho de tubulação correspondente ao volumes de controle VC3 (tubulação de rejeito ou de produto da cascata), indicado na FIG.9, gera, utilizando-se a aproximação de comportamento ideal para o gás de processo, a equação (101) no caso em que as restrições físicas estão localizadas nas tubulações de produto dos estágios, ou a equação (100) no caso em que as restrições físicas estão localizadas nas tubulações de rejeito dos estágios.

Da mesma forma que no modelo descrito no tópico 3.1.4.1, a aplicação da equação dinâmica de balanço de material para o elemento U e do procedimento proposto por Olander às ultracentrífugas de cada estágio resulta nas séries de equações (102), (103) e (104), o que permite compor um sistema de $6n-1$ equações diferenciais. A integração dessas equações torna possível o cálculo dos valores da pressão de alimentação e de produto ou rejeito, da fração mássica das correntes de produto e rejeito e do inventário gasoso das ultracentrífugas de todos os estágios, além da fração mássica da corrente de alimentação dos estágios 2 a $n-1$ e da pressão da corrente de rejeito ou de produto da cascata no instante $t+dt$.

Como pode ser observado na FIG.9, nas tubulações de alimentação dos estágios 1 e n não existe mistura de correntes. Portanto, a cada instante, a fração mássica do isótopo ^{235}U na corrente de alimentação do estágio 1 é igual à

da corrente de rejeito do estágio 2. Da mesma forma, a cada instante, a fração mássica do isótopo ^{235}U na corrente de alimentação do estágio n é igual à da corrente de produto do estágio $n-1$. Assim, pode-se calcular a fração mássica do isótopo ^{235}U na corrente de alimentação desses dois estágios no instante $t+dt$.

Como existem restrições físicas apenas nas tubulações interestágios de produto ou de rejeito da cascata, continua válida, a cada instante, a série de igualdades de pressão descrita pela equação (72), caso as restrições físicas estejam localizadas nas tubulações de produto dos estágios, ou (71), caso as restrições físicas estejam localizadas nas tubulações de rejeito dos estágios, o que permite a obtenção dos valores das pressões das correntes de rejeito dos estágios 2 a n ou de produto dos estágios 1 a $n-1$ no instante $t+dt$.

Continua válida, também, a cada instante, a relação entre a vazão e a pressão da corrente de alimentação das ultracentrífugas, o que torna possível o cálculo das vazões de alimentação no instante $t+dt$.

Uma vez que as relações vazão-pressão características do escoamento através de orifícios também não perdem a validade durante os transientes e que a área de escoamento equivalente à posição de abertura das duas válvulas de controle de fluxo utilizadas (A_{pn} e A_{w1}) é conhecida, pode-se calcular as vazões das correntes de produto $P_{r,n}$ e de rejeito $W_{r,1}$ da cascata, que escoam através dessas válvulas no instante $t+dt$, utilizando-se, respectivamente, a equação (80) aplicada ao estágio n e a equação (79) aplicada ao estágio 1.

Para que seja possível completar o cálculo de todas as variáveis no instante $t+dt$ e iniciar-se o próximo passo de integração, resta-nos calcular as vazões das correntes de produto e de rejeito das ultracentrífugas de todos os estágios da cascata nesse instante.

3.1.4.3 Cascata com restrições físicas nas tubulações interestágios de produto e de rejeito

No caso de cascatas que apresentam restrições físicas para a equalização de pressões interestágios nas tubulações de produto e de rejeito de cada estágio, os trechos de tubulação interestágios podem ser divididos nos volumes de controle mostrados na FIG.10.

VC1 dos estágios 2 a n-1, nos quais há mistura de correntes provenientes de ultracentrífugas pertencentes a estágios diferentes, resulta, utilizando-se a aproximação de comportamento ideal para o gás de processo, na série de equações:

$$\frac{dz_i(t)}{dt} = \frac{RT}{MV_{fi}P_{fi}(t)} [P_{r,i-1}(t)y_{i-1}(t) + W_{r,i+1}(t)x_{i+1}(t) - n_i G_i(t)z_i(t) + \delta_i F_c(t)z_f(t) - \frac{MV_{fi}}{RT} z_i(t) \frac{dp_{fi}(t)}{dt}] \quad i=2, \dots, n-1 \quad (114)$$

Da mesma forma que nos modelos descritos nos tópicos 3.1.4.1 e 3.1.4.2, a aplicação da equação dinâmica de balanço de material para o elemento U e do procedimento proposto por Olander às ultracentrífugas de cada estágio resulta nas séries de equações (102), (103) e (104), o que permite compor um sistema de $7n-2$ equações diferenciais. A integração dessas equações torna possível o cálculo dos valores da pressão de alimentação, da pressão de produto, da pressão de rejeito, da fração mássica das correntes de produto e rejeito e do inventário gasoso das ultracentrífugas de todos os estágios, além da fração mássica da corrente de alimentação dos estágios 2 a n-1 no instante $t+dt$.

Como pode ser observado na FIG.10, nas tubulações de alimentação dos estágios 1 e n não existe mistura de correntes. Portanto, a cada instante, a fração mássica do isótopo ^{235}U na corrente de alimentação do estágio 1 é igual à da corrente de rejeito do estágio 2. Da mesma forma, a cada instante, a fração mássica do isótopo ^{235}U na corrente de alimentação do estágio n é igual à da corrente de produto do estágio n-1. Assim, pode-se calcular a fração mássica do isótopo ^{235}U na corrente de alimentação desses dois estágios no instante $t+dt$.

Para que seja possível completar o cálculo de todas as variáveis no instante $t+dt$ e iniciar-se o próximo passo de integração, resta-nos calcular as vazões das correntes de produto e de rejeito das ultracentrífugas de todos os estágios da cascata nesse instante.

Uma vez que, em todos os modelos apresentados neste tópico, não existem equações disponíveis para o cálculo das vazões das correntes de produto e de rejeito das ultracentrífugas de cada estágio no instante $t+dt$ e que o cálculo dessas vazões é necessário para que possamos continuar o processo de integração nos próximos instantes, torna-se imperativa a adoção de hipóteses

teóricas que relacionem as vazões de retirada de material das ultracentrífugas a alguma das variáveis cujo valor no instante $t+dt$ foi calculado. A hipótese sugerida por Olander³⁹ corresponde à proporcionalidade, a cada instante, entre as vazões de retirada de material das ultracentrífugas e seu inventário gasoso. As constantes de proporcionalidade podem ser determinadas conhecendo-se o inventário gasoso real das ultracentrífugas que constituem a cascata em estudo em seu ponto ótimo de operação, onde são conhecidas as vazões de retirada de produto e rejeito:

$$k_p = \frac{\theta_{ot} G_{ot}}{I_{ot}} \quad (115)$$

e

$$k_w = \frac{(1 - \theta_{ot}) G_{ot}}{I_{ot}} \quad (116)$$

Obtidas as constantes de proporcionalidade, as vazões de retirada de produto e de rejeito das ultracentrífugas de cada estágio no instante $t+dt$ poderão ser calculadas, respectivamente, por:

$$G_i'(t + dt) = k_p I_i(t + dt) \quad i=1, \dots, n \quad (117)$$

e

$$G_i''(t + dt) = k_w I_i(t + dt) \quad i=1, \dots, n \quad (118)$$

Uma segunda hipótese analisada neste trabalho corresponde à proporcionalidade entre a pressão na extremidade dos coletores de produto e de rejeito das ultracentrífugas e seu inventário gasoso.

Utilizando-se a equação que expressa a perda de carga de um gás escoando, em regime laminar, em um duto de comprimento L e seção circular de diâmetro d ³²:

$$\omega = \frac{\pi d^4}{128} \frac{M}{2RT\mu} \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{L} \right) \quad (119)$$

onde ω é a vazão mássica do gás e μ é a sua viscosidade, expressa em função da temperatura por⁴⁰:

$$\mu = 8,39 \times 10^{-8} T^{0,933} \quad (120)$$

pode-se calcular a pressão na extremidade dos coletores de produto ($p_{1p,ot}$) e rejeito ($p_{1w,ot}$) das ultracentrífugas que constituem a cascata em estudo em seu ponto ótimo de operação, respectivamente, por:

$$p_{1p,ot}^2 = p_{p,ot}^2 + \frac{128 \theta_{ot} G_{ot} 2RT_{p,ot} \mu_{p,ot} L_p}{\pi d_p^4 M} \quad (121)$$

e

$$p_{1w,ot}^2 = p_{w,ot}^2 + \frac{128(1 - \theta_{ot}) G_{ot} 2RT_{w,ot} \mu_{w,ot} L_w}{\pi d_w^4 M} \quad (122)$$

uma vez que, nesse ponto de operação, as vazões e pressões das correntes de retirada produto e rejeito e a temperatura média do gás nos respectivos coletores são conhecidas.

As constantes de proporcionalidade entre as pressões p_{1p} e p_{1w} e o inventário das ultracentrífugas podem ser, então, determinadas por:

$$k_p = \frac{p_{1p,ot}}{I_{ot}} \quad (123)$$

e

$$k_w = \frac{p_{1w,ot}}{I_{ot}} \quad (124)$$

Obtidas as constantes de proporcionalidade, as pressões na extremidade dos coletores de produto e rejeito das ultracentrífugas de cada estágio no instante $t+dt$ podem ser calculadas, respectivamente, por:

$$p_{1pi}(t+dt) = k_p I_i(t+dt) \quad i=1, \dots, n \quad (125)$$

e

$$p_{1wi}(t+dt) = k_w I_i(t+dt) \quad i=1, \dots, n \quad (126)$$

e as vazões de retirada de produto e rejeito das ultracentrífugas de cada estágio podem ser calculadas, respectivamente, por:

$$G'_i(t+dt) = \frac{\pi d_p^4}{128} \frac{M}{2RT_p \mu_p} \left(\frac{p_{1pi}^2(t+dt) - p_{pi}^2(t+dt)}{L_p} \right) \quad i=1, \dots, n \quad (127)$$

e

$$G''_i(t+dt) = \frac{\pi d_w^4}{128} \frac{M}{2RT_w \mu_w} \left(\frac{p_{1wi}^2(t+dt) - p_{wi}^2(t+dt)}{L_w} \right) \quad i=1, \dots, n \quad (128)$$

admitindo-se que a temperatura média nos coletores de produto e rejeito seja a mesma em todos os estágios e permaneça constante durante os transientes analisados.

3.2 Metodologia para a avaliação dos modelos

3.2.1 Modelos semi-empíricos

Nos tópicos 3.1.2 e 3.1.3, foram descritas todas as situações passíveis de ocorrência em termos de restrições físicas nas tubulações interestágios de cascatas. Uma vez que, para a utilização desses tipos de modelo, são necessários dados experimentais obtidos em ensaios com ultracentrífugas, somente os modelos que se enquadram nos tipos de curvas experimentais disponíveis poderão ser verificados. Portanto, serão avaliados, neste trabalho, apenas os modelos apresentados no tópico 3.1.2.2 e o modelo correspondente citado no tópico 3.1.3.

Cada um dos modelos descritos será utilizado para simular o comportamento de uma cascata padrão utilizando os dados experimentais obtidos para dois tipos diferentes de ultracentrífuga. As duas soluções obtidas para cada modelo serão comparadas entre si, com a finalidade de avaliar a dependência entre o comportamento previsto pelos modelos para a mesma cascata e o tipo de ultracentrífuga utilizada para o seu projeto. As soluções obtidas para os cinco modelos propostos serão comparadas entre si, com o objetivo de avaliar as diferenças entre o comportamento previsto pelos diferentes modelos e sua aplicabilidade.

A validação dos modelos, que corresponde à comparação das soluções obtidas com dados experimentais, será feita utilizando-se resultados obtidos nas cascatas de ultracentrífugas de propriedade do CTMSP. Desta forma,

também só poderá ser efetuada para o modelo que utiliza a mesma restrição ao comportamento dos estágios utilizada no projeto de tais cascatas.

O modelo para a simulação da condição nominal de operação correspondente, descrito no tópico 3.1.2.2.3, será utilizado para a simulação da condição nominal de operação de quatro cascatas com número de estágios nas seções de enriquecimento e recuperação, número de ultracentrífugas por estágio e modelo de ultracentrífuga diferentes entre si, o que tornará possível atender ao critério de seleção aleatória da amostra, garantindo assim a validade dos procedimentos estatísticos a serem aplicados⁴¹.

Os dados experimentais serão obtidos operando-se as cascatas em sua condição nominal, definida pela vazão de alimentação e pela razão P/F, e procedendo-se, em condições de estabilidade operacional, ao registro das pressões interestágios e à coleta de amostras, para análise isotópica por espectrometria de massas, das correntes internas e externas às cascatas nos locais disponíveis em cada caso.

A validação do modelo será executada através da determinação dos valores médios porcentuais e dos intervalos de confiança relativos aos desvios entre os valores calculados utilizando o modelo e os valores experimentais obtidos para as pressões interestágios e para os fatores de separação dos estágios, como variáveis internas, e para a razão de abundância do isótopo ²³⁵U nas correntes de produto e rejeito, para a razão P/F e para a capacidade separativa das cascatas, como variáveis externas.

Da mesma forma, o modelo semi-empírico correspondente que simula a operação de cascatas fora de sua condição nominal, descrito no tópico 3.1.3, será utilizado para simular cinco condições de operação diferentes em uma das cascatas disponíveis. Essas condições operacionais foram escolhidas de forma a permitir a constituição de uma amostra aleatória, atendendo aos critérios necessários ao emprego correto das ferramentas de análise estatística, e correspondem a combinações dos seguintes desvios em relação à condição nominal de operação:

- operação da cascata com vazão de alimentação superior à nominal;
- operação da cascata com vazão de alimentação inferior à nominal;
- operação da cascata com relação P/F superior à nominal;
- operação da cascata com relação P/F inferior à nominal;

- operação da cascata com número de ultracentrífugas por estágio inferior ao de projeto.

Os dados experimentais necessários serão obtidos da mesma forma descrita para a avaliação do modelo que simula a condição nominal de operação de uma cascata. A validação do modelo também será efetuada da mesma forma descrita para o modelo que simula a condição nominal de operação de uma cascata.

3.2.2 Modelos teóricos

Cada um dos modelos descritos no tópico 3.1.1 será utilizado para simular o comportamento da mesma cascata padrão estudada na avaliação dos modelos semi-empíricos, considerando-se as características dos dois tipos de ultracentrífuga empregados.

A avaliação desses modelos teóricos será feita através da comparação entre as soluções obtidas e aquelas referentes aos cinco modelos semi-empíricos propostos no tópico 3.1.2. Serão calculados os desvios relativos percentuais entre os valores obtidos utilizando cada modelo teórico e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos para as vazões de alimentação, os cortes, os fatores de separação e de enriquecimento e os poderes de separação das ultracentrífugas dos estágios, como variáveis internas, e para a razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito, a relação P/F, a capacidade separativa e a eficiência, como variáveis externas. Uma análise desses desvios obtidos permitirá a comparação entre as hipóteses utilizadas, especialmente as aproximações teóricas, e tornará possível a seleção dos modelos mais apropriados para a utilização.

3.2.3 Modelos dinâmicos

Pelas mesmas razões expostas no tópico 3.2.1, serão avaliados, neste trabalho, apenas os modelos descritos no tópico 3.1.4.2.

Os modelos descritos serão utilizados para a simulação de três tipos diferentes de transiente:

- elevação em degrau na vazão de alimentação da cascata;
- retirada de ultracentrífugas da configuração da cascata;
- enchimento da cascata com o gás de processo.

A avaliação dos modelos será feita, para cada transiente proposto, utilizando-se uma das cascatas disponíveis para a obtenção de dados experimentais. Consistirá na comparação entre os valores simulados referentes à condição de estabilização da cascata após o transiente e os valores referentes a essa mesma condição simulados utilizando o modelo semi-empírico estático correspondente, cuja validação foi descrita no tópico 3.2.1, e na comparação entre o comportamento previsto pelo modelo e o obtido experimentalmente durante o transiente estudado. Caso a condição de estabilização prevista para a cascata não coincida com a simulada utilizando o modelo semi-empírico estático, os modelos dinâmicos serão ajustados através da introdução de coeficientes que corrijam as constantes de proporcionalidade k_p e k_w apresentadas no tópico 3.1.4, de maneira a reproduzirem os valores referentes à simulação estática para a vazão e para a razão de abundância do isótopo ^{235}U das correntes de produto e rejeito da cascata.

Após o ajuste dos modelos, caso este seja necessário, os resultados obtidos nas simulações serão comparados com os resultados experimentais referentes aos mesmos transientes estudados.

Esses dados experimentais serão obtidos submetendo-se a cascata em estudo aos transientes simulados e, durante cada transiente, registrando-se as pressões interestágios e coletando-se amostras, para análise isotópica por espectrometria de massas, das correntes de produto e de rejeito da cascata, até a correspondente estabilização.

Serão comparados o comportamento simulado das pressões interestágios e da razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito da cascata e o correspondente obtido experimentalmente durante os transientes, avaliando-se os tempos de estabilização correspondentes.

4 RESULTADOS

Será adotada como cascata padrão, para a comparação dos resultados obtidos utilizando diferentes modelos, aquela cujas características são apresentadas na TAB.2. Foi escolhida como tarefa de separação para essa cascata a produção de UF₆ enriquecido a 3,0 %²³⁵U, com rejeito empobrecido a 0,3 %²³⁵U. O número de estágios das seções de enriquecimento e de recuperação e o número de ultracentrífugas por estágio foram calculados utilizando-se as equações (43) a (46), com 10 ultracentrífugas no estágio do topo e as características da chamada "centrífuga de Iguaçu"⁴², considerando-se, para a ultracentrífuga em questão, uma vazão de alimentação ótima de 600 kgUF₆/a e uma eficiência de 40%.

TABELA 2 - Cascata padrão para comparação dos modelos matemáticos

Características da "centrífuga de Iguaçu":

- raio do rotor: $R_0 = 6$ cm
- altura adimensional: $L/R = 8$
- velocidade de rotação: $\omega_0 R_0 = 600$ m/s
- corte: $\theta = 0,5$
- posição da alimentação: $\eta_f = 0,5$
- temperatura no ponto de alimentação: $T(\eta_f) = 300$ K

Características da cascata:

- número de estágios de enriquecimento: 8 (estágios 5 a 12)
- número de estágios de recuperação: 4 (estágios 1 a 4)
- número de ultracentrífugas no estágio do topo: 10
- número total de ultracentrífugas: 968
- número de ultracentrífugas por estágio:

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número de ultracentrífugas	45	83	115	141	163	128	98	74	53	36	22	10

Os programas de computação referentes aos modelos propostos foram elaborados em linguagem FORTRAN e utilizam as subrotinas desenvolvidas por

Kahaner⁴³ para a resolução dos sistemas de equações algébricas não lineares e dos sistemas de equações diferenciais descritos nos tópicos 3.1.1 a 3.1.4.

4.1 Resultados obtidos utilizando-se os modelos semi-empíricos

4.1.1 Modelos para a simulação da condição nominal de operação de uma cascata

Os modelos descritos no tópico 3.1.2.2 foram utilizados para a simulação da operação da cascata cujas características são mostradas na TAB.2 utilizando-se as curvas experimentais e as características operacionais de dois tipos de ultracentrífuga distintos, que serão chamados UC-1 e UC-2. Para todos os modelos considerados, a vazão de alimentação da cascata foi mantida constante para o mesmo tipo de ultracentrífuga utilizado. Os modelos descritos nos tópicos 3.1.2.2.1, 3.1.2.2.2, 3.1.2.2.3 e 3.1.2.2.4 apresentaram solução para os dois tipos de ultracentrífuga utilizados. Os resultados obtidos são mostrados, respectivamente, nas TAB.3, 4, 5 e 6. O modelo descrito no tópico 3.1.2.2.5 apresentou solução apenas para os dados experimentais relativos à UC-2. Os resultados correspondentes são mostrados na TAB.7.

Nessas tabelas, são apresentados os desvios relativos percentuais entre os valores calculados utilizando os modelos e aqueles que seriam obtidos caso a cascata fosse ideal para os seguintes parâmetros operacionais:

- vazão de alimentação das ultracentrífugas de cada estágio:

$$\frac{G_i - G_{ot}}{G_{ot}} * 100$$

- corte de cada estágio:

$$\frac{\theta_i - \theta_{ot}}{\theta_{ot}} * 100$$

- pressões das correntes de produto e de rejeito de cada estágio:

$$\frac{P_{pi} - P_{p,ot}}{P_{p,ot}} * 100 \quad \text{e} \quad \frac{P_{wi} - P_{w,ot}}{P_{w,ot}} * 100$$

- fatores de separação e de enriquecimento de cada estágio:

$$\frac{\alpha_i - \alpha_{ot}}{\alpha_{ot}} * 100 \quad \text{e} \quad \frac{\beta_i - \beta_{ot}}{\beta_{ot}} * 100$$

- poder de separação das ultracentrífugas de cada estágio:

$$\frac{\delta U_i - \delta U_{ot}}{\delta U_{ot}} * 100$$

- razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto da cascata:

$$\frac{R_p - R_{p,id}}{R_{p,id}} * 100$$

com $R_{p,id} = (\beta_{ot})^{(n-n_s)} * R_f$, relação que deu origem à equação (43),

- razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de rejeito da cascata:

$$\frac{R_w - R_{w,id}}{R_{w,id}} * 100$$

com $R_{w,id} = R_f / (\beta_{ot})^{(n_s+1)}$, relação que deu origem à equação (44);

- relação P/F da cascata:

$$\frac{P/F - P/F_{id}}{P/F_{id}} * 100$$

com $P/F_{id} = \frac{0,711 - x_{w,id}}{y_{p,id} - x_{w,id}}$ e com $y_{p,id}$ e $x_{w,id}$ calculados utilizando-se a

equação (9), a partir dos valores de $R_{p,id}$ e $R_{w,id}$;

- capacidade separativa da cascata:

$$\frac{\sum_{i=1}^n n_i \delta U_i - \delta U_{ot} \sum_{i=1}^n n_i}{\delta U_{ot} \sum_{i=1}^n n_i} * 100$$

- eficiência da cascata:

$$\frac{E - 100}{100} * 100$$

TABELA 3 - Resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando a restrição de vazão de alimentação constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.1)

(a) Utilizando a UC-1

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\thetaot)/\thetaot$ (%)	$(pp-ppot)/ppot$ (%)	$(pw-pwot)/pwot$ (%)	$(\alpha-\alphaot)/\alphaot$ (%)	$(\beta-\betaot)/\betaot$ (%)	$(\delta U-\delta Uot)/\delta Uot$ (%)
1	0,0000	-2,6694	-0,9173	-1,0059	0,1101	0,2669	1,1336
2	0,0000	-4,5255	-0,9173	-1,8012	0,1778	0,4509	1,7582
3	0,0000	-3,8790	-0,9173	-1,5265	0,1524	0,3865	1,5500
4	0,0000	-5,3389	-0,9173	-2,1582	0,2032	0,5337	2,0185
5	0,0000	-4,0459	-0,9173	-1,5941	0,1524	0,4049	1,6021
6	0,0000	-9,2596	-0,9173	-3,9000	0,3472	0,9294	3,1116
7	0,0000	-4,2336	-0,9173	-1,6788	0,1609	0,4233	1,6657
8	0,0000	-10,6986	-0,9173	-4,5447	0,3980	1,0767	3,4529
9	0,0000	-5,5683	-0,9173	-2,2565	0,2117	0,5613	2,0879
10	0,0000	-14,9114	-0,9173	-6,4865	0,5674	1,5276	4,2568
11	0,0000	-5,2138	-0,9173	-2,1000	0,1948	0,5245	1,9780
12	0,0000	-43,9208	0,0000	-20,6641	2,0154	5,0888	1,3476

$(Rp-Rpid)/Rpid$ (%) :	49,2495
$(Rw-Rwid)/Rwid$ (%) :	19,7747
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-62,2103
$(\Delta U-nt*\delta Uot)/(nt*\delta Uot)$ (%) :	2,1273
$(E-100)/100$ (%) :	-16,7462

(b) Utilizando a UC-2

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\thetaot)/\thetaot$ (%)	$(pp-ppot)/ppot$ (%)	$(pw-pwot)/pwot$ (%)	$(\alpha-\alphaot)/\alphaot$ (%)	$(\beta-\betaot)/\betaot$ (%)	$(\delta U-\delta Uot)/\delta Uot$ (%)
1	0,0000	0,2578	8,5311	3,5530	-0,0227	-0,0521	-0,1636
2	0,0000	-1,6541	8,5311	2,8890	0,0378	0,2260	0,1810
3	0,0000	-0,9882	8,5311	3,1175	0,0151	0,1304	0,0677
4	0,0000	-2,4919	8,5311	2,5930	0,0680	0,3563	0,3194
5	0,0000	-1,1600	8,5311	3,0615	0,0227	0,1564	0,0960
6	0,0000	-4,5542	8,5311	1,8670	0,1360	0,6692	0,6184
7	0,0000	-1,3534	8,5311	2,9910	0,0302	0,1912	0,1322
8	0,0000	-4,5757	8,5311	1,8585	0,1435	0,6779	0,6215
9	0,0000	-2,7282	8,5311	2,5125	0,0755	0,4085	0,3556
10	0,0000	-5,3061	8,5311	1,6030	0,1662	0,7996	0,7128
11	0,0000	-2,3631	8,5311	2,6415	0,0604	0,3563	0,2974
12	0,0000	-16,9066	0,0000	-8,6510	0,6421	2,6508	1,2085

$(Rp-Rpid)/Rpid$ (%) :	25,8068
$(Rw-Rwid)/Rwid$ (%) :	10,7884
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-30,1499
$(\Delta U-nt*\delta Uot)/(nt*\delta Uot)$ (%) :	0,2869
$(E-100)/100$ (%) :	-2,1610

TABELA 4 - Resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando a restrição de corte constante para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.2)

(a) Utilizando a UC-1

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(pp-ppot)/ppot$ (%)	$(pw-pwot)/pwot$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	-16,3514	0,0000	-14,0632	-9,0335	1,4226	0,6718	-1,6484
2	-12,9730	0,0000	-10,3744	-6,5588	1,0839	0,5153	-1,2551
3	-9,3243	0,0000	-6,0977	-3,9224	0,7537	0,3589	-1,0006
4	-5,2703	0,0000	-2,0812	-1,3971	0,3980	0,1932	-0,6593
5	-1,3514	0,0000	4,2992	1,7882	0,0508	0,0276	-0,7866
6	5,0000	0,0000	11,2376	5,3094	-0,4573	-0,2209	-0,6998
7	12,4324	0,0000	16,7744	8,1506	-0,9908	-0,4785	-0,6304
8	18,7838	0,0000	23,3534	10,8006	-1,4396	-0,6902	-1,0295
9	27,0270	0,0000	28,6015	13,0524	-1,9646	-0,9478	-1,5269
10	34,3243	0,0000	32,5579	14,7135	-2,4049	-1,1687	-2,1747
11	40,5405	0,0000	35,9248	16,0176	-2,7606	-1,3435	-2,9034
12	48,2432	0,0000	0,0000	9,2741	-2,8876	-1,3987	0,6015

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	-1,2048
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	1,3799
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-0,1648
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	-0,9910
$(E-100)/100$ (%) :	-0,6623

(b) Utilizando a UC-2

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(pp-ppot)/ppot$ (%)	$(pw-pwot)/pwot$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	-7,1055	0,0000	2,4789	0,0660	0,9367	0,4259	-0,7962
2	-5,7471	0,0000	3,9033	0,9240	0,7478	0,3390	-0,6688
3	-4,3887	0,0000	5,9689	2,1705	0,5590	0,2520	-0,5791
4	-2,4033	0,0000	7,6444	3,0985	0,2946	0,1304	-0,3934
5	-0,8359	0,0000	10,5411	4,7775	0,0680	0,0261	-0,3430
6	1,8809	0,0000	14,2100	6,7535	-0,2946	-0,1391	-0,2077
7	5,4336	0,0000	16,5433	7,7525	-0,7101	-0,3303	0,1054
8	7,6280	0,0000	20,5122	9,7615	-0,9896	-0,4606	0,0913
9	11,3898	0,0000	23,4144	10,8485	-1,4126	-0,6518	0,3540
10	14,1066	0,0000	25,1011	11,3345	-1,7072	-0,7909	0,5618
11	15,6740	0,0000	28,0389	12,6345	-1,8885	-0,8778	0,5067
12	18,4953	0,0000	0,0000	-3,7775	-2,2284	-1,0342	0,2234

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	-0,2589
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	0,8861
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-0,4083
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	-0,2341
$(E-100)/100$ (%) :	-0,1362

TABELA 5 - Resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando a restrição de corte simétrico para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.3)

(a) Utilizando a UC-1

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\thetaot)/\thetaot$ (%)	$(pp-ppot)/ppot$ (%)	$(pw-pwot)/pwot$ (%)	$(\alpha-\alphaot)/\alphaot$ (%)	$(\beta-\betaot)/\betaot$ (%)	$(\delta U-\delta Uot)/\delta Uot$ (%)
1	-17,1622	-0,3962	-15,1429	-9,8465	1,5158	0,7546	-1,5269
2	-13,9189	-0,3128	-11,6586	-7,4794	1,2025	0,5981	-1,2030
3	-10,5405	-0,2294	-7,4782	-4,8624	0,8807	0,4325	-1,0006
4	-6,6216	-0,1251	-3,4361	-2,2700	0,5166	0,2577	-0,6940
5	-2,7027	-0,0417	2,6737	0,9206	0,1609	0,0828	-0,7981
6	3,3784	0,1043	9,5549	4,5129	-0,3303	-0,1656	-0,7461
7	10,6757	0,2503	15,2451	7,5288	-0,8637	-0,4325	-0,6883
8	16,8919	0,3754	22,1729	10,4176	-1,3295	-0,6626	-1,1105
9	25,4054	0,5214	27,9278	12,9494	-1,8884	-0,9478	-1,6310
10	33,3784	0,6465	32,4797	14,8894	-2,3711	-1,1963	-2,3655
11	40,2703	0,7716	36,4406	16,4576	-2,7775	-1,3987	-3,2389
12	49,1892	0,8133	0,0000	9,9606	-2,9554	-1,4908	0,2024

$(Rp-Rpid)/Rpid$ (%) :	-1,8077
$(Rw-Rwid)/Rwid$ (%) :	1,0455
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	1,2598
$(\Delta U-nt*\delta Uot)/(nt*\delta Uot)$ (%) :	-1,0303
$(E-100)/100$ (%) :	-0,5322

(b) Utilizando a UC-2

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\thetaot)/\thetaot$ (%)	$(pp-ppot)/ppot$ (%)	$(pw-pwot)/pwot$ (%)	$(\alpha-\alphaot)/\alphaot$ (%)	$(\beta-\betaot)/\betaot$ (%)	$(\delta U-\delta Uot)/\delta Uot$ (%)
1	-7,6280	-0,3222	1,6256	-0,5700	1,0349	0,5128	-0,7773
2	-6,5831	-0,2578	2,8856	0,2185	0,8763	0,4346	-0,6845
3	-5,3292	-0,2148	4,8756	1,4600	0,6950	0,3476	-0,6184
4	-3,4483	-0,1289	6,5789	2,4565	0,4381	0,2173	-0,4563
5	-1,8809	-0,0644	9,2278	4,0280	0,2115	0,1043	-0,3934
6	0,6270	0,0430	12,7967	6,0415	-0,1360	-0,0695	-0,2943
7	4,0752	0,1719	15,2111	7,1850	-0,5514	-0,2781	-0,0142
8	6,3741	0,2793	19,4189	9,3980	-0,8536	-0,4346	-0,0441
9	10,3448	0,4296	22,7867	10,8055	-1,3144	-0,6605	0,1967
10	13,4796	0,5371	25,1078	11,6335	-1,6619	-0,8343	0,3981
11	15,6740	0,6445	28,8489	13,2895	-1,9187	-0,9647	0,3320
12	19,2268	0,7734	0,0000	-3,4540	-2,3342	-1,1733	0,1054

$(Rp-Rpid)/Rpid$ (%) :	-1,1928
$(Rw-Rwid)/Rwid$ (%) :	0,4689
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	1,0512
$(\Delta U-nt*\delta Uot)/(nt*\delta Uot)$ (%) :	-0,3105
$(E-100)/100$ (%) :	-0,0896

TABELA 6 - Resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando a restrição de fator de separação constante para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.4).

(a) Utilizando a UC-1

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\thetaot)/\thetaot$ (%)	$(pp-ppot)/ppot$ (%)	$(pw-pwot)/pwot$ (%)	$(\alpha-\alphaot)/\alphaot$ (%)	$(\beta-\betaot)/\betaot$ (%)	$(\delta U-\delta Uot)/\delta Uot$ (%)
1	-2,1622	4,2336	-0,2797	1,5947	0,0000	-0,3405	-2,1747
2	0,6757	-1,3556	-0,0195	0,0276	0,0000	0,1104	0,6362
3	0,9459	-2,0229	0,4526	-0,0324	0,0000	0,1656	0,8676
4	1,4865	-3,0657	0,3985	-0,4000	0,0000	0,2485	1,3129
5	1,3514	-3,2117	1,5774	-0,0371	0,0000	0,2577	1,1914
6	2,7027	-5,7560	1,3489	-1,0312	0,0000	0,4601	2,2209
7	2,4324	-5,1721	1,0346	-0,9329	0,0000	0,4141	2,0590
8	2,0270	-4,6298	1,6541	-0,5118	0,0000	0,3773	1,7525
9	2,8378	-5,8603	1,0526	-1,1835	0,0000	0,4785	2,3077
10	2,1622	-4,5255	0,9955	-0,7129	0,0000	0,3681	1,8161
11	2,0270	-4,5464	1,5789	-0,5082	0,0000	0,3681	1,7293
12	2,7027	-5,4849	0,0000	-1,4276	0,0000	0,4509	2,3250

$(Rp-Rpid)/Rpid$ (%) :	19,0436
$(Rw-Rwid)/Rwid$ (%) :	9,9502
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-34,5804
$(\Delta U-nt*\delta Uot)/(nt*\delta Uot)$ (%) :	1,3418
$(E-100)/100$ (%) :	-4,9220

(b) Utilizando a UC-2

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\thetaot)/\thetaot$ (%)	$(pp-ppot)/ppot$ (%)	$(pw-pwot)/pwot$ (%)	$(\alpha-\alphaot)/\alphaot$ (%)	$(\beta-\betaot)/\betaot$ (%)	$(\delta U-\delta Uot)/\delta Uot$ (%)
1	-0,8359	2,6423	8,5756	4,4640	0,0000	-0,3563	-0,7899
2	0,0000	-0,6230	8,5133	3,2320	0,0000	0,0782	0,0079
3	0,0000	-0,4726	8,8189	3,4785	0,0000	0,0608	-0,0409
4	0,3135	-1,5252	8,6800	3,0015	0,0000	0,1912	0,1857
5	0,1045	-1,1386	9,1822	3,4585	0,0000	0,1477	0,0818
6	0,6270	-2,8571	9,0278	2,7165	0,0000	0,3737	0,4264
7	0,5225	-2,2986	8,8011	2,7865	0,0000	0,3042	0,3320
8	0,2090	-1,6327	9,3622	3,3900	0,0000	0,2173	0,1715
9	0,8359	-3,4372	8,6556	2,2560	0,0000	0,4606	0,5460
10	0,1045	-1,0956	8,9567	3,3405	0,0000	0,1564	0,0787
11	0,4180	-2,1697	9,1511	3,0545	0,0000	0,3042	0,2895
12	0,6270	-2,4919	0,0000	-2,8785	0,0000	0,3563	0,4500

$(Rp-Rpid)/Rpid$ (%) :	12,9289
$(Rw-Rwid)/Rwid$ (%) :	6,1988
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-17,5688
$(\Delta U-nt*\delta Uot)/(nt*\delta Uot)$ (%) :	0,1469
$(E-100)/100$ (%) :	-0,8523

TABELA 7 - Resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando a restrição de eficiência constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.5) utilizando a UC-2

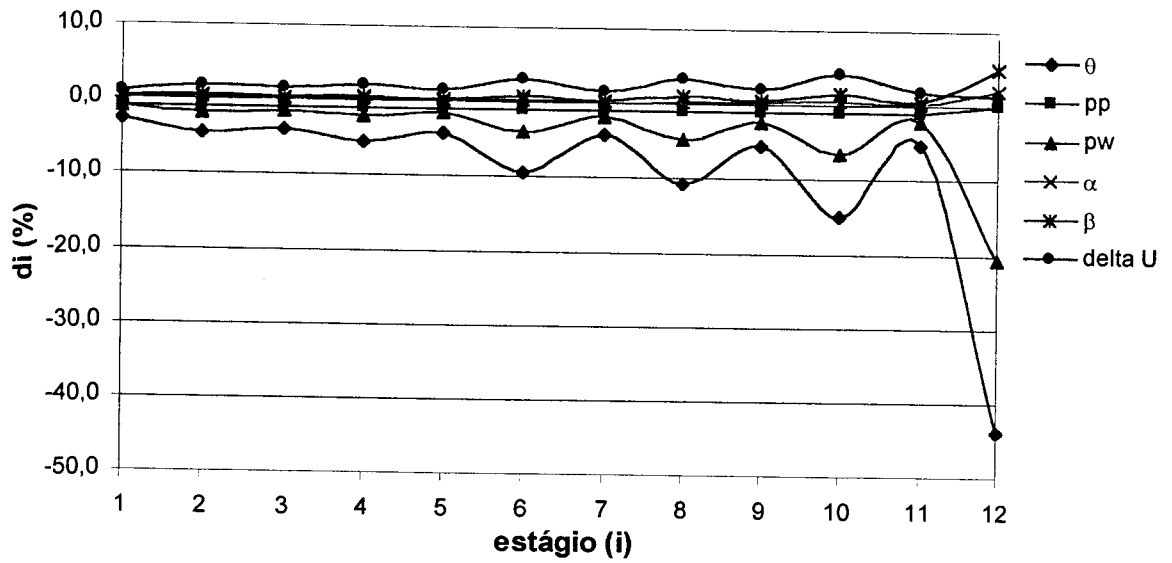
estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\thetaot)/\thetaot$ (%)	$(pp-ppot)/ppot$ (%)	$(pw-pwot)/pwot$ (%)	$(\alpha-\alphaot)/\alphaot$ (%)	$(\beta-\betaot)/\betaot$ (%)	$(\delta U-\delta Uot)/\delta Uot$ (%)
1	-3,0303	-1,9119	5,0256	0,8305	0,4532	0,4606	0,0000
2	-3,3438	-1,9979	4,4522	0,4535	0,4986	0,4867	0,0000
3	-3,8662	-2,3845	4,4889	0,3810	0,5817	0,5823	0,0000
4	-3,8662	-2,3201	4,3178	0,2890	0,5741	0,5736	0,0000
5	-3,9707	-2,3631	3,9144	0,0275	0,6043	0,5910	0,0000
6	-4,3887	-2,7068	4,2589	0,1590	0,6648	0,6779	0,0000
7	-4,0752	-2,2986	3,4333	-0,2635	0,6043	0,5997	0,0000
8	-4,8067	-2,9216	3,6756	-0,2610	0,7327	0,7474	0,0000
9	-4,5977	-2,7068	3,4656	-0,3420	0,6950	0,7040	0,0000
10	-4,8067	-2,6423	2,1744	-1,1450	0,7252	0,7040	0,0000
11	-6,0606	-3,3512	1,1556	-1,9865	0,9216	0,9039	0,0000
12	-7,0010	-3,9098	0,0000	-2,8860	1,0802	1,0690	0,0000

$(Rp-Rpid)/Rpid$ (%) :	19,9830
$(Rw-Rwid)/Rwid$ (%) :	8,7857
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-24,8659
$(\Delta U-nt*\delta Uot)/(nt*\delta Uot)$ (%) :	0,0000
$(E-100)/100$ (%) :	-1,3137

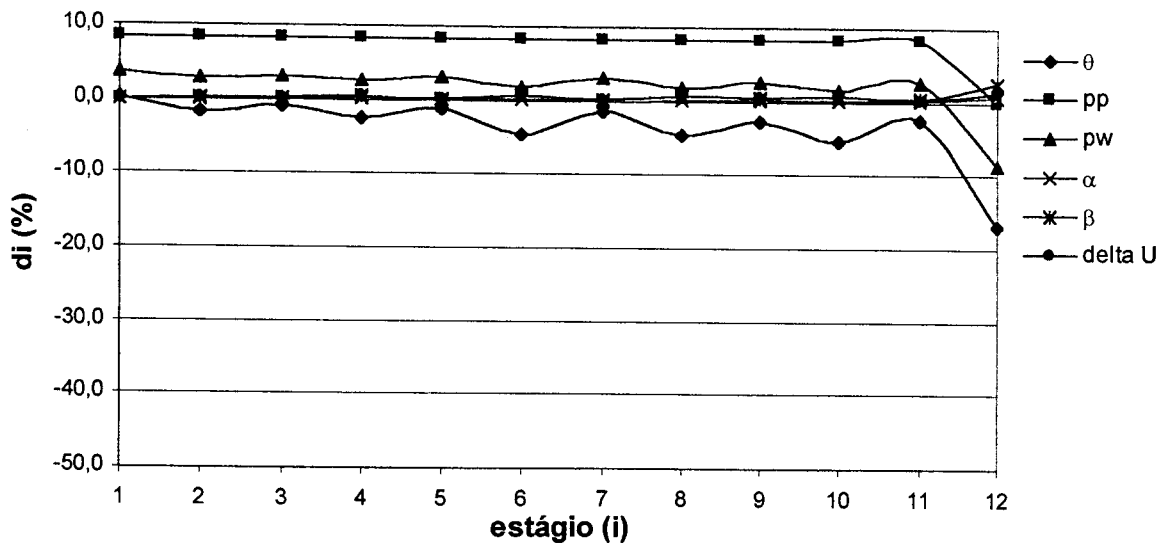
O comportamento dos desvios obtidos para as variáveis internas ao longo da cascata, apresentado nas TAB.3 a 7, é mostrado graficamente nas FIG.11 a 15.

A seguir, o modelo descrito no tópico 3.1.2.2.3, que utiliza a restrição de operação em processo de separação simétrico para todos os estágios, foi utilizado para a simulação da operação de quatro cascatas disponíveis para a obtenção de resultados experimentais, cada uma delas com número de estágios nas seções de enriquecimento e recuperação, número de ultracentrífugas por estágio e tipo de ultracentrífuga diferentes entre si.

Para cada uma das cascatas, foram calculados os desvios absolutos entre os valores simulados utilizando o modelo e os obtidos experimentalmente para as pressões e os fatores de separação dos estágios e os desvios relativos percentuais entre os valores calculados utilizando o modelo e os obtidos experimentalmente para as razões de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e de rejeito, a razão P/F e a capacidade separativa da cascata.

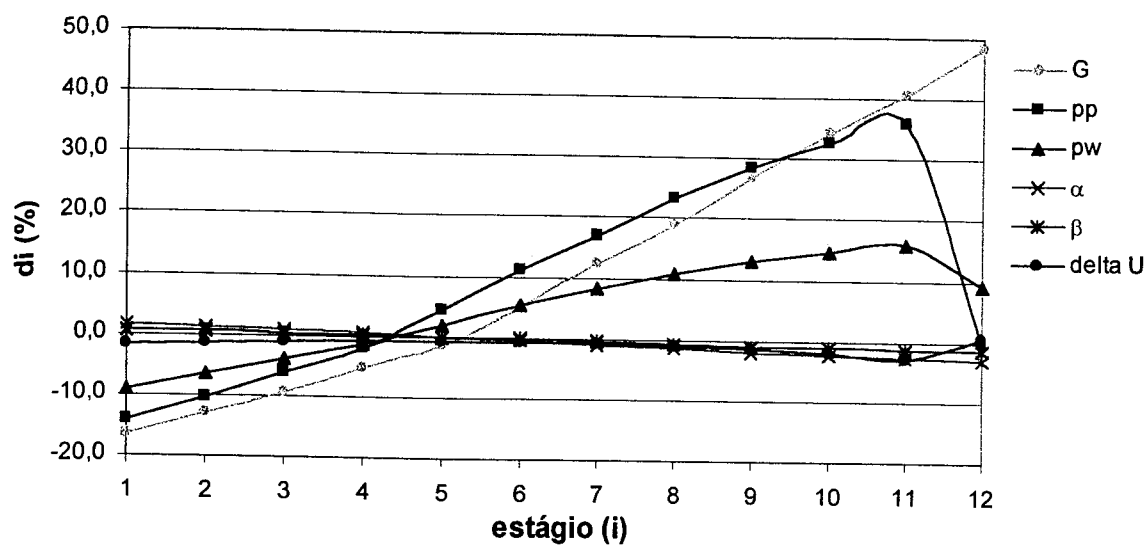


(a) Utilizando a UC-1

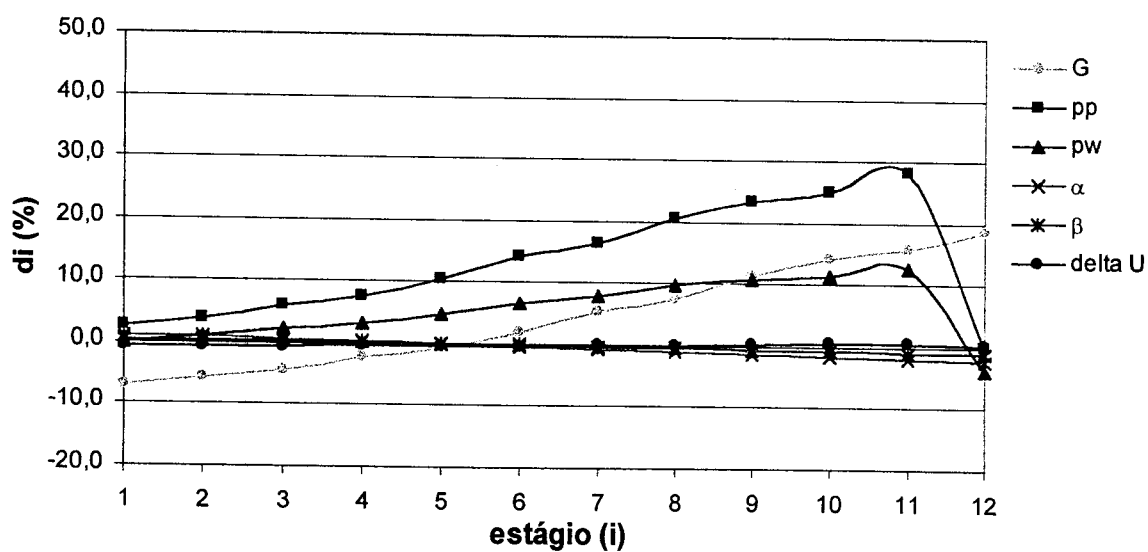


(b) Utilizando a UC-2

FIGURA 11 - Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas utilizando a restrição de vazão de alimentação constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.1)

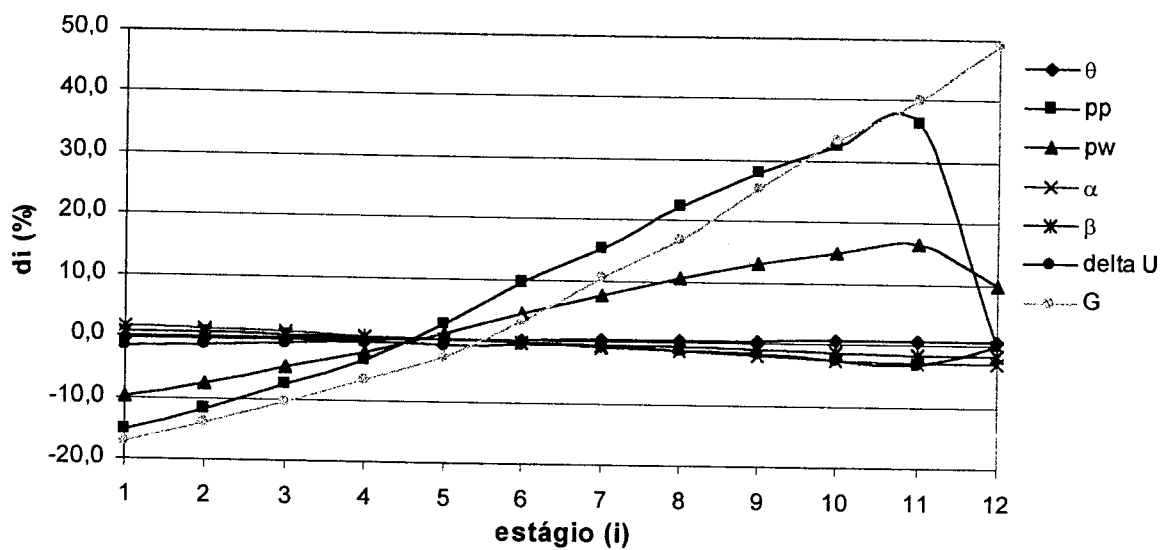


(a) Utilizando a UC-1

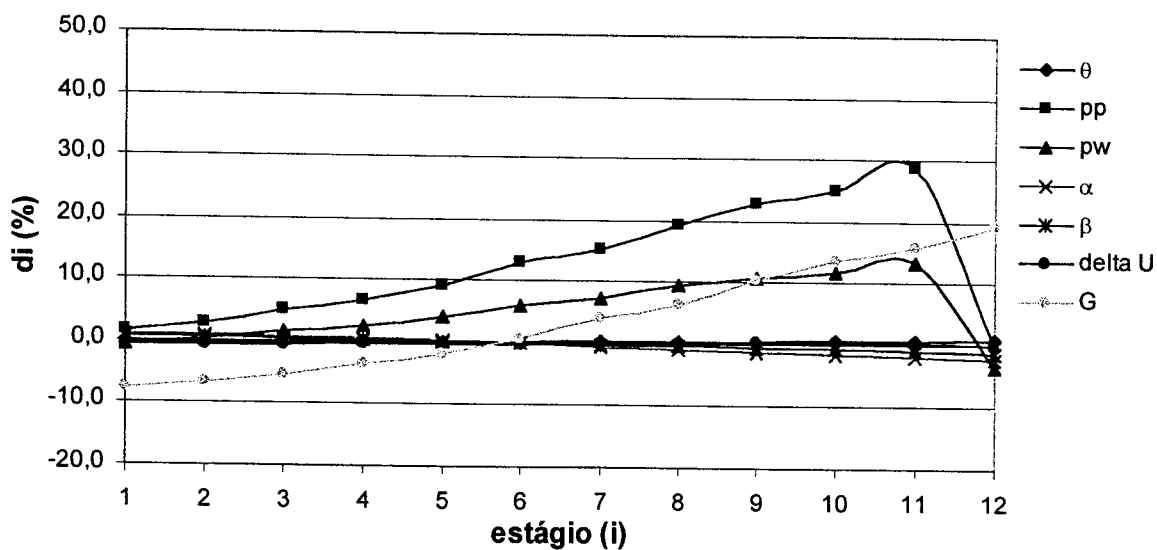


(b) Utilizando a UC-2

FIGURA 12 - Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas utilizando a restrição de corte constante para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.2)

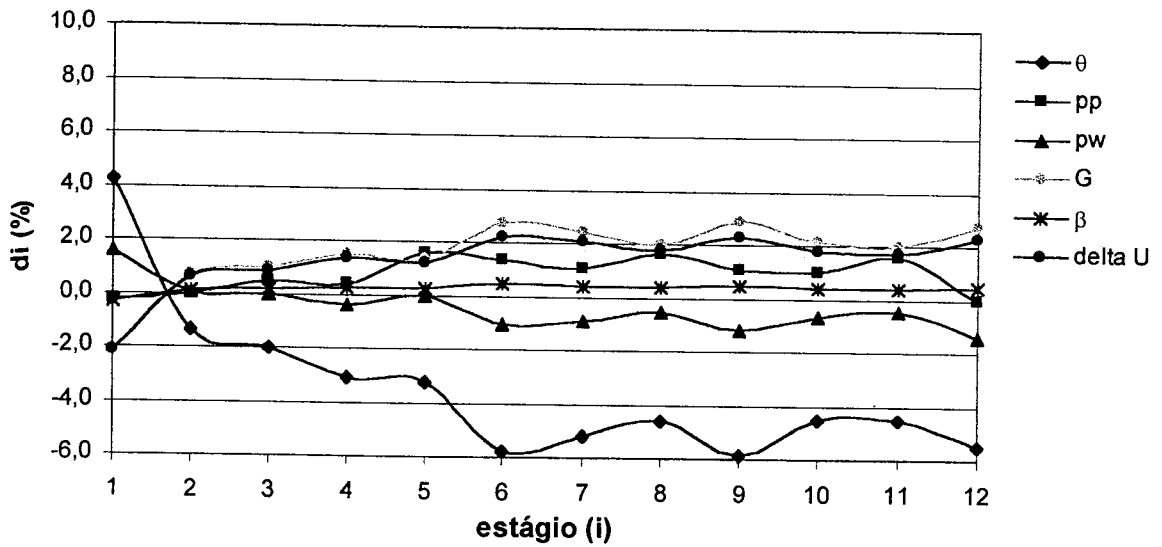


(a) Utilizando a UC-1

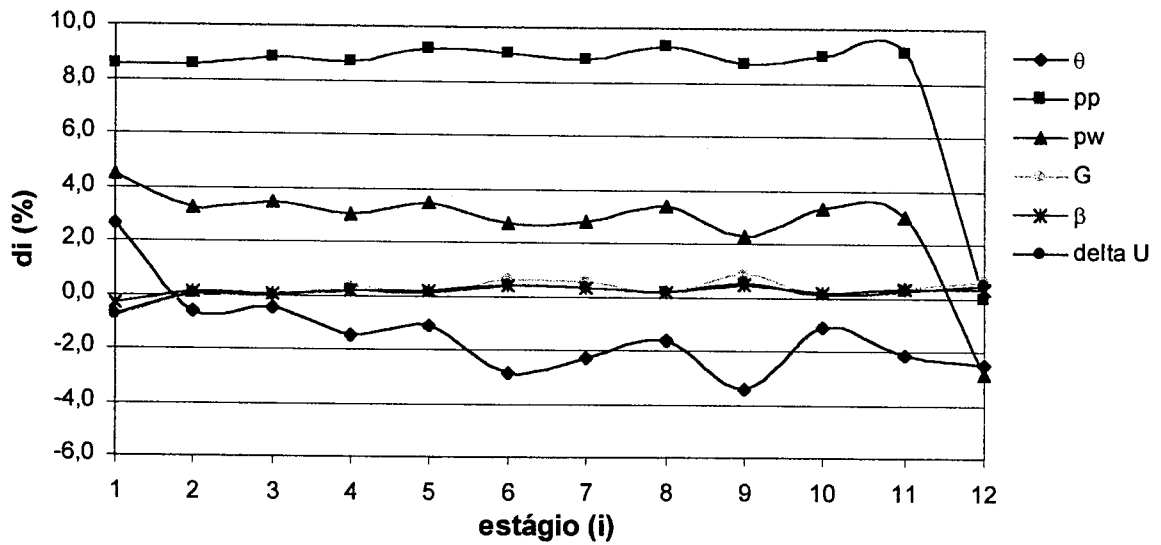


(b) Utilizando a UC-2

FIGURA 13 - Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas utilizando a restrição de corte simétrico para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.3)



(a) Utilizando a UC-1



(b) Utilizando a UC-2

FIGURA 14 - Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas utilizando a restrição de fator de separação constante para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.4)

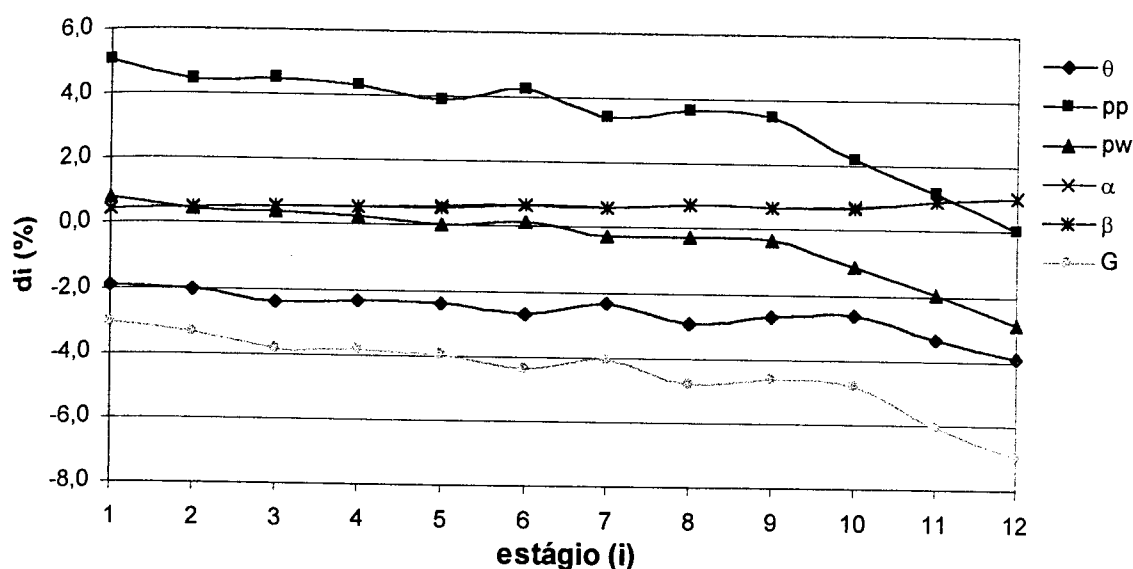


FIGURA 15 - Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas utilizando a restrição de eficiência constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.2.2.5) com a UC-2

O comportamento dos desvios das pressões e dos fatores de separação ao longo das cascatas é mostrado nas FIG.16 e 17, respectivamente. Nessas figuras, as coordenadas referentes ao eixo das abscissas correspondem à posição dos estágios nas seções de recuperação e de enriquecimento normalizada em relação ao estágio da alimentação. Desta forma, o estágio da base da cascata (estágio 1) corresponde à coordenada -1 , o estágio da alimentação da cascata corresponde à coordenada 0 e o estágio do topo da cascata (estágio n) corresponde à coordenada 1 .

As barras de erro mostradas nessas figuras correspondem aos intervalos de confiança com 95% de confiabilidade calculados para cada desvio com base na dispersão dos resultados experimentais.

Os valores médios e os intervalos de confiança com 95% de confiabilidade obtidos para todos os parâmetros comparados são mostrados na TAB.8. Para as pressões e fatores de separação, os intervalos de confiança apresentados foram calculados considerando a dispersão dos desvios entre os estágios das cascatas. Para os demais parâmetros, os intervalos de confiança foram calculados com base na dispersão obtida para os dados experimentais.

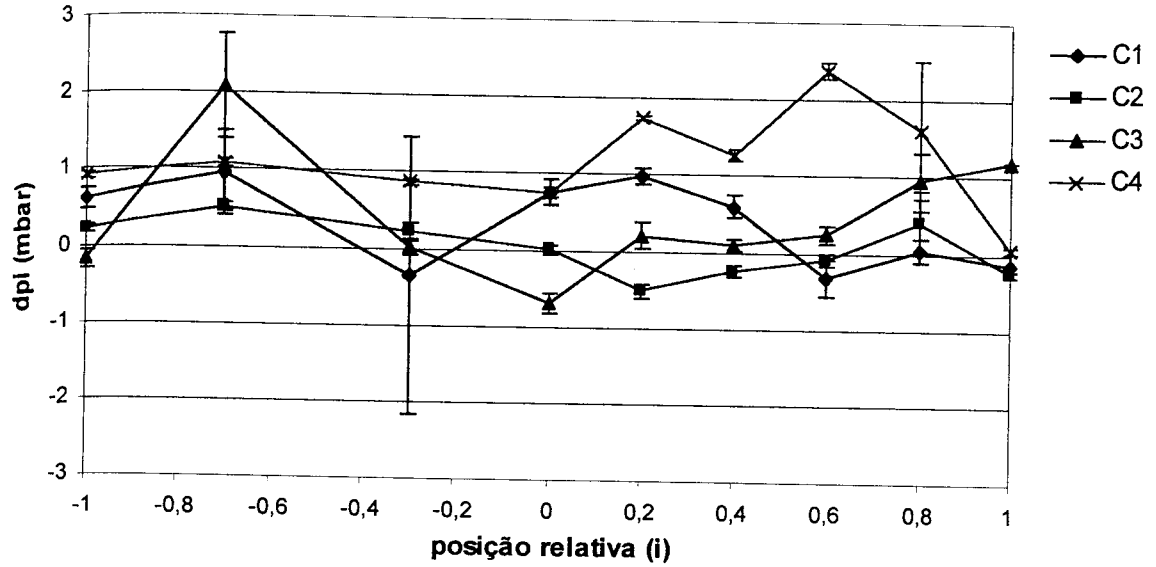


FIGURA 16 - Desvio entre os valores calculados e medidos para as pressões interestágios em função da posição relativa dos estágios ao longo das cascatas

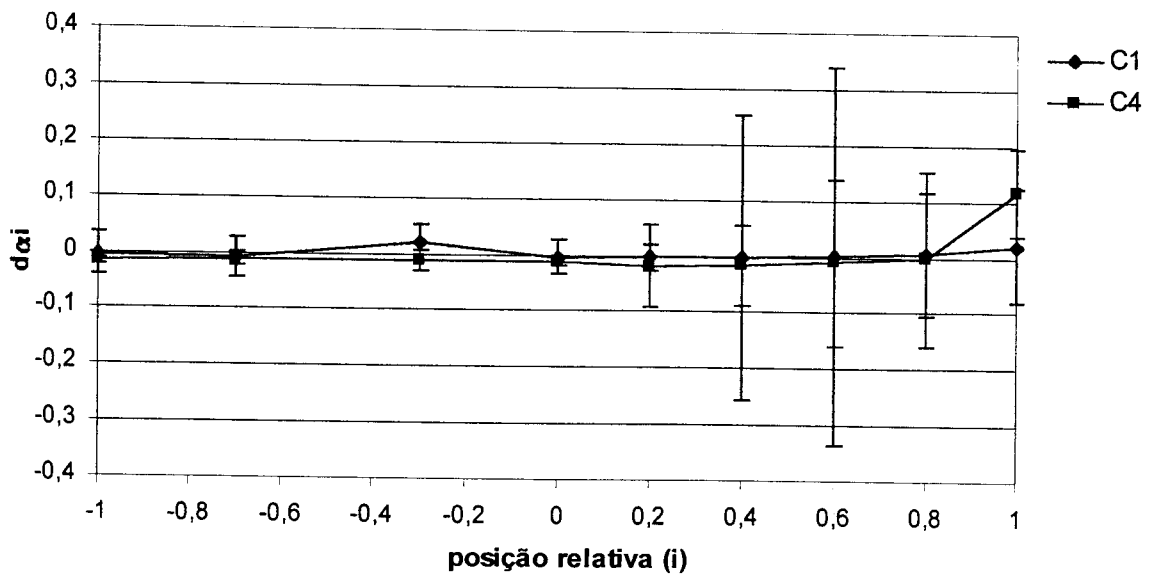


FIGURA 17 - Desvio entre os valores calculados e medidos para os fatores de separação em função da posição relativa dos estágios ao longo das cascatas

TABELA 8 - Valores médios e intervalos de confiança com 95% de confiabilidade para os desvios entre os valores calculados e medidos para as cascatas

Cascata	C1	C2	C3	C4
dpm (mbar)	0,3448	0,1413	0,2996	0,9484
int. conf. dpm (mbar)	$0,0896 \leq \text{dpm} \leq 0,6000$	$-0,1412 \leq \text{dpm} \leq 0,4238$	$-0,4044 \leq \text{dpm} \leq 1,0036$	$0,7478 \leq \text{dpm} \leq 1,1490$
α_m	0,0027	-	-	-0,0034
int. conf. α_m	$-0,0020 \leq \alpha_m \leq 0,0074$	-	-	$-0,0191 \leq \alpha_m \leq 0,0123$
$dR_{p,m}$ (%)	-1,4167	-0,0052	0,5885	-0,0678
int. conf. $dR_{p,m}$ (%)	$-1,8296 \leq dR_{p,m} \leq -1,0038$	$-0,1901 \leq dR_{p,m} \leq 0,1797$	$0,3963 \leq dR_{p,m} \leq 0,7807$	$-1,3557 \leq dR_{p,m} \leq 1,2201$
$dR_{w,m}$ (%)	0,4103	-0,3076	-0,1861	0,0929
int. conf. $dR_{w,m}$ (%)	$0,2847 \leq dR_{w,m} \leq 0,5359$	$-0,4387 \leq dR_{w,m} \leq -0,1765$	$-0,7076 \leq dR_{w,m} \leq 0,3354$	$-0,1163 \leq dR_{w,m} \leq 0,3021$
dP/F_m (%)	0,9943	0,4370	-0,8754	0,0463
int. conf. dP/F_m (%)	$0,4573 \leq dP/F_m \leq 1,5313$	$0,0621 \leq dP/F_m \leq 0,8119$	$-1,5119 \leq dP/F_m \leq -0,2389$	$-1,4295 \leq dP/F_m \leq 1,5221$
$d\Delta U_m$ (%)	-2,0231	0,1581	0,1579	-0,0056
int. conf. $d\Delta U_m$ (%)	$-2,4257 \leq d\Delta U_m \leq -1,6205$	$-0,1583 \leq d\Delta U_m \leq 0,4745$	$-0,8891 \leq d\Delta U_m \leq 1,2049$	$-0,4741 \leq d\Delta U_m \leq 0,4629$

4.1.2 Modelo para a simulação da operação de uma cascata fora da condição nominal

O modelo descrito no tópico 3.1.3 correspondente a cascatas com restrições físicas instaladas nas tubulações de produto ou de rejeito dos estágios foi utilizado para a simulação de cinco condições de operação diferentes da nominal em uma das cascatas disponíveis para a obtenção de resultados experimentais. Essas condições de operação correspondem a:

- vazão de alimentação e razão P/F nominais e número de ultracentrífugas 3,2% inferior ao nominal (condição 1);
- vazão de alimentação e número de ultracentrífugas nominais e razão P/F 5,4% superior à nominal (condição 2);
- número de ultracentrífugas nominal, vazão de alimentação 2,0% superior à nominal e razão P/F 7,5% superior à nominal (condição 3);
- número de ultracentrífugas nominal, vazão de alimentação 18,0% inferior à nominal e razão P/F 7,7% superior à nominal (condição 4);
- número de ultracentrífugas nominal, vazão de alimentação 3,3% superior à nominal e razão P/F 13,2% inferior à nominal (condição 5).

Para cada uma dessas condições de operação, foram calculados os desvios absolutos entre os valores calculados utilizando o modelo e os obtidos experimentalmente para as pressões e os fatores de separação dos estágios e os desvios relativos porcentuais entre os valores calculados utilizando o modelo e os obtidos experimentalmente para as razões de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e de rejeito, a razão P/F e a capacidade separativa da cascata.

O comportamento dos desvios das pressões de alimentação e dos fatores de separação ao longo da cascata é mostrado nas FIG.18 e 19, respectivamente. Nessas figuras, da mesma forma que nas FIG.16 e 17, as coordenadas referentes ao eixo das abscissas correspondem à posição dos estágios nas seções de recuperação e de enriquecimento normalizada em relação ao estágio da alimentação. As barras de erro mostradas na FIG.18 correspondem aos intervalos de confiança com 95% de confiabilidade calculados para cada desvio com base na dispersão dos resultados experimentais.

Os valores médios e os intervalos de confiança com 95% de confiabilidade obtidos para todos os parâmetros comparados são mostrados na

TAB.9. Para as pressões e fatores de separação, os intervalos de confiança apresentados foram calculados considerando a dispersão dos desvios entre os estágios das cascatas. Para os demais parâmetros, os intervalos de confiança foram calculados com base na dispersão obtida para os dados experimentais.

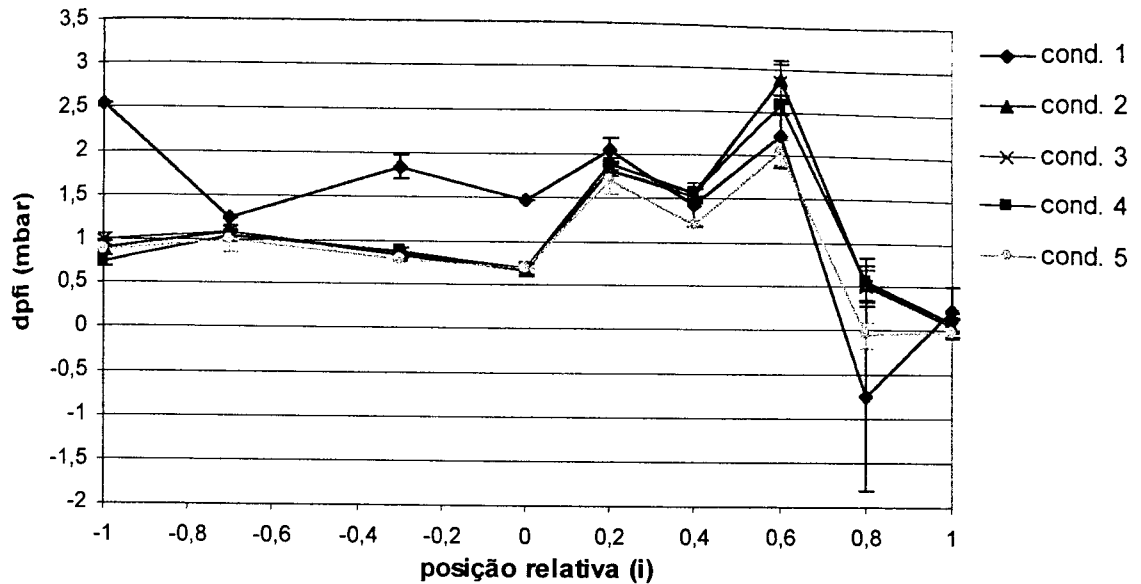


FIGURA 18 - Desvio entre os valores calculados e medidos para as pressões interestágios em função da posição relativa dos estágios ao longo da cascata para as cinco condições de operação diferentes escolhidas

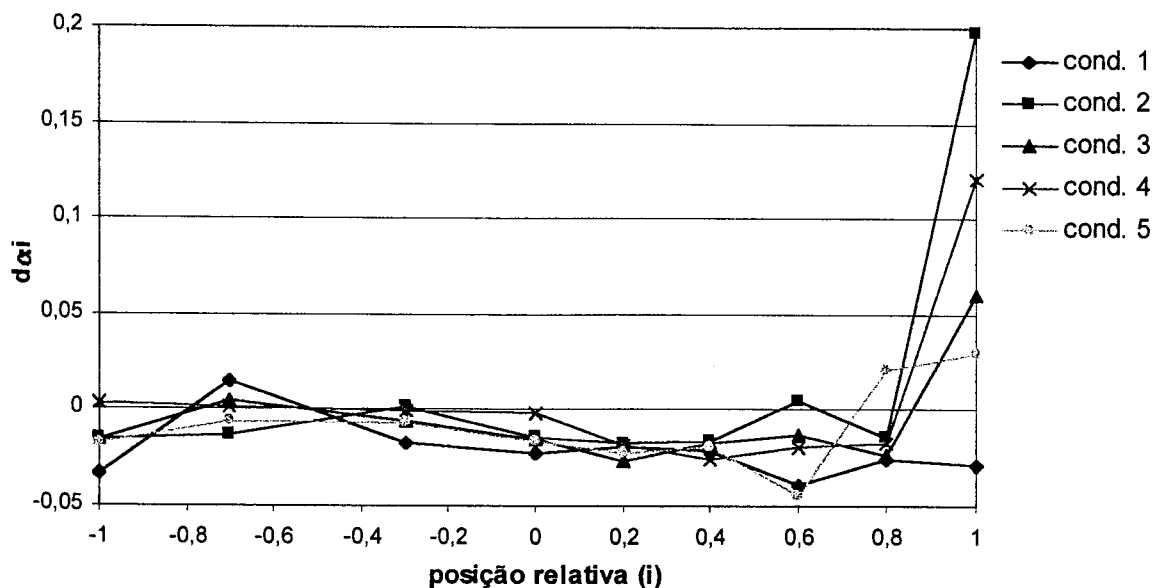


FIGURA 19 - Desvio entre os valores calculados e medidos para os fatores de separação em função da posição relativa dos estágios ao longo da cascata para as cinco condições de operação diferentes escolhidas

TABELA 9 - Valores médios e intervalos de confiança com 95% de confiabilidade para os desvios entre os valores calculados e medidos para as diferentes condições de operação da cascata

Cond. de operação	cond. 1	cond. 2	cond. 3	cond. 4	cond. 5
dpm (mbar)	1,3420	1,0381	1,0419	1,0068	0,8107
int. conf. dpm (mbar)	$1,0419 \leq dpm \leq 1,6421$	$0,7963 \leq dpm \leq 1,2799$	$0,8050 \leq dpm \leq 1,2788$	$0,7866 \leq dpm \leq 1,2270$	$0,6124 \leq dpm \leq 1,0090$
$d\alpha m$	-0,0221	-0,0011	-0,0077	-0,0028	-0,0100
int. conf. $d\alpha m$	$-0,0285 \leq d\alpha m \leq -0,0157$	$-0,0263 \leq d\alpha m \leq 0,0241$	$-0,0171 \leq d\alpha m \leq 0,0017$	$-0,0200 \leq d\alpha m \leq 0,0144$	$-0,0187 \leq d\alpha m \leq -0,0013$
$dR_{p,m}$ (%)	-0,7109	0,2650	0,8240	-0,2332	0,1450
int. conf. $dR_{p,m}$ (%)	$-1,7528 \leq dR_{p,m} \leq 0,3310$	$-1,0126 \leq dR_{p,m} \leq 1,5426$	$-2,3789 \leq dR_{p,m} \leq 4,0269$	$-2,5178 \leq dR_{p,m} \leq 2,0514$	$-2,1769 \leq dR_{p,m} \leq 2,4669$
$dR_{w,m}$ (%)	0,6426	-0,1971	-0,8328	0,2077	-0,0150
int. conf. $dR_{w,m}$ (%)	$0,4764 \leq dR_{w,m} \leq 0,8088$	$-0,8639 \leq dR_{w,m} \leq 0,4697$	$-1,1534 \leq dR_{w,m} \leq -0,5122$	$-0,2026 \leq dR_{w,m} \leq 0,6180$	$-0,3235 \leq dR_{w,m} \leq 0,2935$
dP/Fm (%)	0,0393	0,0390	0,2179	0,0693	0,0484
int. conf. dP/Fm (%)	$-1,2012 \leq dP/Fm \leq 1,2798$	$-2,4367 \leq dP/Fm \leq 2,5147$	$-4,4312 \leq dP/Fm \leq 4,8670$	$-2,8588 \leq dP/Fm \leq 2,9974$	$-2,7158 \leq dP/Fm \leq 2,8126$
$d\Delta U_m$ (%)	-1,2606	0,6423	1,9296	-0,3864	0,3321
int. conf. $d\Delta U_m$ (%)	$-1,4975 \leq d\Delta U_m \leq -1,0237$	$-1,4121 \leq d\Delta U_m \leq 2,6967$	$0,9540 \leq d\Delta U_m \leq 2,9052$	$-0,6966 \leq d\Delta U_m \leq -0,0762$	$-0,1031 \leq d\Delta U_m \leq 0,7673$

4.2 Resultados obtidos utilizando-se os modelos teóricos

Os doze modelos teóricos descritos no tópico 3.1.1 foram utilizados para a simulação da operação da cascata cuja distribuição de ultracentrífugas entre os estágios é mostrada na TAB.2, com as características construtivas dos dois tipos de ultracentrífuga UC-1 e UC-2, empregados para a obtenção dos resultados relativos aos modelos semi-empíricos apresentados no tópico 4.1.1. Para todos os modelos considerados, a vazão de alimentação da cascata foi mantida constante para o mesmo tipo de ultracentrífuga utilizado. Os desvios relativos percentuais entre os valores calculados utilizando-se os modelos teóricos descritos nos tópicos 3.1.1.1 a 3.1.1.12 e aqueles que seriam obtidos caso a cascata fosse ideal, para os mesmos parâmetros operacionais avaliados no caso dos modelos semi-empíricos, são mostrados no APÊNDICE.

Para efeito de comparação entre a resposta fornecida utilizando-se os modelos teóricos e os semi-empíricos, foram calculados, para os parâmetros apresentados nas TAB.3 a 7, os desvios relativos percentuais entre os valores obtidos para cada um dos modelos teóricos e os correspondentes obtidos para os modelos semi-empíricos elaborados. Os valores de desvio encontrados são apresentados nas TAB.10 a 21.

4.3 Resultados obtidos utilizando-se os modelos dinâmicos

Para a aplicação dos modelos dinâmicos propostos, além do conhecimento das características construtivas das ultracentrífugas a serem utilizadas, é necessário o conhecimento das características construtivas da cascata a ser estudada, já que o volume dos trechos de tubulação interestágios entra na constituição das equações diferenciais a serem resolvidas. Por esta razão, a avaliação dos modelos não será feita utilizando-se a cascata padrão definida acima, empregando-se, para essa finalidade, as características construtivas e operacionais da cascata na qual foram obtidos os resultados experimentais.

Por tratar-se de uma cascata com valores de corte bastante distintos entre si para diferentes estágios, os dois modelos descritos no tópico 3.1.4, denominados H1 (proporcionalidade entre as vazões das correntes de produto e

TABELA 10 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de corte e fator de separação constantes para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.1.1) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos

a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

a.1) Utilizando a UC-1

		estágio													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-16,35	-12,97	-9,32	-5,27	-1,35	5,00	12,43	18,78	27,03	34,32	40,54	48,24	
		dθ(%)	2,74	4,74	4,04	5,64	4,22	10,20	4,42	4,42	11,98	17,52	17,52	5,50	78,32
		dα(%)	-0,11	-0,18	-0,15	-0,20	-0,15	-0,35	-0,16	-0,16	-0,40	-0,21	-0,56	-0,19	-1,98
		dβ(%)	-0,27	-0,45	-0,39	-0,53	-0,40	-0,92	-0,42	-0,42	-1,07	-0,56	-1,50	-0,52	-4,84
		dδU(%)	-17,33	-14,41	-10,75	-7,09	-2,93	1,87	10,63	10,63	14,82	24,43	28,88	37,78	46,26
	2 (corte constante)	dG(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dθ(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dα(%)	-1,40	-1,07	-0,75	-0,40	-0,05	0,46	1,00	1,00	1,46	2,00	2,46	2,84	2,97
		dβ(%)	-0,67	-0,51	-0,36	-0,19	-0,03	0,22	0,48	0,48	0,69	0,96	1,18	1,36	1,42
		dδU(%)	-14,99	-11,80	-8,45	-4,58	-0,59	5,78	13,19	13,19	20,02	29,00	37,35	44,70	47,34
	3 (corte simétrico)	dG(%)	0,98	1,10	1,36	1,45	1,39	1,57	1,59	1,62	1,29	0,71	0,19	0,19	-0,63
		dθ(%)	0,40	0,31	0,23	0,13	0,04	-0,10	-0,25	-0,37	-0,52	-0,64	-0,77	-0,81	-0,81
		dα(%)	-1,49	-1,19	-0,87	-0,51	-0,16	0,33	0,87	1,35	1,92	2,43	2,86	2,86	3,05
		dβ(%)	-0,75	-0,59	-0,43	-0,26	-0,08	0,17	0,43	0,67	0,96	1,21	1,42	1,42	1,51
		dδU(%)	-15,09	-11,84	-8,45	-4,55	-0,58	5,83	13,25	13,25	20,11	29,13	37,62	45,21	47,93
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	-14,50	-13,56	-10,17	-6,66	-2,67	2,24	9,76	16,42	23,52	31,48	37,75	44,34	44,34
		dθ(%)	-4,06	1,37	2,06	3,16	3,32	6,11	5,45	4,85	6,23	4,74	4,76	4,76	5,80
		dα(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dβ(%)	0,34	-0,11	-0,17	-0,25	-0,26	-0,46	-0,41	-0,38	-0,48	-0,37	-0,37	-0,37	-0,45
		dδU(%)	-14,53	-13,45	-10,15	-6,44	-2,53	2,76	10,21	10,21	16,73	24,16	31,97	38,11	44,86

TABELA 10 (cont.)
a.2) Utilizando a UC-2

		estágio													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-7,11	-5,75	-4,39	-2,40	-0,84	1,88	5,43	7,63	11,39	14,11	15,67	18,50	
		dθ(%)	-0,26	1,68	1,00	2,56	1,17	4,77	1,37	4,80	2,80	5,60	2,42	20,35	
		dα(%)	0,02	-0,04	-0,02	-0,07	-0,02	-0,14	-0,03	-0,14	-0,14	-0,08	-0,17	-0,06	-0,64
		dβ(%)	0,04	-0,23	-0,14	-0,36	-0,16	-0,66	-0,19	-0,66	-0,40	-0,40	-0,78	-0,34	-2,57
		dδU(%)	-6,91	-5,90	-4,44	-2,73	-0,92	1,30	5,27	6,96	10,99	13,34	15,40	17,13	
	2 (corte constante)	dG(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dθ(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dα(%)	-0,93	-0,74	-0,56	-0,29	-0,07	0,30	0,72	1,00	1,43	1,74	1,92	2,28	
		dβ(%)	-0,43	-0,35	-0,26	-0,13	-0,03	0,14	0,33	0,47	0,66	0,81	0,90	1,06	
		dδU(%)	-6,31	-5,09	-3,82	-2,03	-0,48	2,14	5,29	7,52	11,00	13,51	15,16	18,28	
	3 (corte simétrico)	dG(%)	0,57	0,89	0,99	1,08	1,06	1,25	1,31	1,18	0,95	0,55	0,00	0,00	-0,61
		dθ(%)	0,32	0,26	0,22	0,13	0,06	-0,04	-0,17	-0,28	-0,43	-0,53	-0,64	-0,77	
		dα(%)	-1,02	-0,87	-0,69	-0,44	-0,21	0,14	0,55	0,86	1,33	1,69	1,96	2,39	
		dβ(%)	-0,52	-0,44	-0,36	-0,22	-0,10	0,07	0,28	0,45	0,67	0,85	0,99	1,20	
		dδU(%)	-6,33	-5,08	-3,78	-1,97	-0,43	2,23	5,42	7,67	11,17	13,69	15,36	18,42	
4 (fator de separação constante)	dG(%)	-6,32	-5,75	-4,39	-2,71	-0,94	1,25	4,89	7,40	10,47	13,99	15,19	17,76		
	dθ(%)	-2,57	0,63	0,47	1,55	1,15	2,94	2,35	1,66	3,56	1,11	2,22	2,56		
	dα(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
	dβ(%)	0,35	-0,09	-0,07	-0,19	-0,15	-0,37	-0,30	-0,21	-0,21	-0,45	-0,15	-0,29	-0,34	
	dδU(%)	-6,32	-5,73	-4,34	-2,60	-0,91	1,49	5,06	7,44	10,78	14,05	15,41	18,01		
5 (eficiência constante)	dG(%)	-4,20	-2,49	-0,54	1,52	3,26	6,56	9,91	13,06	16,76	19,87	23,14	27,42		
	dθ(%)	1,95	2,04	2,44	2,38	2,42	2,78	2,35	3,01	2,78	2,71	3,47	4,07		
	dα(%)	-0,45	-0,50	-0,58	-0,57	-0,60	-0,66	-0,60	-0,73	-0,69	-0,72	-0,91	-1,07		
	dβ(%)	-0,47	-0,49	-0,59	-0,57	-0,59	-0,67	-0,60	-0,73	-0,69	-0,69	-0,88	-1,04		
	dδU(%)	-7,06	-5,73	-4,37	-2,42	-0,82	1,92	5,41	7,62	11,39	14,14	15,75	18,54		

TABELA 10 (cont.)

b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

b.1) Utilizando a UC-1

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-32,9405	-16,4921	164,1865	1,4134	20,1146
2 (corte constante)	1,3065	-1,3402	0,0000	4,6074	0,6666
3 (corte simétrico)	1,9285	-1,0137	-1,4069	4,6490	0,5350
4 (fator de separação constante)	-15,9249	-9,0304	52,6074	2,1995	5,1767

b.2) Utilizando a UC-2

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-20,2727	-9,6912	42,5793	0,9642	2,2084
2 (corte constante)	0,5627	-0,8271	0,0000	1,4914	0,1360
3 (corte simétrico)	1,5133	-0,4153	-1,4442	1,5692	0,0894
4 (fator de separação constante)	-11,1809	-5,7884	20,8181	1,1052	0,8593
5 (eficiência constante)	-16,4028	-8,0286	32,5519	1,2536	1,3308

TABELA 11 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de corte constante para todos os estágios e parâmetros C_1 e C_5 constantes para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.2) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos

a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

a.1) Utilizando a UC-1

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-16,35	-12,97	-9,32	-5,27	-1,35	5,00	12,43	18,78	27,03	34,32	40,54	48,24
		dθ(%)	2,74	4,74	4,04	5,64	4,22	10,20	4,42	11,98	5,90	17,52	5,50	78,32
		dα(%)	1,24	0,86	0,57	0,17	-0,10	-0,80	-1,18	-1,86	-2,24	-3,05	-3,06	-5,23
		dβ(%)	0,38	0,05	-0,04	-0,36	-0,38	-1,14	-0,91	-1,77	-1,54	-2,70	-1,91	-6,38
		dδU(%)	-3,45	-3,49	-2,85	-2,94	-2,35	-3,71	-2,62	-4,77	-4,41	-7,40	-6,32	-7,12
	2 (corte constante)	dG(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dθ(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dα(%)	-0,07	-0,04	-0,03	-0,03	0,00	0,00	-0,03	-0,03	-0,03	-0,07	-0,10	-0,11
		dβ(%)	-0,03	-0,02	-0,01	-0,02	0,00	0,00	-0,01	-0,02	-0,02	-0,04	-0,05	-0,06
		dδU(%)	-0,72	-0,54	-0,35	-0,33	0,00	-0,02	-0,37	-0,46	-0,90	-1,31	-1,61	-6,43
	3 (corte simétrico)	dG(%)	0,98	1,10	1,36	1,45	1,39	1,57	1,59	1,62	1,29	0,71	0,19	-0,63
		dθ(%)	0,40	0,31	0,23	0,13	0,04	-0,10	-0,25	-0,37	-0,52	-0,64	-0,77	-0,81
		dα(%)	-0,16	-0,16	-0,15	-0,14	-0,11	-0,13	-0,15	-0,15	-0,15	-0,13	-0,10	-0,38
		dβ(%)	-0,11	-0,10	-0,08	-0,08	-0,06	-0,06	-0,06	-0,05	-0,05	-0,02	0,00	-0,13
		dδU(%)	-0,85	-0,60	-0,35	-0,29	0,01	0,03	-0,31	-0,38	-0,79	-1,12	-1,27	-6,05
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	-14,50	-13,56	-10,17	-6,66	-2,67	2,24	9,76	16,42	23,52	31,48	37,75	44,34
		dθ(%)	-4,06	1,37	2,06	3,16	3,32	6,11	5,45	4,85	6,23	4,74	4,76	5,80
		dα(%)	1,35	1,04	0,73	0,37	0,05	-0,46	-1,02	-1,47	-2,03	-2,50	-2,87	-3,32
		dβ(%)	0,99	0,39	0,18	-0,07	-0,23	-0,68	-0,90	-1,08	-1,46	-1,58	-1,76	-2,06
		dδU(%)	-0,19	-2,41	-2,20	-2,27	-1,95	-2,87	-3,00	-3,18	-4,61	-5,18	-6,09	-8,00

TABELA 11 (cont.)
a.2) Utilizando a UC-2

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-7,11	-5,75	-4,39	-2,40	-0,84	1,88	5,43	7,63	11,39	14,11	15,67	18,50
		dθ(%)	-0,26	1,68	1,00	2,56	1,17	4,77	1,37	4,80	2,80	5,60	2,42	20,35
		dα(%)	0,81	0,57	0,40	0,08	-0,08	-0,55	-0,89	-1,28	-1,68	-2,09	-2,17	-3,05
		dβ(%)	0,41	0,04	0,06	-0,29	-0,18	-0,86	-0,59	-1,20	-1,15	-1,68	-1,33	-3,68
		dδU(%)	-1,65	-1,84	-1,60	-1,68	-1,35	-1,73	-1,17	-1,63	-1,42	-1,85	-1,49	-2,51
	2 (corte constante)	dG(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dθ(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dα(%)	-0,15	-0,14	-0,14	-0,14	-0,13	-0,12	-0,15	-0,15	-0,19	-0,22	-0,22	-0,20
		dβ(%)	-0,07	-0,07	-0,06	-0,06	-0,05	-0,06	-0,07	-0,07	-0,10	-0,11	-0,11	-0,10
		dδU(%)	-1,03	-1,00	-0,96	-0,98	-0,92	-0,91	-1,14	-1,11	-1,11	-1,42	-1,71	-1,69
	3 (corte simétrico)	dG(%)	0,57	0,89	0,99	1,08	1,06	1,25	1,31	1,18	0,95	0,55	0,00	-0,61
		dθ(%)	0,32	0,26	0,22	0,13	0,06	-0,04	-0,17	-0,28	-0,43	-0,53	-0,64	-0,77
		dα(%)	-0,25	-0,27	-0,28	-0,29	-0,27	-0,28	-0,31	-0,29	-0,29	-0,27	-0,19	-0,09
		dβ(%)	-0,16	-0,16	-0,16	-0,15	-0,13	-0,13	-0,12	-0,10	-0,10	-0,06	-0,02	0,04
		dδU(%)	-1,05	-0,99	-0,92	-0,92	-0,87	-0,83	-1,02	-0,97	-0,97	-1,27	-1,55	-1,52
4 (fator de separação constante)	dG(%)	-6,32	-5,75	-4,39	-2,71	-0,94	1,25	4,89	7,40	10,47	13,99	15,19	17,76	
	dθ(%)	-2,57	0,63	0,47	1,55	1,15	2,94	2,35	1,66	3,56	1,11	2,22	2,56	
	dα(%)	0,79	0,60	0,42	0,15	-0,06	-0,42	-0,86	-1,14	-1,60	-1,93	-2,11	-2,42	
	dβ(%)	0,72	0,19	0,13	-0,12	-0,17	-0,57	-0,70	-0,75	-1,20	-1,05	-1,28	-1,48	
	dδU(%)	-1,03	-1,67	-1,49	-1,55	-1,34	-1,54	-1,37	-1,18	-1,18	-1,23	-1,48	-1,78	
5 (eficiência constante)	dG(%)	-4,20	-2,49	-0,54	1,52	3,26	6,56	9,91	13,06	16,76	19,87	23,14	27,42	
	dθ(%)	1,95	2,04	2,44	2,38	2,42	2,78	2,35	3,01	2,78	2,71	3,47	4,07	
	dα(%)	0,33	0,11	-0,17	-0,42	-0,66	-1,07	-1,46	-1,86	-2,28	-2,63	-3,00	-3,47	
	dβ(%)	-0,10	-0,22	-0,39	-0,50	-0,61	-0,87	-0,99	-1,27	-1,44	-1,59	-1,87	-2,18	
	dδU(%)	-1,81	-1,67	-1,53	-1,37	-1,26	-1,12	-1,04	-1,01	-1,07	-1,15	-1,20	-1,34	

TABELA 11 (cont.)

b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

b.1) Utilizando a UC-1

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-33,8861	-15,2356	164,1865	-3,4847	19,2634
2 (corte constante)	-0,1220	0,1443	0,0000	-0,4450	-0,0468
3 (corte simétrico)	0,4912	0,4758	-1,4069	-0,4054	-0,1775
4 (fator de separação constante)	-17,1105	-7,6616	52,6074	-2,7366	4,4314

b.2) Utilizando a UC-2

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-21,0115	-8,4359	42,5793	-1,5759	2,0465
2 (corte constante)	-0,3692	0,5514	0,0000	-1,0620	-0,0226
3 (corte simétrico)	0,5726	0,9690	-1,4442	-0,9861	-0,0692
4 (fator de separação constante)	-12,0040	-4,4788	20,8181	-1,4384	0,6995
5 (eficiência constante)	-17,1775	-6,7502	32,5519	-1,2938	1,1703

TABELA 12 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de corte constante para todos os estágios e eficiência constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.3) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos

a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

a.1) Utilizando a UC-1

		estágio													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Modelo semi-empírico (restrigão)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-16,35	-12,97	-9,32	-5,27	-1,35	5,00	12,43	18,78	27,03	34,32	40,54	48,24	
		dθ(%)	2,74	4,74	4,04	5,64	4,22	10,20	4,42	11,98	5,90	17,52	5,50	78,32	
		dα(%)	1,46	1,02	0,69	0,25	-0,03	-0,74	-1,10	-1,75	-1,75	-2,06	-2,80	-2,76	-4,84
		dβ(%)	0,48	0,12	0,02	-0,31	-0,35	-1,11	-0,87	-1,71	-1,71	-1,45	-2,58	-1,76	-6,19
		dδU(%)	-1,12	-1,72	-1,52	-1,97	-1,57	-3,01	-1,63	-3,33	-3,33	-2,04	-4,08	-1,93	-1,32
	2 (corte constante)	dG(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		dθ(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		dα(%)	0,15	0,12	0,09	0,06	0,07	0,06	0,05	0,09	0,11	0,16	0,20	-0,03	
		dβ(%)	0,07	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07	0,10	-0,02
		dδU(%)	1,68	1,28	1,02	0,67	0,80	0,71	0,64	1,05	1,05	1,56	2,23	3,00	-0,59
	3 (corte simétrico)	dG(%)	0,98	1,10	1,36	1,45	1,39	1,57	1,59	1,62	1,29	0,71	0,19	-0,63	
		dθ(%)	0,40	0,31	0,23	0,13	0,04	-0,10	-0,25	-0,37	-0,52	-0,64	-0,77	-0,81	
		dα(%)	0,06	0,00	-0,03	-0,06	-0,04	-0,07	-0,08	-0,03	-0,03	0,03	0,12	0,22	0,03
		dβ(%)	-0,01	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,03	-0,02	0,01	0,01	0,06	0,10	0,16	0,07
		dδU(%)	1,56	1,22	1,02	0,70	0,81	0,76	0,70	1,13	1,13	1,66	2,43	3,35	-0,20
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	-14,50	-13,56	-10,17	-6,66	-2,67	2,24	9,76	16,42	23,52	31,48	37,75	44,34	
dθ(%)		-4,06	1,37	2,06	3,16	3,32	6,11	5,45	4,85	6,23	4,74	4,76	5,80		
dα(%)		1,58	1,20	0,85	0,46	0,12	-0,40	-0,94	-1,35	-1,85	-2,25	-2,57	-2,92		
dβ(%)		1,09	0,46	0,24	-0,03	-0,20	-0,65	-0,86	-1,03	-1,36	-1,46	-1,60	-1,86		
dδU(%)		2,23	-0,63	-0,85	-1,29	-1,17	-2,17	-2,01	-1,72	-2,25	-1,78	-1,69	-2,27		

TABELA 12 (cont.)
a.2) Utilizando a UC-2

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-7,11	-5,75	-4,39	-2,40	-0,84	1,88	5,43	7,63	11,39	14,11	15,67	18,50
		dθ(%)	-0,26	1,68	1,00	2,56	1,17	4,77	1,37	4,80	2,80	5,60	2,42	20,35
		dα(%)	1,08	0,81	0,63	0,28	0,10	-0,40	-0,75	-1,15	-1,53	-1,94	-2,02	-2,88
		dβ(%)	0,53	0,16	0,16	-0,20	-0,10	-0,79	-0,53	-1,13	-1,08	-1,61	-1,26	-3,60
		dδU(%)	0,18	-0,16	-0,05	-0,30	-0,08	-0,60	-0,11	-0,60	-0,34	-0,69	-0,28	-1,18
	2 (corte constante)	dG(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dθ(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dα(%)	0,12	0,10	0,08	0,05	0,05	0,03	-0,01	-0,02	-0,05	-0,07	-0,07	-0,03
		dβ(%)	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	-0,01	0,00	0,00	-0,03	-0,04	-0,03
		dδU(%)	0,82	0,69	0,60	0,41	0,36	0,23	-0,09	-0,07	-0,34	-0,54	-0,49	-0,21
	3 (corte simétrico)	dG(%)	0,57	0,89	0,99	1,08	1,06	1,25	1,31	1,18	0,95	0,55	0,00	-0,61
		dθ(%)	0,32	0,26	0,22	0,13	0,06	-0,04	-0,17	-0,28	-0,43	-0,53	-0,64	-0,77
		dα(%)	0,02	-0,03	-0,05	-0,09	-0,09	-0,13	-0,17	-0,15	-0,15	-0,12	-0,04	0,08
		dβ(%)	-0,03	-0,05	-0,05	-0,06	-0,05	-0,05	-0,06	-0,03	-0,02	0,01	0,06	0,13
		dδU(%)	0,80	0,71	0,64	0,48	0,41	0,31	0,03	0,06	-0,18	-0,38	-0,31	-0,09
4 (fator de separação constante)	dG(%)	-6,32	-5,75	-4,39	-2,71	-0,94	1,25	4,89	7,40	10,47	13,99	15,19	17,76	
	dθ(%)	-2,57	0,63	0,47	1,55	1,15	2,94	2,35	1,66	3,56	1,11	2,22	2,56	
	dα(%)	1,06	0,85	0,64	0,35	0,12	-0,26	-0,72	-1,00	-1,46	-1,78	-1,96	-2,26	
	dβ(%)	0,84	0,30	0,23	-0,03	-0,10	-0,49	-0,64	-0,68	-1,13	-0,98	-1,20	-1,39	
	dδU(%)	0,81	0,01	0,06	-0,17	-0,06	-0,41	-0,31	-0,15	-0,53	-0,06	-0,27	-0,43	
5 (eficiência constante)	dG(%)	-4,20	-2,49	-0,54	1,52	3,26	6,56	9,91	13,06	16,76	19,87	23,14	27,42	
	dθ(%)	1,95	2,04	2,44	2,38	2,42	2,78	2,35	3,01	2,78	2,71	3,47	4,07	
	dα(%)	0,60	0,35	0,06	-0,23	-0,48	-0,92	-1,31	-1,72	-2,14	-2,48	-2,85	-3,30	
	dβ(%)	0,02	-0,10	-0,29	-0,41	-0,54	-0,79	-0,93	-1,20	-1,37	-1,52	-1,79	-2,09	
	dδU(%)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	

TABELA 12 (cont.)

b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

b.1) Utilizando a UC-1

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-33,6343	-15,5672	164,1865	-2,0770	19,3585
2 (corte constante)	0,2584	-0,2474	0,0000	1,0071	0,0330
3 (corte simétrico)	0,8740	0,0827	-1,4069	1,0472	-0,0978
4 (fator de separação constante)	-16,7948	-8,0228	52,6074	-1,3179	4,5147

b.2) Utilizando a UC-2

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-20,6510	-9,0635	42,5793	-0,2688	2,0575
2 (corte constante)	0,0855	-0,1379	0,0000	0,2519	-0,0119
3 (corte simétrico)	1,0316	0,2769	-1,4442	0,3288	-0,0584
4 (fator de separação constante)	-11,6024	-5,1336	20,8181	-0,1295	0,7104
5 (eficiência constante)	-16,7995	-7,3894	32,5519	0,0170	1,1812

TABELA 13 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de corte simétrico e fator de separação constante para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.1.4) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos

a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

a.1) Utilizando a UC-1

		estágio													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-16,49	-12,97	-9,46	-5,27	-1,49	5,00	12,43	18,65	26,89	34,32	40,41	48,24	
		dθ(%)	2,72	4,74	4,04	5,64	4,22	10,20	4,44	12,00	5,92	17,57	5,54	78,39	
		dα(%)	-0,11	-0,18	-0,15	-0,20	-0,15	-0,35	-0,16	-0,40	-0,40	-0,21	-0,56	-0,19	-1,98
		dβ(%)	-0,27	-0,45	-0,39	-0,53	-0,40	-0,92	-0,42	-1,07	-1,07	-0,56	-1,50	-0,52	-4,84
		dδU(%)	-17,36	-14,46	-10,81	-7,15	-2,99	1,80	10,55	14,74	24,36	28,84	37,77	46,30	
	2 (corte constante)	dG(%)	-0,16	0,00	-0,15	0,00	-0,14	0,00	0,00	-0,11	-0,11	-0,11	-0,10	0,00	
		dθ(%)	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	
		dα(%)	-1,40	-1,07	-0,75	-0,40	-0,05	0,46	1,00	1,46	2,00	2,46	2,84	2,97	
		dβ(%)	-0,67	-0,51	-0,36	-0,19	-0,03	0,22	0,48	0,69	0,96	1,18	1,36	1,42	
		dδU(%)	-15,02	-11,85	-8,51	-4,65	-0,65	5,71	13,10	19,93	28,93	37,31	44,70	47,39	
	3 (corte simétrico)	dG(%)	0,82	1,10	1,21	1,45	1,25	1,57	1,59	1,50	1,19	0,71	0,10	-0,63	
		dθ(%)	0,38	0,31	0,23	0,13	0,04	-0,10	-0,23	-0,35	-0,50	-0,60	-0,72	-0,77	
		dα(%)	-1,49	-1,19	-0,87	-0,51	-0,16	0,33	0,87	1,35	1,92	2,43	2,86	3,05	
		dβ(%)	-0,75	-0,59	-0,43	-0,26	-0,08	0,17	0,43	0,67	0,96	1,21	1,42	1,51	
		dδU(%)	-15,13	-11,90	-8,51	-4,61	-0,64	5,76	13,17	20,03	29,06	37,57	45,20	47,98	
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	-14,64	-13,56	-10,31	-6,66	-2,80	2,24	9,76	16,29	23,39	31,48	37,62	44,34	
dθ(%)		-4,08	1,37	2,06	3,16	3,32	6,11	5,48	4,88	6,25	4,78	4,81	5,85		
dα(%)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
dβ(%)		0,34	-0,11	-0,17	-0,25	-0,26	-0,46	-0,41	-0,38	-0,48	-0,37	-0,37	-0,45		
dδU(%)		-14,57	-13,51	-10,21	-6,50	-2,59	2,69	10,12	16,65	24,09	31,92	38,11	44,91		

TABELA 13 (cont.)
a.2) Utilizando a UC-2

		estágio													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Modelo semi-empírico (restrigão)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-7,21	-5,85	-4,60	-2,61	-1,04	1,67	5,22	7,42	11,18	14,00	15,78	18,70	
		dθ(%)	-0,30	1,64	0,98	2,53	1,17	4,79	1,39	4,84	2,89	5,72	2,55	20,55	
		dα(%)	0,02	-0,04	-0,02	-0,07	-0,02	-0,14	-0,03	-0,14	-0,14	-0,08	-0,17	-0,06	-0,64
		dβ(%)	0,05	-0,23	-0,13	-0,36	-0,16	-0,66	-0,19	-0,67	-0,41	-0,79	-0,79	-0,36	-2,58
		dδU(%)	-7,02	-6,05	-4,61	-2,90	-1,08	1,10	5,06	6,77	10,84	13,26	15,45	17,34	17,34
	2 (corte constante)	dG(%)	-0,11	-0,11	-0,22	-0,21	-0,21	-0,21	-0,20	-0,19	-0,19	-0,09	0,09	0,09	0,18
		dθ(%)	-0,04	-0,04	-0,02	-0,02	0,00	0,02	0,02	0,04	0,09	0,11	0,13	0,13	0,17
		dα(%)	-0,93	-0,74	-0,56	-0,29	-0,07	0,30	0,72	1,00	1,43	1,74	1,92	1,92	2,28
		dβ(%)	-0,42	-0,34	-0,25	-0,13	-0,03	0,14	0,33	0,46	0,66	0,80	0,80	0,89	1,05
		dδU(%)	-6,43	-5,24	-3,99	-2,21	-0,65	1,94	5,09	7,33	10,84	13,43	15,21	18,49	18,49
	3 (corte simétrico)	dG(%)	0,45	0,78	0,77	0,87	0,85	1,04	1,10	0,98	0,76	0,46	0,09	0,09	-0,44
		dθ(%)	0,28	0,22	0,19	0,11	0,06	-0,02	-0,15	-0,24	-0,34	-0,43	-0,51	-0,51	-0,60
		dα(%)	-1,02	-0,87	-0,69	-0,44	-0,21	0,14	0,55	0,86	1,33	1,69	1,96	1,96	2,39
		dβ(%)	-0,51	-0,43	-0,35	-0,22	-0,10	0,07	0,28	0,44	0,66	0,84	0,97	0,97	1,19
		dδU(%)	-6,45	-5,23	-3,95	-2,14	-0,60	2,03	5,21	7,48	11,02	13,62	15,41	18,63	18,63
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	-6,43	-5,85	-4,60	-2,92	-1,15	1,04	4,68	7,19	10,26	13,88	15,30	17,96	17,96
		dθ(%)	-2,62	0,58	0,45	1,53	1,15	2,96	2,37	1,70	3,65	1,22	2,35	2,73	2,73
		dα(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dβ(%)	0,36	-0,08	-0,06	-0,19	-0,15	-0,37	-0,30	-0,22	-0,46	-0,16	-0,30	-0,30	-0,36
		dδU(%)	-6,44	-5,88	-4,51	-2,77	-1,07	1,30	4,85	7,24	10,63	13,98	15,46	18,22	18,22
5 (eficiência constante)	dG(%)	-4,31	-2,59	-0,76	1,30	3,05	6,34	9,69	12,84	16,54	19,76	23,25	27,64	27,64	
	dθ(%)	1,91	1,99	2,42	2,35	2,42	2,80	2,37	3,05	2,87	2,82	3,60	4,25	4,25	
	dα(%)	-0,45	-0,50	-0,58	-0,57	-0,60	-0,66	-0,60	-0,73	-0,69	-0,72	-0,91	-1,07	-1,07	
	dβ(%)	-0,46	-0,48	-0,58	-0,57	-0,59	-0,67	-0,60	-0,74	-0,70	-0,70	-0,90	-1,06	-1,06	
	dδU(%)	-7,18	-5,88	-4,54	-2,59	-0,99	1,73	5,20	7,43	11,24	14,07	15,79	18,75	18,75	

TABELA 13 (cont.)

b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

b.1) Utilizando a UC-1

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-32,9738	-16,4921	164,3849	1,3525	20,1147
2 (corte constante)	1,2563	-1,3402	0,0751	4,5446	0,6667
3 (corte simétrico)	1,8779	-1,0137	-1,3328	4,5861	0,5350
4 (fator de separação constante)	-15,9666	-9,0304	52,7221	2,1381	5,1768

b.2) Utilizando a UC-2

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-20,4975	-9,6912	43,0836	0,8041	2,2088
2 (corte constante)	0,2791	-0,8271	0,3537	1,3305	0,1363
3 (corte simétrico)	1,2270	-0,4153	-1,0956	1,4082	0,0897
4 (fator de separação constante)	-11,4314	-5,7884	21,2454	0,9450	0,8596
5 (eficiência constante)	-16,6386	-8,0286	33,0208	1,0931	1,3312

TABELA 14 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de corte simétrico para todos os estágios e parâmetros C_1 e C_5 constantes para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.5) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos

a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

a.1) Utilizando a UC-1

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrigão)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-17,16	-13,92	-10,68	-6,62	-2,70	3,38	10,54	16,89	25,41	33,24	40,27	49,19
		dθ(%)	2,36	4,41	3,80	5,51	4,17	10,32	4,68	12,40	6,47	18,31	6,34	79,99
		dα(%)	1,35	0,98	0,70	0,30	0,02	-0,68	-1,06	-1,75	-2,16	-3,01	-3,08	-5,32
		dβ(%)	0,46	0,13	0,04	-0,28	-0,32	-1,08	-0,87	-1,74	-1,54	-2,73	-1,98	-6,48
		dδU(%)	-3,20	-3,34	-2,77	-2,92	-2,36	-3,78	-2,72	-4,90	-4,59	-7,69	-6,78	-7,84
	2 (corte constante)	dG(%)	-0,97	-1,09	-1,49	-1,43	-1,37	-1,54	-1,68	-1,59	-1,28	-0,80	-0,19	0,64
		dθ(%)	-0,38	-0,31	-0,23	-0,13	-0,04	0,10	0,25	0,38	0,54	0,67	0,79	0,94
		dα(%)	0,04	0,08	0,10	0,10	0,12	0,13	0,09	0,08	0,01	-0,06	-0,14	-0,54
		dβ(%)	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,03	0,01	-0,04	-0,07	-0,12	-0,33
		dδU(%)	-0,46	-0,39	-0,27	-0,30	-0,01	-0,09	-0,47	-0,59	-1,09	-1,62	-2,09	-7,16
	3 (corte simétrico)	dG(%)	0,00	0,00	-0,15	0,00	0,00	0,00	-0,12	0,00	0,00	-0,10	0,00	0,00
		dθ(%)	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,12
		dα(%)	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	0,01	0,00	-0,03	-0,03	-0,07	-0,10	-0,12	-0,47
		dβ(%)	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,02	-0,02	-0,04	-0,05	-0,07	-0,23
		dδU(%)	-0,59	-0,44	-0,27	-0,27	0,00	-0,04	-0,41	-0,51	-0,99	-1,43	-1,75	-6,79
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	-15,33	-14,50	-11,51	-7,99	-4,00	0,66	7,92	14,57	21,94	30,42	37,48	45,26
dθ(%)		-4,42	1,06	1,83	3,03	3,28	6,22	5,72	5,25	6,80	5,44	5,59	6,80	
dα(%)		1,46	1,16	0,86	0,50	0,17	-0,33	-0,90	-1,36	-1,96	-2,46	-2,90	-3,41	
dβ(%)		1,07	0,47	0,26	0,00	-0,17	-0,62	-0,86	-1,05	-1,46	-1,60	-1,82	-2,16	
dδU(%)		0,07	-2,26	-2,12	-2,24	-1,97	-2,94	-3,09	-3,31	-4,80	-5,48	-6,55	-8,72	

TABELA 14 (cont.)
a.2) Utilizando a UC-2

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-7,73	-6,58	-5,43	-3,45	-1,88	0,73	4,18	6,48	10,55	13,79	16,09	19,75
		dθ(%)	-0,54	1,44	0,82	2,47	1,15	4,86	1,61	5,13	3,31	6,26	3,17	21,38
		dα(%)	0,94	0,72	0,57	0,24	0,05	-0,41	-0,76	-1,18	-1,62	-2,12	-2,29	-3,28
		dβ(%)	0,51	0,15	0,16	-0,21	-0,12	-0,80	-0,56	-1,19	-1,19	-1,77	-1,47	-3,89
		dδU(%)	-1,47	-1,72	-1,53	-1,67	-1,39	-1,84	-1,37	-1,89	-1,79	-2,32	-2,07	-3,26
	2 (corte constante)	dG(%)	-0,67	-0,89	-1,09	-1,07	-1,05	-1,13	-1,19	-1,07	-0,75	-0,27	0,36	1,06
		dθ(%)	-0,28	-0,24	-0,17	-0,09	-0,02	0,09	0,24	0,32	0,49	0,62	0,73	0,86
		dα(%)	-0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	-0,02	-0,05	-0,14	-0,25	-0,35	-0,44
		dβ(%)	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,00	-0,04	-0,06	-0,13	-0,19	-0,25	-0,31
		dδU(%)	-0,84	-0,88	-0,88	-0,97	-0,95	-1,03	-1,34	-1,37	-1,78	-2,18	-2,27	-2,31
	3 (corte simétrico)	dG(%)	-0,11	0,00	-0,11	0,00	0,00	0,10	0,10	0,10	0,19	0,28	0,36	0,44
		dθ(%)	0,04	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,06	0,09	0,09	0,09
		dα(%)	-0,11	-0,12	-0,11	-0,13	-0,14	-0,14	-0,18	-0,18	-0,24	-0,30	-0,32	-0,33
		dβ(%)	-0,05	-0,06	-0,06	-0,07	-0,07	-0,07	-0,10	-0,09	-0,12	-0,15	-0,16	-0,17
		dδU(%)	-0,86	-0,86	-0,85	-0,91	-0,90	-0,95	-1,23	-1,23	-1,63	-2,02	-2,10	-2,19
4 (fator de separação constante)	dG(%)	-6,95	-6,58	-5,43	-3,75	-1,98	0,10	3,64	6,26	9,64	13,67	15,61	19,00	
	dθ(%)	-2,85	0,39	0,30	1,46	1,13	3,03	2,59	1,99	4,07	1,74	2,96	3,44	
	dα(%)	0,92	0,76	0,58	0,31	0,08	-0,27	-0,73	-1,03	-1,55	-1,96	-2,23	-2,66	
	dβ(%)	0,82	0,30	0,23	-0,04	-0,11	-0,51	-0,68	-0,74	-1,24	-1,14	-1,42	-1,69	
	dδU(%)	-0,85	-1,55	-1,42	-1,54	-1,37	-1,66	-1,57	-1,45	-1,97	-1,70	-2,06	-2,53	
5 (eficiência constante)	dG(%)	-4,85	-3,35	-1,63	0,43	2,18	5,36	8,61	11,86	15,88	19,54	23,58	28,76	
	dθ(%)	1,66	1,80	2,27	2,29	2,40	2,87	2,59	3,34	3,29	3,35	4,22	4,96	
	dα(%)	0,47	0,26	0,00	-0,26	-0,53	-0,93	-1,33	-1,75	-2,23	-2,66	-3,12	-3,70	
	dβ(%)	0,00	-0,11	-0,29	-0,42	-0,55	-0,81	-0,97	-1,26	-1,48	-1,67	-2,01	-2,38	
	dδU(%)	-1,63	-1,54	-1,46	-1,36	-1,29	-1,24	-1,24	-1,28	-1,44	-1,63	-1,78	-2,09	

TABELA 14 (cont.)

b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

b.1) Utilizando a UC-1

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-34,3138	-15,5672	168,2540	-3,5165	19,4318
2 (corte constante)	-0,7681	-0,2474	1,5396	-0,4778	0,0944
3 (corte simétrico)	-0,1589	0,0827	0,1111	-0,4383	-0,0365
4 (fator de separação constante)	-17,6467	-8,0228	54,9570	-2,7687	4,5789

b.2) Utilizando a UC-2

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-22,0001	-8,9380	45,3170	-1,6668	2,1030
2 (corte constante)	-1,6162	0,0000	1,9202	-1,1534	0,0328
3 (corte simétrico)	-0,6862	0,4153	0,4482	-1,0776	-0,0138
4 (fator de separação constante)	-13,1054	-5,0026	23,1380	-1,5295	0,7553
5 (eficiência constante)	-18,2141	-7,2616	35,0971	-1,3850	1,2264

TABELA 15 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata pudrão utilizando as hipóteses de corte simétrico para todos os estágios e eficiência constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.6) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos

a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

a.1) Utilizando a UC-1

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-17,16	-13,92	-10,54	-6,62	-2,70	3,38	10,54	16,89	25,41	33,24	40,14	48,78
		dθ(%)	2,29	4,39	3,78	5,49	4,15	10,30	4,66	12,35	6,40	18,24	6,25	79,77
		dα(%)	1,54	1,12	0,81	0,37	0,08	-0,62	-0,97	-1,63	-1,97	-2,75	-2,74	-4,87
		dβ(%)	0,55	0,20	0,09	-0,25	-0,28	-1,06	-0,82	-1,68	-1,44	-2,59	-1,79	-6,26
		dδU(%)	-1,12	-1,72	-1,52	-1,97	-1,57	-3,01	-1,63	-3,33	-2,04	-4,08	-1,93	-1,32
	2 (corte constante)	dG(%)	-0,97	-1,09	-1,34	-1,43	-1,37	-1,54	-1,68	-1,59	-1,28	-0,80	-0,29	0,36
		dθ(%)	-0,44	-0,33	-0,25	-0,15	-0,06	0,08	0,23	0,33	0,48	0,60	0,71	0,81
		dα(%)	0,23	0,22	0,21	0,18	0,19	0,19	0,18	0,21	0,21	0,22	0,22	-0,07
		dβ(%)	0,15	0,14	0,12	0,09	0,09	0,08	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	-0,09
		dδU(%)	1,68	1,28	1,02	0,67	0,80	0,71	0,64	1,05	1,56	2,23	3,00	-0,59
	3 (corte simétrico)	dG(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,10	-0,10	-0,27
		dθ(%)	-0,04	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,06
dα(%)		0,13	0,10	0,08	0,06	0,08	0,06	0,05	0,09	0,13	0,18	0,24	0,00	
dβ(%)		0,06	0,05	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,07	0,09	0,12	0,00	
dδU(%)		1,56	1,22	1,02	0,70	0,81	0,76	0,70	1,13	1,66	2,43	3,35	-0,20	
4 (fator de separação constante)	dG(%)	-15,33	-14,50	-11,38	-7,99	-4,00	0,66	7,92	14,57	21,94	30,42	37,35	44,87	
	dθ(%)	-4,48	1,04	1,81	3,01	3,25	6,20	5,70	5,20	6,73	5,37	5,51	6,66	
	dα(%)	1,65	1,30	0,97	0,58	0,24	-0,27	-0,81	-1,24	-1,76	-2,19	-2,55	-2,96	
	dβ(%)	1,16	0,54	0,31	0,04	-0,14	-0,60	-0,82	-1,00	-1,36	-1,47	-1,64	-1,93	
	dδU(%)	2,23	-0,63	-0,85	-1,29	-1,17	-2,17	-2,01	-1,72	-2,25	-1,78	-1,69	-2,27	

TABELA 15 (cont.)

b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

b.1) Utilizando a UC-1

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-33,9717	-15,8290	167,3611	-2,0770	19,5012
2 (corte constante)	-0,2513	-0,5567	1,2017	1,0071	0,1525
3 (corte simétrico)	0,3611	-0,2276	-0,2221	1,0472	0,0216
4 (fator de separação constante)	-17,2178	-8,3080	54,4413	-1,3179	4,6396

b.2) Utilizando a UC-2

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-21,3220	-9,4150	44,5245	-0,2688	2,1087
2 (corte constante)	-0,7608	-0,5238	1,3643	0,2519	0,0383
3 (corte simétrico)	0,1772	-0,1107	-0,0996	0,3288	-0,0083
4 (fator de separação constante)	-12,3499	-5,5003	22,4664	-0,1295	0,7609
5 (eficiência constante)	-17,5031	-7,7474	34,3603	0,0170	1,2320

TABELA 16 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de vazão de alimentação e fator de separação constantes para todas as ultracentrifugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.7) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos

a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

a.1) Utilizando a UC-1

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrigão)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dθ(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dα(%)	-0,11	-0,18	-0,15	-0,20	-0,15	-0,35	-0,16	-0,40	-0,21	-0,56	-0,19	-1,98
		dβ(%)	-0,06	-0,09	-0,07	-0,10	-0,08	-0,18	-0,08	-0,21	-0,11	-0,31	-0,10	-1,37
		dδU(%)	-1,25	-2,02	-1,76	-2,37	-1,82	-4,02	-1,90	-4,62	-2,45	-6,43	-2,30	-20,45
	2 (corte constante)	dG(%)	19,55	14,91	10,28	5,56	1,37	-4,76	-11,06	-15,81	-21,28	-25,55	-28,85	-32,54
		dθ(%)	-2,67	-4,53	-3,88	-5,34	-4,05	-9,26	-4,23	-10,70	-5,57	-14,91	-5,21	-43,92
		dα(%)	-1,40	-1,07	-0,75	-0,40	-0,05	0,46	1,00	1,46	2,00	2,46	2,84	2,97
		dβ(%)	-0,46	-0,16	-0,05	0,24	0,29	0,97	0,82	1,57	1,41	2,41	1,79	5,11
		dδU(%)	1,54	0,97	0,77	0,26	0,54	-0,33	0,37	-0,30	1,13	-0,28	2,61	-19,86
	3 (corte simétrico)	dG(%)	20,72	16,17	11,78	7,09	2,78	-3,27	-9,65	-14,45	-20,26	-25,03	-28,71	-32,97
		dθ(%)	-2,28	-4,23	-3,66	-5,22	-4,01	-9,35	-4,47	-11,03	-6,06	-15,46	-5,94	-44,37
		dα(%)	-1,49	-1,19	-0,87	-0,51	-0,16	0,33	0,87	1,35	1,92	2,43	2,86	3,05
		dβ(%)	-0,54	-0,24	-0,12	0,17	0,24	0,91	0,78	1,54	1,41	2,44	1,85	5,21
		dδU(%)	1,42	0,91	0,77	0,30	0,55	-0,29	0,43	-0,22	1,23	-0,08	2,97	-19,54
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	2,21	-0,67	-0,94	-1,46	-1,33	-2,63	-2,37	-1,99	-2,76	-2,12	-1,99	-2,63
dθ(%)		-6,62	-3,21	-1,89	-2,35	-0,86	-3,72	0,99	-6,36	0,31	-10,88	-0,70	-40,67	
dα(%)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
dβ(%)		0,55	0,25	0,15	0,18	0,06	0,28	-0,07	0,49	-0,03	0,84	0,06	3,18	
dδU(%)		2,09	-0,93	-1,10	-1,69	-1,42	-3,18	-2,28	-3,03	-2,66	-4,19	-2,06	-21,21	

TABELA 16 (cont.)

a.2) Utilizando a UC-2

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dθ(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dα(%)	0,02	-0,04	-0,02	-0,07	-0,02	-0,14	-0,03	-0,14	-0,08	-0,17	-0,06	-0,64
		dβ(%)	0,01	-0,02	0,00	-0,03	-0,01	-0,07	-0,01	-0,06	-0,03	-0,08	-0,03	-0,35
		dδU(%)	0,19	-0,26	-0,10	-0,46	-0,14	-0,97	-0,18	-0,97	-0,50	-1,15	-0,41	-4,41
	2 (corte constante)	dG(%)	7,65	6,10	4,59	2,46	0,84	-1,85	-5,15	-7,09	-10,23	-12,36	-13,55	-15,61
		dθ(%)	0,26	-1,65	-0,99	-2,49	-1,16	-4,55	-1,35	-4,58	-2,73	-5,31	-2,36	-16,91
		dα(%)	-0,93	-0,74	-0,56	-0,29	-0,07	0,30	0,72	1,00	1,43	1,74	1,92	2,28
		dβ(%)	-0,47	-0,13	-0,12	0,19	0,12	0,74	0,51	1,08	1,03	1,52	1,22	3,36
		dδU(%)	0,82	0,59	0,55	0,25	0,30	-0,15	-0,16	-0,45	-0,50	-1,00	-0,61	-3,47
	3 (corte simétrico)	dG(%)	8,26	7,05	5,63	3,57	1,92	-0,62	-3,92	-5,99	-9,38	-11,88	-13,55	-16,13
		dθ(%)	0,58	-1,40	-0,78	-2,37	-1,10	-4,60	-1,52	-4,84	-3,14	-5,81	-2,99	-17,54
		dα(%)	-1,02	-0,87	-0,69	-0,44	-0,21	0,14	0,55	0,86	1,33	1,69	1,96	2,39
		dβ(%)	-0,55	-0,22	-0,22	0,10	0,04	0,67	0,46	1,06	1,04	1,57	1,31	3,51
		dδU(%)	0,81	0,61	0,59	0,31	0,35	-0,06	-0,04	-0,31	-0,35	-0,84	-0,44	-3,36
4 (fator de separação constante)	dG(%)	0,84	0,00	0,00	-0,31	-0,10	-0,62	-0,52	-0,21	-0,83	-0,10	-0,42	-0,62	
	dθ(%)	-2,32	-1,04	-0,52	-0,98	-0,02	-1,75	0,97	-2,99	0,73	-4,26	-0,20	-14,78	
	dα(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	dβ(%)	0,31	0,13	0,07	0,13	0,00	0,23	-0,12	0,40	-0,09	0,56	0,03	1,93	
	dδU(%)	0,82	-0,09	0,00	-0,33	-0,12	-0,78	-0,38	-0,53	-0,69	-0,52	-0,40	-3,69	
5 (eficiência constante)	dG(%)	3,13	3,46	4,02	4,02	4,13	4,59	4,25	5,05	4,82	5,05	6,45	7,53	
	dθ(%)	2,21	0,35	1,43	-0,18	1,23	-1,90	0,97	-1,70	-0,02	-2,74	1,02	-13,53	
	dα(%)	-0,45	-0,50	-0,58	-0,57	-0,60	-0,66	-0,60	-0,73	-0,69	-0,72	-0,91	-1,07	
	dβ(%)	-0,50	-0,28	-0,45	-0,25	-0,44	-0,08	-0,41	-0,13	-0,33	0,02	-0,57	1,21	
	dδU(%)	0,02	-0,08	-0,04	-0,14	-0,04	-0,36	-0,05	-0,36	-0,15	-0,45	-0,11	-3,25	

TABELA 16 (cont.)

b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

b.1) Utilizando a UC-1

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-1,6632	0,6632	0,0000	-2,8137	-1,3160
2 (corte constante)	48,5571	18,9278	-62,1480	0,2471	-17,2941
3 (corte simétrico)	49,4691	19,3215	-62,6805	0,2870	-17,4022
4 (fator de separação constante)	23,2887	9,6578	-42,2350	-2,0604	-13,5886

b.2) Utilizando a UC-2

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-0,2320	0,2511	0,0000	-0,4647	-0,0952
2 (corte constante)	25,8407	10,0910	-29,8636	0,0550	-2,1209
3 (corte simétrico)	27,0302	10,5482	-30,8765	0,1318	-2,1665
4 (fator de separação constante)	11,1451	4,5836	-15,2625	-0,3256	-1,4139
5 (eficiência constante)	4,6106	2,0967	-7,0328	-0,1794	-0,9530

TABELA 17 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de vazão de alimentação e parâmetros C_1 e C_5 constantes para todas as ultracentrifugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.8) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos

a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

a.1) Utilizando a UC-1

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		d θ (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		d α (%)	-0,25	-0,46	-0,38	-0,54	-0,40	-0,95	-0,42	-1,09	-0,57	-1,50	-0,53	-3,92
		d β (%)	-0,12	-0,23	-0,19	-0,27	-0,20	-0,49	-0,21	-0,58	-0,29	-0,83	-0,27	-2,75
	d δU (%)	-2,93	-5,29	-4,50	-6,32	-4,71	-10,89	-4,99	-12,47	-6,66	-16,79	-6,27	-38,61	
	2 (corte constante)	dG(%)	19,55	14,91	10,28	5,56	1,37	-4,76	-11,06	-15,81	-21,28	-25,55	-28,85	-32,54
		d θ (%)	-2,67	-4,53	-3,88	-5,34	-4,05	-9,26	-4,23	-10,70	-5,57	-14,91	-5,21	-43,92
		d α (%)	-1,54	-1,35	-0,97	-0,73	-0,30	-0,14	0,74	0,76	1,64	1,50	2,49	0,93
		d β (%)	-0,52	-0,29	-0,17	0,06	0,17	0,65	0,69	1,19	1,23	1,87	1,61	3,65
	d δU (%)	-0,18	-2,40	-2,04	-3,79	-2,42	-7,47	-2,79	-8,51	-3,23	-11,32	-1,55	-38,15	
	3 (corte simétrico)	dG(%)	20,72	16,17	11,78	7,09	2,78	-3,27	-9,65	-14,45	-20,26	-25,03	-28,71	-32,97
		d θ (%)	-2,28	-4,23	-3,66	-5,22	-4,01	-9,35	-4,47	-11,03	-6,06	-15,46	-5,94	-44,37
		d α (%)	-1,63	-1,46	-1,10	-0,85	-0,41	-0,27	0,61	0,64	1,56	1,47	2,51	1,00
		d β (%)	-0,60	-0,38	-0,24	0,00	0,12	0,60	0,65	1,16	1,23	1,90	1,67	3,75
	d δU (%)	-0,31	-2,45	-2,04	-3,76	-2,41	-7,43	-2,74	-8,43	-3,13	-11,14	-1,21	-37,90	
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	2,21	-0,67	-0,94	-1,46	-1,33	-2,63	-2,37	-1,99	-2,76	-2,12	-1,99	-2,63
d θ (%)		-6,62	-3,21	-1,89	-2,35	-0,86	-3,72	0,99	-6,36	0,31	-10,88	-0,70	-40,67	
d α (%)		-0,14	-0,28	-0,23	-0,34	-0,25	-0,60	-0,26	-0,69	-0,36	-0,94	-0,34	-1,98	
d β (%)		0,49	0,11	0,03	0,01	-0,06	-0,03	-0,20	0,11	-0,21	0,31	-0,12	1,74	
d δU (%)	0,35	-4,24	-3,85	-5,66	-4,33	-10,12	-5,36	-11,01	-6,86	-14,79	-6,04	-39,19		

TABELA 17 (cont.)

a.2) Utilizando a UC-2

		estágio													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		dθ(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dα(%)	0,27	-0,05	0,06	-0,20	0,02	-0,53	-0,02	-0,55	-0,26	-0,68	-0,23	-0,23	-2,33
		dβ(%)	0,13	-0,02	0,03	-0,10	0,02	-0,26	-0,01	-0,27	-0,13	-0,34	-0,10	-0,10	-1,29
		dδU(%)	1,95	-0,35	0,40	-1,38	0,16	-3,77	-0,17	-3,88	-1,86	-4,79	-1,58	-1,58	-15,89
	2 (corte constante)	dG(%)	7,65	6,10	4,59	2,46	0,84	-1,85	-5,15	-7,09	-10,23	-12,36	-13,55	-15,61	
		dθ(%)	0,26	-1,65	-0,99	-2,49	-1,16	-4,55	-1,35	-4,58	-2,73	-5,31	-2,36	-16,91	
		dα(%)	-0,68	-0,75	-0,48	-0,42	-0,02	-0,10	0,72	0,59	1,24	1,21	1,76	0,53	
		dβ(%)	-0,35	-0,13	-0,10	0,13	0,15	0,55	0,51	0,87	0,94	1,26	1,14	2,39	
		dδU(%)	2,60	0,50	1,05	-0,68	0,60	-2,97	-0,14	-3,37	-1,86	-4,64	-1,79	-15,06	
	3 (corte simétrico)	dG(%)	8,26	7,05	5,63	3,57	1,92	-0,62	-3,92	-5,99	-9,38	-11,88	-13,55	-16,13	
		dθ(%)	0,58	-1,40	-0,78	-2,37	-1,10	-4,60	-1,52	-4,84	-3,14	-5,81	-2,99	-17,54	
		dα(%)	-0,78	-0,88	-0,62	-0,56	-0,17	-0,26	0,56	0,45	1,14	1,17	1,79	0,64	
		dβ(%)	-0,43	-0,22	-0,19	0,04	0,07	0,48	0,46	0,85	0,94	1,31	1,23	2,53	
		dδU(%)	2,58	0,51	1,09	-0,61	0,65	-2,88	-0,02	-3,24	-1,71	-4,49	-1,62	-14,96	
4 (fator de separação constante)	dG(%)	0,84	0,00	0,00	-0,31	-0,10	-0,62	-0,52	-0,21	-0,83	-0,10	-0,42	-0,62		
	dθ(%)	-2,32	-1,04	-0,52	-0,98	-0,02	-1,75	0,97	-2,99	0,73	-4,26	-0,20	-14,78		
	dα(%)	0,25	-0,01	0,08	-0,13	0,05	-0,39	0,01	-0,41	-0,19	-0,51	-0,17	-1,71		
	dβ(%)	0,44	0,13	0,10	0,07	0,03	0,03	-0,12	0,19	-0,18	0,30	-0,05	0,97		
	dδU(%)	2,59	-0,18	0,51	-1,25	0,17	-3,58	-0,37	-3,45	-2,05	-4,18	-1,57	-15,25		
5 (eficiência constante)	dG(%)	3,13	3,46	4,02	4,02	4,13	4,59	4,25	5,05	4,82	5,05	6,45	7,53		
	dθ(%)	2,21	0,35	1,43	-0,18	1,23	-1,90	0,97	-1,70	-0,02	-2,74	1,02	-13,53		
	dα(%)	-0,20	-0,50	-0,50	-0,70	-0,56	-1,05	-0,59	-1,13	-0,88	-1,23	-1,08	-2,76		
	dβ(%)	-0,38	-0,28	-0,42	-0,31	-0,41	-0,27	-0,41	-0,34	-0,42	-0,24	-0,65	0,26		
	dδU(%)	1,78	-0,17	0,47	-1,07	0,25	-3,17	-0,03	-3,29	-1,51	-4,11	-1,29	-14,87		

TABELA 17 (cont.)

b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

b.1) Utilizando a UC-1

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-4,1912	1,6754	0,0000	-7,2902	-3,1245
2 (corte constante)	44,7380	20,1237	-62,1480	-4,3703	-18,8098
3 (corte simétrico)	45,6266	20,5213	-62,6805	-4,3323	-18,9159
4 (fator de separação constante)	20,1192	10,7605	-42,2350	-6,5716	-15,1722

b.2) Utilizando a UC-2

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-0,7352	0,7783	0,0000	-1,3651	-0,4096
2 (corte constante)	25,2060	10,6700	-29,8636	-0,8501	-2,4289
3 (corte simétrico)	26,3895	11,1296	-30,8765	-0,7740	-2,4743
4 (fator de separação constante)	10,5845	5,1336	-15,2625	-1,2273	-1,7241
5 (eficiência constante)	4,0829	2,6336	-7,0328	-1,0824	-1,2647

TABELA 18 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de fator de separação constante para todos os estágios e parâmetros C_1 e C_5 constantes para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.9) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos

a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

a.1) Utilizando a UC-1

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-3,38	-3,51	-3,92	-3,92	-4,73	-5,27	-5,14	-6,22	-6,62	-7,57	-10,95	-17,97
		d θ (%)	-1,91	-0,11	-1,30	0,31	-1,98	3,01	-2,20	3,55	-2,45	6,96	-7,88	41,47
		d α (%)	-0,11	-0,18	-0,15	-0,20	-0,15	-0,35	-0,16	-0,40	-0,21	-0,56	-0,19	-1,98
		d β (%)	0,10	-0,08	0,03	-0,13	0,07	-0,40	0,09	-0,46	0,07	-0,79	0,50	-3,24
		d δU (%)	-4,79	-5,48	-5,80	-6,16	-6,70	-8,65	-7,19	-10,00	-9,18	-12,22	-14,20	-22,66
	2 (corte constante)	dG(%)	15,51	10,87	5,96	1,43	-3,42	-9,78	-15,63	-21,05	-26,49	-31,19	-36,63	-44,67
		d θ (%)	-4,53	-4,63	-5,13	-5,05	-5,94	-6,53	-6,34	-7,53	-7,88	-8,99	-12,68	-20,67
		d α (%)	-1,40	-1,07	-0,75	-0,40	-0,05	0,46	1,00	1,46	2,00	2,46	2,84	2,97
		d β (%)	-0,30	-0,15	0,06	0,21	0,45	0,75	1,00	1,31	1,60	1,92	2,41	3,13
		d δU (%)	-2,10	-2,59	-3,38	-3,63	-4,45	-5,15	-5,05	-5,93	-5,85	-6,44	-9,88	-22,09
	3 (corte simétrico)	dG(%)	16,64	12,09	7,40	2,89	-2,08	-8,37	-14,29	-19,77	-25,54	-30,70	-36,51	-45,02
		d θ (%)	-4,15	-4,33	-4,91	-4,93	-5,90	-6,63	-6,57	-7,87	-8,36	-9,57	-13,35	-21,31
		d α (%)	-1,49	-1,19	-0,87	-0,51	-0,16	0,33	0,87	1,35	1,92	2,43	2,86	3,05
		d β (%)	-0,38	-0,23	-0,02	0,15	0,40	0,69	0,95	1,28	1,60	1,95	2,46	3,22
		d δU (%)	-2,22	-2,65	-3,38	-3,60	-4,44	-5,10	-4,99	-5,85	-5,75	-6,26	-9,57	-21,78
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	-1,24	-4,16	-4,82	-5,33	-6,00	-7,76	-7,39	-8,08	-9,20	-9,52	-12,72	-20,13
		d θ (%)	-8,40	-3,32	-3,17	-2,04	-2,82	-0,82	-1,23	-3,04	-2,15	-4,67	-8,52	-16,06
		d α (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		d β (%)	0,71	0,26	0,25	0,16	0,22	0,06	0,10	0,23	0,16	0,36	0,66	1,23
		d δU (%)	-1,57	-4,43	-5,17	-5,51	-6,32	-7,86	-7,55	-8,50	-9,38	-10,11	-13,99	-23,40

TABELA 18 (cont.)

a.2) Utilizando a UC-2

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-0,10	-0,21	-0,73	-0,63	-1,36	-1,88	-1,67	-2,72	-3,03	-3,76	-6,48	-12,23
		dθ(%)	-1,93	-0,13	-1,32	0,29	-1,80	1,13	-1,89	0,27	-1,81	0,02	-6,05	2,74
		dα(%)	0,02	-0,04	-0,02	-0,07	-0,02	-0,14	-0,03	-0,14	-0,08	-0,17	-0,06	-0,64
		dβ(%)	0,27	0,00	0,16	-0,07	0,23	-0,21	0,23	-0,09	0,20	-0,09	0,76	-0,64
		dδU(%)	-0,02	-0,48	-0,91	-1,09	-1,63	-2,72	-2,03	-3,67	-3,66	-4,87	-7,66	-15,42
	2 (corte constante)	dG(%)	7,54	5,88	3,83	1,82	-0,53	-3,69	-6,74	-9,61	-12,95	-15,66	-19,15	-25,93
		dθ(%)	-1,68	-1,78	-2,30	-2,21	-2,94	-3,48	-3,22	-4,32	-4,49	-5,28	-8,27	-14,63
		dα(%)	-0,93	-0,74	-0,56	-0,29	-0,07	0,30	0,72	1,00	1,43	1,74	1,92	2,28
		dβ(%)	-0,21	-0,11	0,04	0,16	0,36	0,60	0,76	1,05	1,27	1,52	2,02	3,06
		dδU(%)	0,61	0,37	-0,26	-0,39	-1,20	-1,92	-2,01	-3,16	-3,65	-4,73	-7,85	-14,58
	3 (corte simétrico)	dG(%)	8,14	6,82	4,86	2,92	0,53	-2,49	-5,52	-8,55	-12,12	-15,19	-19,15	-26,38
		dθ(%)	-1,36	-1,53	-2,09	-2,09	-2,88	-3,52	-3,39	-4,58	-4,90	-5,79	-8,86	-15,28
		dα(%)	-1,02	-0,87	-0,69	-0,44	-0,21	0,14	0,55	0,86	1,33	1,69	1,96	2,39
		dβ(%)	-0,29	-0,21	-0,05	0,07	0,28	0,53	0,71	1,02	1,28	1,56	2,11	3,20
		dδU(%)	0,59	0,39	-0,22	-0,32	-1,15	-1,83	-1,89	-3,03	-3,50	-4,57	-7,69	-14,48
4 (fator de separação constante)	dG(%)	0,74	-0,21	-0,73	-0,94	-1,46	-2,49	-2,18	-2,92	-3,83	-3,86	-6,87	-12,77	
	dθ(%)	-4,21	-1,17	-1,83	-0,70	-1,83	-0,64	-0,95	-2,73	-1,09	-4,24	-6,24	-12,45	
	dα(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	dβ(%)	0,58	0,15	0,23	0,10	0,23	0,09	0,12	0,36	0,15	0,56	0,81	1,63	
	dδU(%)	0,61	-0,31	-0,80	-0,96	-1,62	-2,54	-2,23	-3,24	-3,84	-4,27	-7,66	-14,78	
5 (eficiência constante)	dG(%)	3,02	3,24	3,26	3,37	2,72	2,62	2,51	2,20	1,64	1,10	-0,44	-5,62	
	dθ(%)	0,24	0,22	0,09	0,11	-0,59	-0,79	-0,95	-1,44	-1,83	-2,71	-5,09	-11,16	
	dα(%)	-0,45	-0,50	-0,58	-0,57	-0,60	-0,66	-0,60	-0,73	-0,69	-0,72	-0,91	-1,07	
	dβ(%)	-0,24	-0,26	-0,29	-0,29	-0,21	-0,22	-0,17	-0,16	-0,09	0,01	0,22	0,91	
	dδU(%)	-0,19	-0,30	-0,84	-0,78	-1,54	-2,12	-2,12	-3,07	-3,31	-4,19	-7,39	-14,39	

TABELA 18 (cont.)

b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

b.1) Utilizando a UC-1

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-8,7293	-0,7155	16,0714	-7,5690	3,8481
2 (corte constante)	37,8823	17,2990	-56,0646	-4,6579	-12,9661
3 (corte simétrico)	38,7288	17,6872	-56,6827	-4,6200	-13,0799
4 (fator de separação constante)	14,4296	8,1559	-32,9513	-6,8525	-9,0668

b.2) Utilizando a UC-2

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	5,7106	3,6656	-9,7983	-2,1484	-1,5033
2 (corte constante)	33,3363	13,8406	-36,7357	-1,6375	-3,5004
3 (corte simétrico)	34,5967	14,3134	-37,6494	-1,5620	-3,5454
4 (fator de separação constante)	17,7654	8,1456	-23,5653	-2,0117	-2,8034
5 (eficiência constante)	10,8417	5,5740	-16,1420	-1,8680	-2,3490

TABELA 19 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de fator de separação constante para todos os estágios e eficiência constante para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.10) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos

a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

a.1) Utilizando a UC-1

		estágio													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Modelo semi-empírico (restrigão)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	0,14	0,27	0,00	0,27	0,14	0,81	0,14	0,54	0,41	0,54	0,27	1,22	
		dθ(%)	8,08	0,22	2,84	0,62	1,56	1,70	1,70	0,87	4,51	0,64	10,44	0,95	60,28
		dα(%)	-0,11	-0,18	-0,15	-0,20	-0,15	-0,35	-0,16	-0,16	-0,40	-0,21	-0,56	-0,19	-1,98
		dβ(%)	-0,68	-0,10	-0,29	-0,15	-0,20	-0,30	-0,15	-0,15	-0,54	-0,16	-1,02	-0,17	-4,06
		dδU(%)	-1,12	-1,72	-1,52	-1,97	-1,57	-3,01	-1,63	-1,63	-3,33	-2,04	-4,08	-1,93	-1,32
	2 (corte constante)	dG(%)	19,71	15,22	10,28	5,85	1,51	-3,99	-10,94	-15,36	-20,96	-25,15	-28,65	-31,72	
		dθ(%)	5,19	-4,32	-1,15	-4,75	-2,54	-7,72	-3,40	-6,67	-4,96	-6,03	-4,32	-10,11	
		dα(%)	-1,40	-1,07	-0,75	-0,40	-0,05	0,46	1,00	1,46	2,00	2,46	2,84	2,97	
		dβ(%)	-1,08	-0,16	-0,27	0,19	0,17	0,85	0,76	1,23	1,37	1,68	1,72	2,25	
		dδU(%)	1,68	1,28	1,02	0,67	0,80	0,71	0,64	1,05	1,56	2,23	3,00	-0,59	
	3 (corte simétrico)	dG(%)	20,88	16,48	11,78	7,38	2,92	-2,48	-9,52	-13,99	-19,94	-24,62	-28,52	-32,16	
		dθ(%)	5,61	-4,02	-0,92	-4,64	-2,50	-7,81	-3,64	-7,02	-5,46	-6,63	-5,05	-10,84	
		dα(%)	-1,49	-1,19	-0,87	-0,51	-0,16	0,33	0,87	1,35	1,92	2,43	2,86	3,05	
		dβ(%)	-1,16	-0,25	-0,34	0,13	0,12	0,79	0,71	1,20	1,37	1,70	1,77	2,34	
		dδU(%)	1,56	1,22	1,02	0,70	0,81	0,76	0,70	1,13	1,66	2,43	3,35	-0,20	
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	2,35	-0,40	-0,94	-1,20	-1,20	-1,84	-2,24	-1,46	-2,37	-1,59	-1,72	-1,45	
dθ(%)		0,92	-3,00	0,89	-1,74	0,69	-2,08	1,87	-2,14	0,95	-1,57	0,24	-4,90		
dα(%)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
dβ(%)		-0,07	0,24	-0,07	0,14	-0,06	0,16	-0,14	0,16	-0,07	0,12	-0,02	0,37		
dδU(%)		2,23	-0,63	-0,85	-1,29	-1,17	-2,17	-2,01	-1,72	-2,25	-1,78	-1,69	-2,27		

TABELA 19 (cont.)

b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

b.1) Utilizando a UC-1

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-18,4138	-6,8586	62,2024	-2,0770	12,8108
2 (corte constante)	23,2520	10,0412	-38,6031	1,0071	-5,4546
3 (corte simétrico)	24,0087	10,4055	-39,4669	1,0472	-5,5783
4 (fator de separação constante)	2,2878	1,4639	-6,3037	-1,3179	-1,2188

b.2) Utilizando a UC-2

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-9,2441	-3,6154	15,9222	-0,2688	1,2085
2 (corte constante)	14,4735	5,8451	-18,6963	0,2519	-0,8436
3 (corte simétrico)	15,5556	6,2846	-19,8705	0,3288	-0,8898
4 (fator de separação constante)	1,1054	0,5500	-1,7705	-0,1295	-0,1274
5 (eficiência constante)	-4,8389	-1,8410	7,7696	0,0170	0,3395

TABELA 20 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de eficiência e parâmetros C_1 e C_5 constantes para todas as ultracentrífugas (modelo descrito no tópico 3.1.1.11) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos

a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

a.1) Utilizando a UC-1

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-16,22	-12,97	-10,14	-6,76	-3,78	0,68	5,81	9,86	15,81	21,89	28,24	38,92
		d θ (%)	2,61	4,30	3,38	4,82	3,35	9,33	3,83	11,70	6,38	19,19	8,36	88,32
		d α (%)	1,44	1,03	0,76	0,40	0,18	-0,39	-0,62	-1,15	-1,38	-2,11	-2,11	-4,41
		d β (%)	0,48	0,16	0,10	-0,18	-0,17	-0,88	-0,60	-1,40	-1,15	-2,35	-1,64	-6,34
		d δU (%)	-1,12	-1,72	-1,52	-1,97	-1,57	-3,01	-1,63	-3,33	-2,04	-4,08	-1,93	-1,32
	2 (corte constante)	dG(%)	0,16	0,00	-0,89	-1,57	-2,47	-4,12	-5,89	-7,51	-8,83	-9,26	-8,75	-6,29
		d θ (%)	-0,13	-0,42	-0,63	-0,77	-0,83	-0,79	-0,56	-0,25	0,46	1,42	2,71	5,61
		d α (%)	0,13	0,13	0,16	0,20	0,28	0,42	0,54	0,70	0,81	0,87	0,86	0,42
		d β (%)	0,07	0,10	0,13	0,16	0,20	0,26	0,31	0,35	0,35	0,32	0,22	-0,18
		d δU (%)	1,68	1,28	1,02	0,67	0,80	0,71	0,64	1,05	1,56	2,23	3,00	-0,59
	3 (corte simétrico)	dG(%)	1,14	1,10	0,45	-0,14	-1,11	-2,61	-4,40	-6,01	-7,65	-8,61	-8,57	-6,88
		d θ (%)	0,27	-0,10	-0,40	-0,65	-0,79	-0,90	-0,81	-0,62	-0,06	0,77	1,92	4,76
		d α (%)	0,03	0,01	0,03	0,08	0,17	0,29	0,41	0,58	0,73	0,83	0,88	0,49
		d β (%)	-0,01	0,02	0,05	0,09	0,15	0,20	0,26	0,32	0,35	0,34	0,28	-0,08
		d δU (%)	1,56	1,22	1,02	0,70	0,81	0,76	0,70	1,13	1,66	2,43	3,35	-0,20
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	-14,36	-13,56	-10,98	-8,12	-5,07	-1,97	3,30	7,68	12,61	19,31	25,70	35,26
d θ (%)		-4,18	0,95	1,43	2,37	2,46	5,27	4,86	4,59	6,71	6,23	7,60	11,74	
d α (%)		1,55	1,21	0,91	0,60	0,33	-0,04	-0,46	-0,75	-1,17	-1,56	-1,92	-2,48	
d β (%)		1,09	0,51	0,32	0,10	-0,03	-0,42	-0,59	-0,72	-1,07	-1,22	-1,49	-2,02	
d δU (%)		2,23	-0,63	-0,85	-1,29	-1,17	-2,17	-2,01	-1,72	-2,25	-1,78	-1,69	-2,27	

TABELA 20 (cont.)

a.2) Utilizando a UC-2

		estágio													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-5,33	-5,12	-4,91	-4,08	-3,55	-2,72	-1,15	-0,84	1,15	2,19	2,40	3,76	
		dθ(%)	-1,76	0,15	-0,50	1,06	-0,28	3,31	0,00	0,00	3,44	1,57	4,45	1,36	19,29
		dα(%)	0,82	0,73	0,73	0,54	0,50	0,26	0,15	0,15	-0,02	-0,22	-0,46	-0,39	-1,15
		dβ(%)	0,62	0,33	0,41	0,11	0,28	-0,29	0,07	0,07	-0,44	-0,31	-0,78	-0,36	-2,68
		dδU(%)	0,18	-0,16	-0,05	-0,30	-0,08	-0,60	-0,11	-0,11	-0,60	-0,34	-0,69	-0,28	-1,18
	2 (corte constante)	dG(%)	1,91	0,67	-0,55	-1,71	-2,74	-4,51	-6,24	-7,86	-9,19	-10,44	-11,47	-12,43	
		dθ(%)	-1,50	-1,50	-1,48	-1,46	-1,44	-1,40	-1,35	-1,29	-1,20	-1,10	-1,03	-0,88	
		dα(%)	-0,14	0,02	0,18	0,31	0,45	0,70	0,90	1,12	1,29	1,44	1,59	1,75	
		dβ(%)	0,14	0,22	0,29	0,34	0,41	0,51	0,59	0,70	0,75	0,81	0,89	0,94	
		dδU(%)	0,82	0,69	0,60	0,41	0,36	0,23	-0,09	-0,07	-0,07	-0,34	-0,54	-0,49	-0,21
	3 (corte simétrico)	dG(%)	2,49	1,57	0,44	-0,65	-1,70	-3,32	-5,02	-6,78	-8,33	-9,94	-11,47	-12,97	
		dθ(%)	-1,19	-1,25	-1,27	-1,33	-1,38	-1,44	-1,52	-1,56	-1,63	-1,62	-1,66	-1,64	
		dα(%)	-0,24	-0,10	0,05	0,17	0,31	0,54	0,74	0,98	1,19	1,39	1,63	1,86	
		dβ(%)	0,05	0,12	0,19	0,25	0,33	0,44	0,54	0,67	0,76	0,86	0,97	1,08	
		dδU(%)	0,80	0,71	0,64	0,48	0,41	0,31	0,03	0,03	0,06	-0,18	-0,38	-0,31	-0,09
4 (fator de separação constante)	dG(%)	-4,53	-5,12	-4,91	-4,38	-3,65	-3,32	-1,66	-1,04	0,31	2,09	1,98	3,12		
	dθ(%)	-4,04	-0,89	-1,01	0,07	-0,30	1,50	0,97	0,35	2,31	0,00	1,16	1,65		
	dα(%)	0,79	0,77	0,74	0,60	0,52	0,40	0,18	0,12	-0,14	-0,29	-0,32	-0,51		
	dβ(%)	0,92	0,48	0,48	0,28	0,29	0,00	-0,04	0,02	-0,36	-0,14	-0,30	-0,46		
	dδU(%)	0,81	0,01	0,06	-0,17	-0,06	-0,41	-0,31	-0,31	-0,15	-0,53	-0,27	-0,43		
5 (eficiência constante)	dG(%)	-2,37	-1,84	-1,09	-0,22	0,44	1,75	3,05	4,17	6,02	7,35	9,01	11,57		
	dθ(%)	0,42	0,50	0,92	0,88	0,95	1,35	0,97	1,68	1,55	1,59	2,40	3,15		
	dα(%)	0,34	0,27	0,16	0,03	-0,08	-0,26	-0,42	-0,61	-0,83	-1,01	-1,24	-1,58		
	dβ(%)	0,10	0,07	-0,04	-0,10	-0,16	-0,30	-0,34	-0,51	-0,60	-0,68	-0,90	-1,16		
	dδU(%)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02		

TABELA 20 (cont.)

b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

b.1) Utilizando a UC-1

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-33,3159	-15,3927	161,4087	-2,0770	19,4531
2 (corte constante)	0,7394	-0,0412	-1,0514	1,0071	0,1123
3 (corte simétrico)	1,3579	0,2896	-2,4435	1,0472	-0,0186
4 (fator de separação constante)	-16,3956	-7,8327	51,0029	-1,3179	4,5975

b.2) Utilizando a UC-2

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-13,0095	-5,3477	23,7752	-0,2688	1,6368
2 (corte constante)	9,7240	3,9427	-13,1885	0,2519	-0,4240
3 (corte simétrico)	10,7612	4,3743	-14,4422	0,3288	-0,4704
4 (fator de separação constante)	-3,0895	-1,2572	4,8840	-0,1295	0,2952
5 (eficiência constante)	-8,7871	-3,6052	15,0703	0,0170	0,7641

TABELA 21 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de parâmetros C_1 e C_5 constantes para todas as ultracentrifugas com o cálculo dos fatores de enriquecimento e empobrecimento utilizando as equações teóricas para todos os estágios (modelo descrito no tópico 3.1.1.12) e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos

a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

a.1) Utilizando a UC-1

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-15,27	-12,57	-9,86	-6,49	-3,24	1,76	7,84	12,97	20,00	26,22	31,62	38,51
		d θ (%)	1,59	3,60	2,97	4,65	3,30	9,35	3,75	11,37	5,45	17,18	5,30	78,17
		d α (%)	1,25	0,93	0,71	0,35	0,13	-0,49	-0,79	-1,41	-1,73	-2,52	-2,50	-4,67
		d β (%)	0,48	0,16	0,11	-0,19	-0,20	-0,93	-0,67	-1,51	-1,26	-2,42	-1,62	-6,11
	d δU (%)	-2,13	-2,39	-1,93	-2,14	-1,62	-3,02	-1,84	-3,87	-3,28	-6,07	-4,76	-5,33	
	2 (corte constante)	dG(%)	1,29	0,47	-0,60	-1,28	-1,92	-3,09	-4,09	-4,89	-5,53	-6,04	-6,35	-6,56
		d θ (%)	-1,13	-1,08	-1,02	-0,94	-0,88	-0,77	-0,65	-0,54	-0,42	-0,29	-0,19	-0,08
		d α (%)	-0,06	0,03	0,11	0,16	0,23	0,31	0,37	0,43	0,45	0,45	0,46	0,14
		d β (%)	0,07	0,10	0,14	0,15	0,17	0,21	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,07
	d δU (%)	0,64	0,59	0,60	0,49	0,75	0,70	0,42	0,48	0,48	0,27	0,10	0,03	-4,63
	3 (corte simétrico)	dG(%)	2,28	1,57	0,76	0,14	-0,56	-1,57	-2,56	-3,35	-4,31	-5,37	-6,17	-7,16
		d θ (%)	-0,73	-0,77	-0,79	-0,81	-0,83	-0,87	-0,89	-0,91	-0,93	-0,93	-0,95	-0,89
		d α (%)	-0,15	-0,09	-0,02	0,04	0,12	0,19	0,24	0,32	0,37	0,42	0,48	0,21
		d β (%)	-0,01	0,02	0,06	0,08	0,12	0,16	0,18	0,21	0,24	0,27	0,30	0,16
	d δU (%)	0,52	0,53	0,60	0,53	0,76	0,75	0,48	0,56	0,56	0,38	0,30	0,38	-4,25
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	-13,40	-13,15	-10,71	-7,86	-4,53	-0,92	5,28	10,73	16,69	23,54	29,01	34,87
d θ (%)		-5,14	0,27	1,02	2,19	2,41	5,29	4,77	4,29	5,78	4,43	4,57	5,71	
d α (%)		1,36	1,11	0,86	0,56	0,28	-0,14	-0,63	-1,02	-1,52	-1,96	-2,31	-2,75	
d β (%)		1,09	0,51	0,33	0,09	-0,06	-0,47	-0,66	-0,83	-1,18	-1,29	-1,47	-1,78	
d δU (%)	1,18	-1,30	-1,26	-1,46	-1,22	-2,18	-2,22	-2,27	-3,49	-3,82	-4,53	-6,23		

TABELA 21 (cont.)
a.2) Utilizando a UC-2

		estágio													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	-5,33	-5,33	-5,22	-4,39	-3,87	-3,13	-1,78	-1,36	0,42	1,57	1,78	3,13	
		dθ(%)	-1,93	0,00	-0,65	0,95	-0,37	3,24	3,24	-0,02	3,40	1,57	4,42	1,36	19,23
		dα(%)	0,79	0,73	0,74	0,57	0,54	0,32	0,23	0,23	0,07	-0,13	-0,37	-0,29	-1,05
		dβ(%)	0,63	0,35	0,43	0,15	0,30	-0,26	0,11	0,11	-0,40	-0,27	-0,73	-0,31	-2,63
		dδU(%)	0,02	-0,33	-0,21	-0,42	-0,17	-0,67	-0,14	-0,14	-0,62	-0,33	-0,68	-0,26	-1,17
	2 (corte constante)	dG(%)	1,91	0,44	-0,87	-2,03	-3,06	-4,92	-6,84	-8,35	-9,85	-10,99	-12,01	-12,96	
		dθ(%)	-1,68	-1,65	-1,63	-1,57	-1,53	-1,46	-1,37	-1,33	-1,20	-1,12	-1,03	-0,92	
		dα(%)	-0,16	0,02	0,20	0,34	0,49	0,76	0,97	1,21	1,38	1,53	1,69	1,85	
		dβ(%)	0,15	0,23	0,31	0,37	0,43	0,55	0,64	0,74	0,80	0,86	0,93	0,99	
		dδU(%)	0,65	0,53	0,44	0,29	0,27	0,16	-0,12	-0,09	-0,33	-0,53	-0,47	-0,20	
	3 (corte simétrico)	dG(%)	2,49	1,34	0,11	-0,97	-2,02	-3,74	-5,62	-7,27	-9,00	-10,50	-12,01	-13,50	
		dθ(%)	-1,36	-1,40	-1,42	-1,44	-1,46	-1,50	-1,54	-1,61	-1,63	-1,65	-1,66	-1,68	
		dα(%)	-0,26	-0,10	0,06	0,20	0,35	0,60	0,81	1,07	1,28	1,48	1,72	1,96	
		dβ(%)	0,06	0,14	0,22	0,29	0,36	0,48	0,58	0,72	0,80	0,90	1,02	1,13	
		dδU(%)	0,63	0,54	0,48	0,36	0,32	0,24	0,00	0,04	-0,17	-0,37	-0,30	-0,08	
4 (fator de separação constante)	dG(%)	-4,53	-5,33	-5,22	-4,69	-3,97	-3,74	-2,29	-1,56	-0,41	1,46	1,35	2,49		
	dθ(%)	-4,21	-1,04	-1,17	-0,04	-0,39	1,44	0,95	0,31	0,31	2,31	-0,02	1,16	1,61	
	dα(%)	0,77	0,77	0,76	0,63	0,56	0,46	0,26	0,21	0,21	-0,05	-0,20	-0,23	-0,42	
	dβ(%)	0,93	0,50	0,50	0,31	0,31	0,03	0,00	0,06	0,06	-0,32	-0,10	-0,26	-0,41	
	dδU(%)	0,65	-0,15	-0,10	-0,29	-0,16	-0,48	-0,34	-0,17	-0,17	-0,52	-0,05	-0,26	-0,42	
5 (eficiência constante)	dG(%)	-2,37	-2,05	-1,41	-0,54	0,11	1,31	2,40	3,62	5,26	6,70	8,34	10,90		
	dθ(%)	0,24	0,35	0,77	0,77	0,86	1,28	0,95	1,64	1,55	1,57	2,40	3,11		
	dα(%)	0,32	0,27	0,17	0,06	-0,05	-0,20	-0,35	-0,52	-0,74	-0,92	-1,15	-1,48		
	dβ(%)	0,11	0,09	-0,02	-0,07	-0,13	-0,27	-0,29	-0,47	-0,56	-0,64	-0,85	-1,11		
	dδU(%)	-0,15	-0,15	-0,14	-0,10	-0,08	-0,05	-0,01	0,00	0,02	0,03	0,03	0,02		

TABELA 21 (cont.)

b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

b.1) Utilizando a UC-1

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-31,7620	-14,1012	146,7262	-2,5749	18,8202
2 (corte constante)	3,0869	1,4845	-6,6091	0,4935	-0,4182
3 (corte simétrico)	3,7198	1,8204	-7,9230	0,5334	-0,5484
4 (fator de separação constante)	-14,4474	-6,4259	42,5215	-1,8197	4,0433

b.2) Utilizando a UC-2

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-12,6347	-5,1218	22,9107	-0,3547	1,6159
2 (corte constante)	10,1967	4,1908	-13,7948	0,1656	-0,4445
3 (corte simétrico)	11,2384	4,6235	-15,0398	0,2424	-0,4909
4 (fator de separação constante)	-2,6720	-1,0215	4,1514	-0,2155	0,2746
5 (eficiência constante)	-8,3941	-3,3751	14,2666	-0,0691	0,7434

rejeito das ultracentrífugas e seu inventário gasoso) e H2 (proporcionalidade entre a pressão na extremidade dos coletores de produto e rejeito das ultracentrífugas e seu inventário gasoso), tiveram que ser adaptados, já que as constantes de proporcionalidade calculadas no ponto ótimo de operação das ultracentrífugas não podem ser utilizadas para simular seu comportamento quando estas passam a operar com valores de corte diferentes do nominal. Admitindo-se o valor correspondente à condição nominal de operação para o inventário gasoso de todas as ultracentrífugas da cascata na condição inicial de operação, as constantes de proporcionalidade passaram a ser calculadas por estágio para os dois modelos avaliados.

Após a adaptação, os dois modelos foram utilizados para a simulação de três tipos diferentes de perturbação:

- elevação de 2% em degrau na vazão de alimentação da cascata;
- retirada de 25% das ultracentrífugas do estágio correspondente à posição 0,5 da seção de enriquecimento;
- enchimento da cascata com o gás de processo na vazão de alimentação nominal.

As simulações foram feitas em um microcomputador com processador Pentium III e velocidade de processamento de 1 GHz. Para o modelo H1, a simulação dos 200 min de operação subseqüentes às duas primeiras perturbações analisadas foi feita em cerca de 30 min de processamento, com um passo de integração de $1,0 \times 10^{-2}$ min. Para o modelo H1, no caso da terceira perturbação analisada, e para o modelo H2, no caso das três perturbações analisadas, a simulação dos mesmos 200 min de operação foi feita em cerca de 5 h, com um passo de integração de $1,0 \times 10^{-3}$ min.

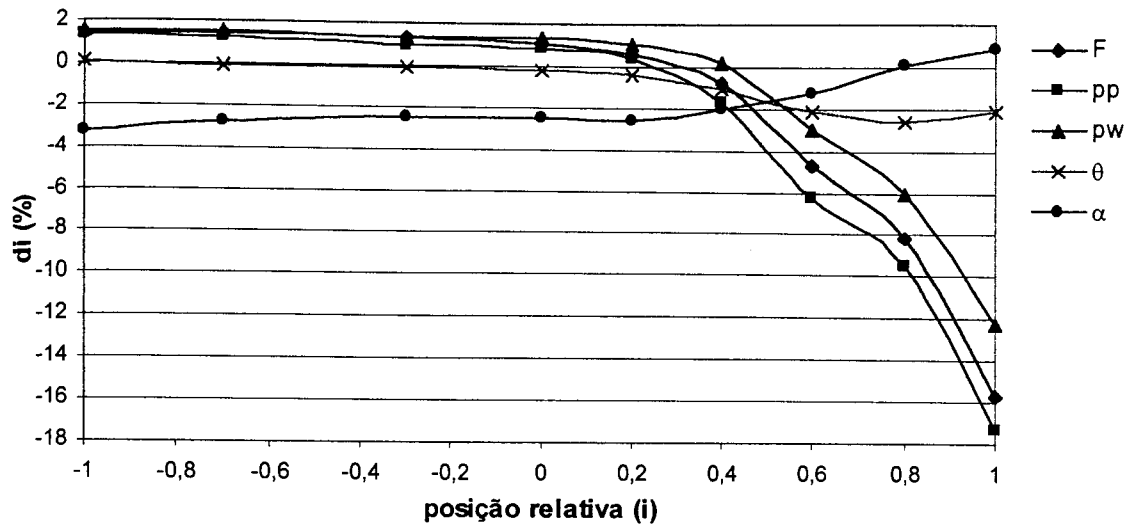
Uma vez validado o modelo estático que simula a operação de uma cascata fora da condição nominal (tópico 4.1.2), este foi utilizado para a simulação da condição final de estabilização de cada uma das perturbações estudadas. Os desvios médios relativos porcentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos H1 e H2 e os calculados utilizando-se o modelo estático e o desvio padrão associado a cada um deles, para as variáveis internas à cascata (vazão e pressão das correntes de alimentação, produto e rejeito, corte, fatores de separação, enriquecimento e empobrecimento e poder de separação das ultracentrífugas dos estágios), em

cada uma das perturbações, são mostrados na TAB.22. O comportamento dos desvios correspondentes às vazões de alimentação, cortes, pressões de produto e rejeito e fatores de separação ao longo da cascata para cada uma das perturbações é mostrado nas FIG.20 a 22. Na TAB.22, são apresentados, também, os desvios relativos percentuais entre os valores calculados utilizando-se os modelos dinâmicos e os calculados utilizando-se o modelo estático para as variáveis externas à cascata (capacidade separativa, capacidade separativa da cascata ideal equivalente, eficiência, relação P/F e razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito da cascata).

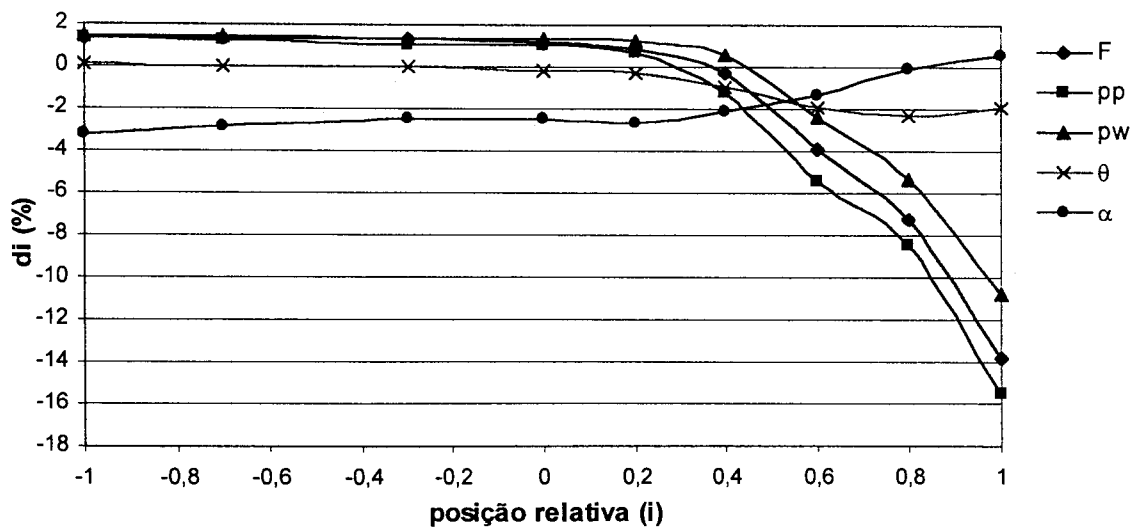
As três perturbações estudadas foram aplicadas à cascata escolhida para a obtenção dos resultados experimentais, sendo registradas, durante os transientes, as pressões das correntes de produto dos estágios e coletadas amostras das correntes de produto e rejeito da cascata para a obtenção da razão de abundância do isótopo ^{235}U por espectrometria de massas. Os resultados experimentais obtidos, juntamente com os resultados da simulação utilizando-se os modelos H1 e H2 são mostrados nas FIG.23 a 28.

TABELA 22 - Desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando os modelos dinâmicos H1 e H2 e os calculados utilizando o modelo semi-empírico estático para as três perturbações analisadas

Perturbação	Elevação em degrau na vazão de alimentação		Retirada de ultracentrifugas da cascata		Enchimento da cascata	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
Variável	desv.med.(%)	desv.med.(%)	desv.med.(%)	desv.med.(%)	desv.med.(%)	desv.med.(%)
Fi	-3,0223	-2,4711	0,4741	-4,4649	0,0000	0,0000
Pi	-4,1381	-3,4750	0,5308	-5,3573	0,0000	0,0000
Wi	-1,9309	-1,5058	0,5800	-3,6333	0,0000	0,0000
pfi	-2,8870	-2,3617	0,4728	-4,2596	0,0085	0,0085
ppi	-3,9323	-3,2978	0,4866	-5,2887	0,0022	0,0022
pwi	-1,9368	-1,5014	0,5433	-3,4997	-0,0015	-0,0015
θi	-1,2025	-1,0636	0,0804	-0,9389	-0,0039	-0,0039
αi	-1,5246	-1,6143	-2,0748	-1,3137	-2,0510	-2,0510
βi	-0,5569	0,8228	-0,9525	-0,4875	-0,9387	-0,9387
γi	-0,9772	-1,0063	-1,1275	-0,8291	-1,1211	-1,1211
δUi	-15,2706	-15,3182	-15,2039	-15,2274	-15,2541	-15,2541
ΔU	-17,4576	-17,5353	-17,3054	-17,1682	-17,4329	-17,4329
ΔU _{id}	-17,2808	-17,3611	-17,3771	-17,5527	-17,4915	-17,4915
E	0,2146	0,2116	-0,0867	-0,4635	-0,0713	-0,0713
P/F	-17,3482	-15,3656	0,2809	-17,1348	0,0000	0,0000
Rp	4,5618	2,7364	-9,9633	4,0743	-9,8361	-9,8361
Rw	10,2524	10,0167	7,7934	10,1268	7,9645	7,9645

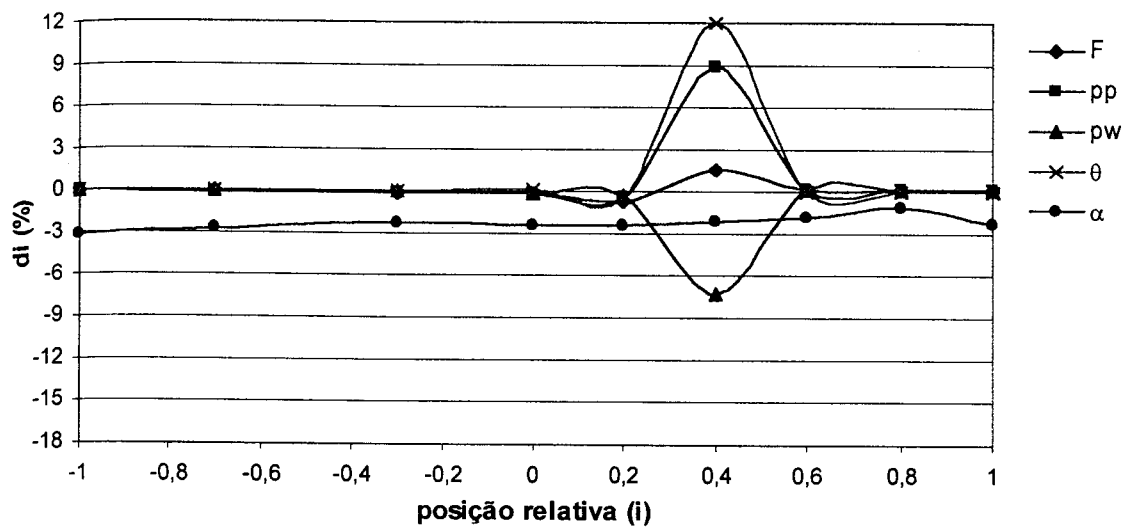


a) Utilizando o modelo H1

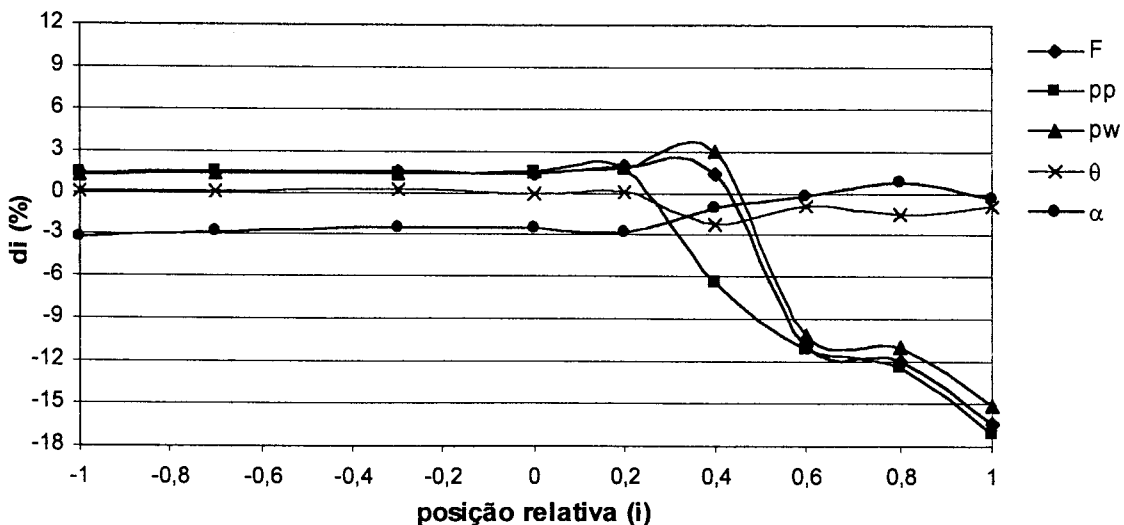


b) Utilizando o modelo H2

FIGURA 20 - Comportamento dos desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos e os valores correspondentes calculados utilizando-se o modelo semi-empírico estático ao longo da cascata para uma elevação de 2% na vazão de alimentação

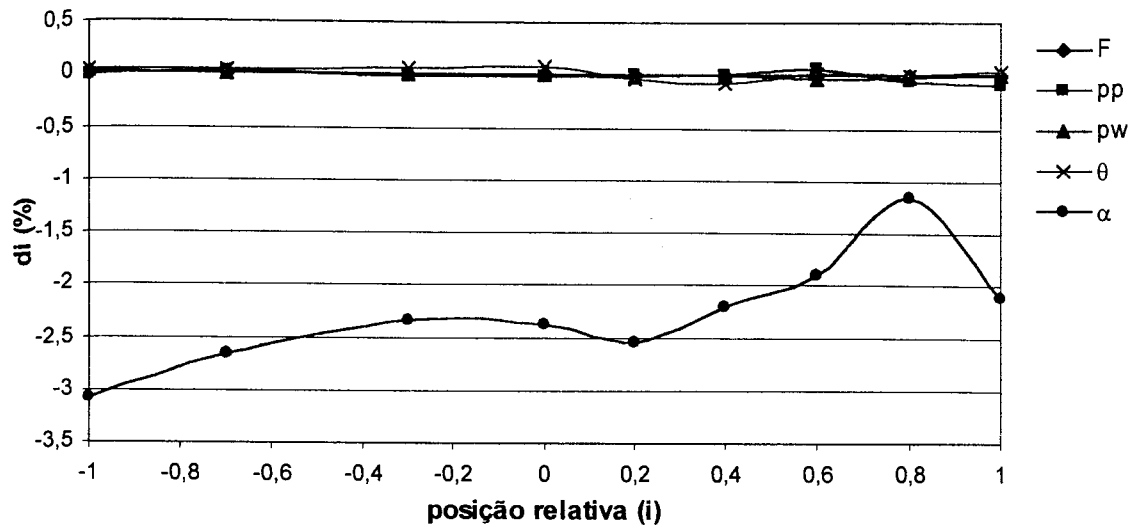


a) Utilizando o modelo H1

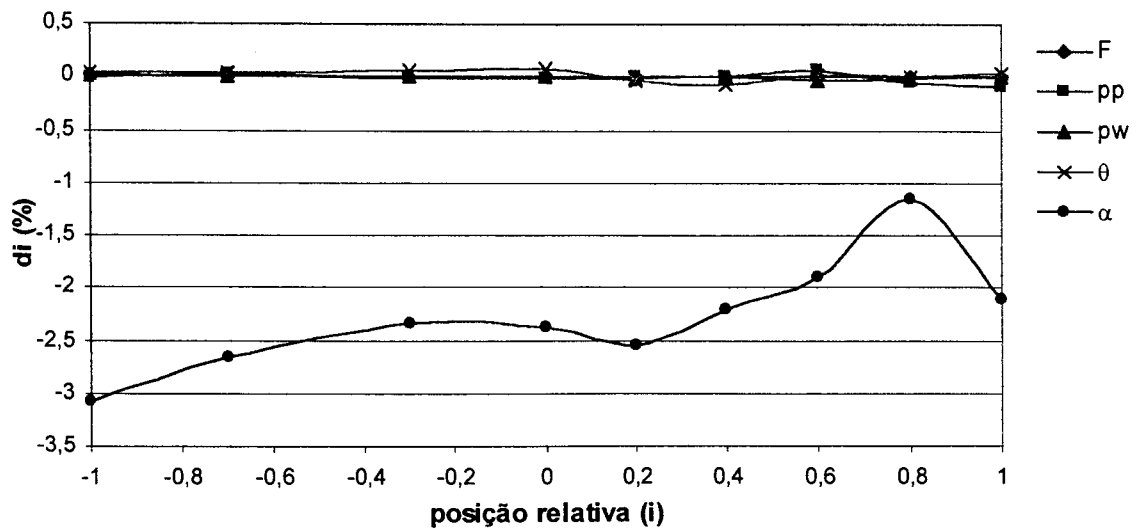


b) Utilizando o modelo H2

FIGURA 21 - Comportamento dos desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos e os valores correspondentes calculados utilizando-se o modelo semi-empírico estático ao longo da cascata para a retirada de 25% das ultracentrífugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5

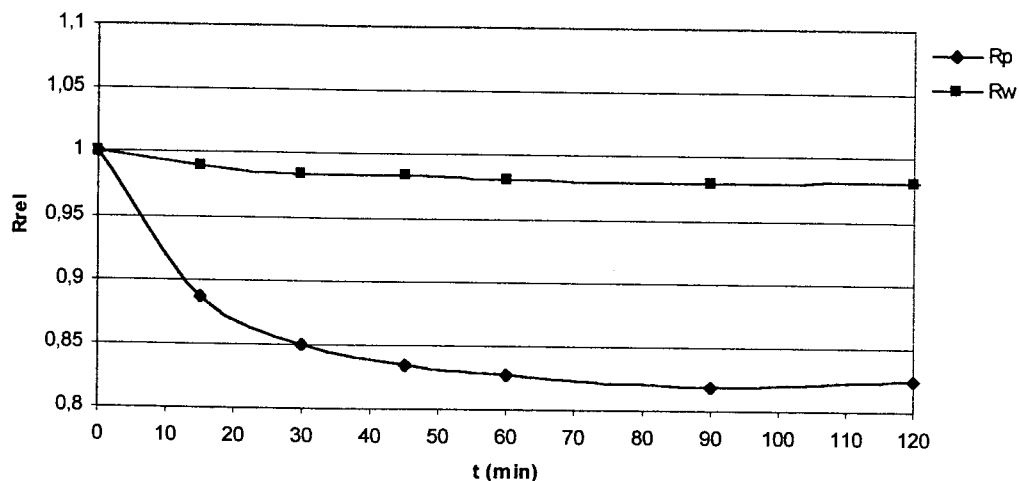


a) Utilizando o modelo H1

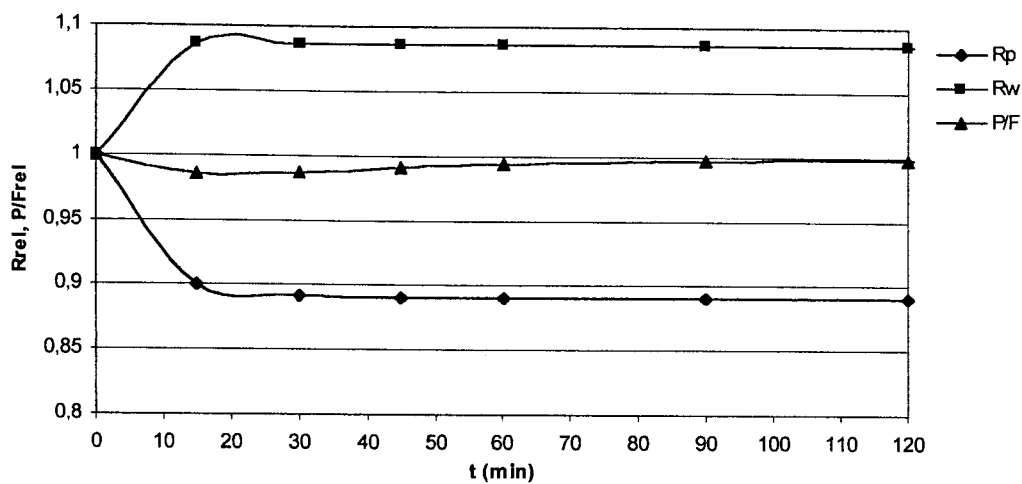


b) Utilizando o modelo H2

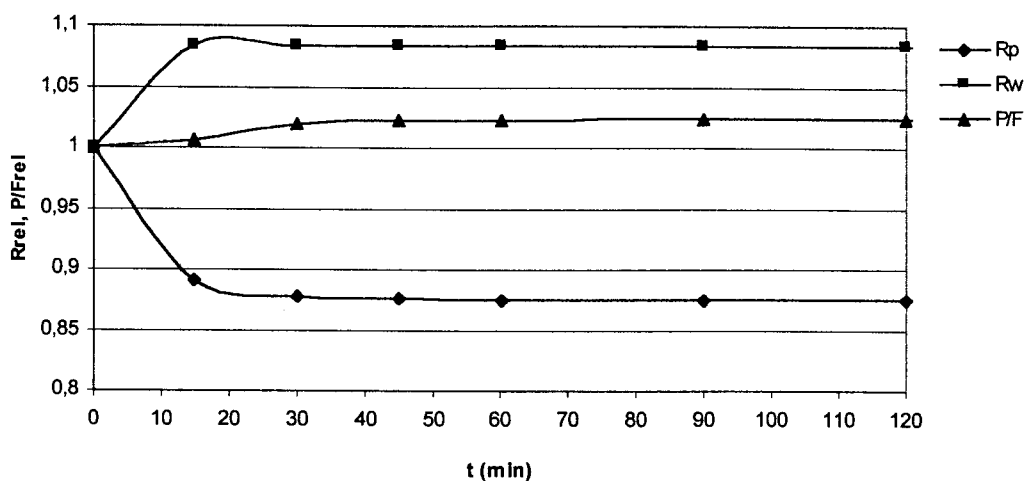
FIGURA 22 - Comportamento dos desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos e os valores correspondentes calculados utilizando-se o modelo semi-empírico estático ao longo da cascata para o enchimento com o gás de processo na vazão nominal



a) Resultados experimentais

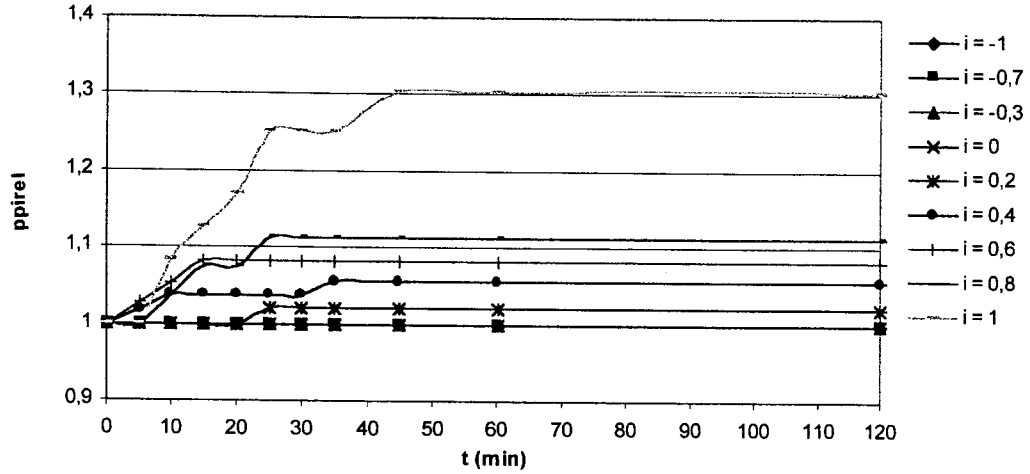


b) Resultados obtidos utilizando-se o modelo H1

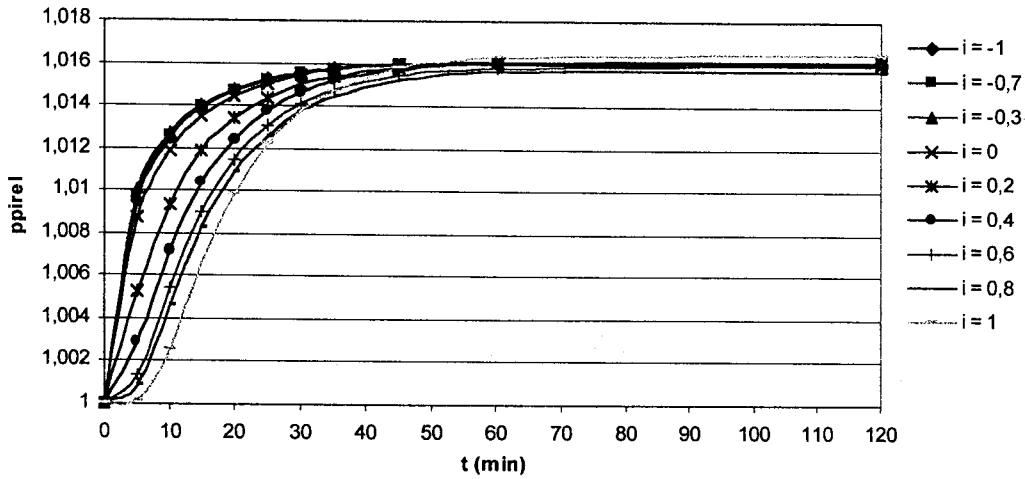


c) Resultados obtidos utilizando-se o modelo H2

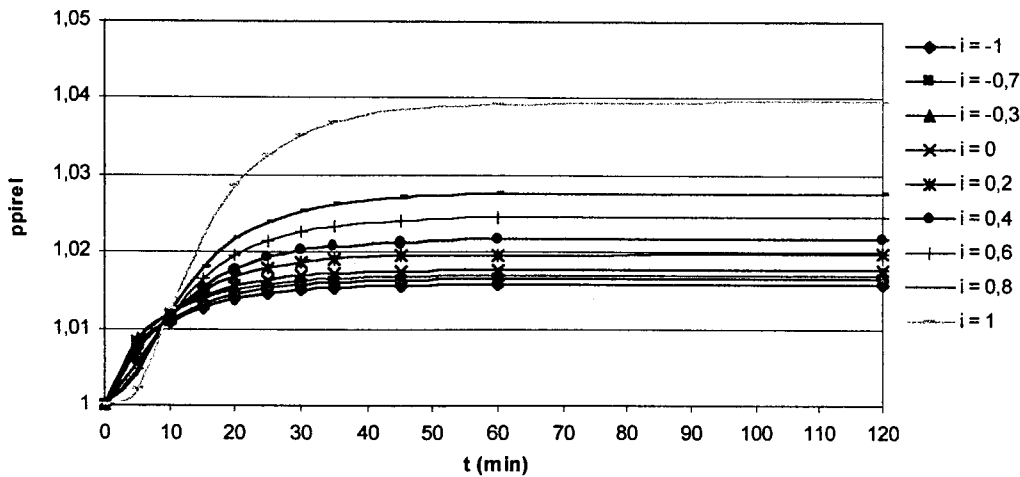
FIGURA 23 - Comportamento da razão isotópica das correntes de produto e rejeito e da relação P/F da cascata durante o transiente – elevação de 2% na vazão de alimentação da cascata



a) Resultados experimentais

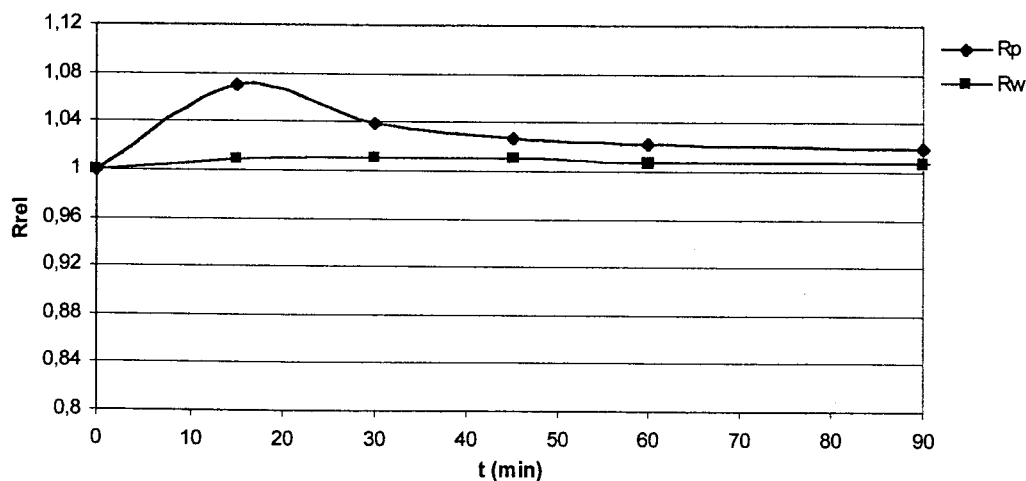


b) Resultados obtidos utilizando-se o modelo H1

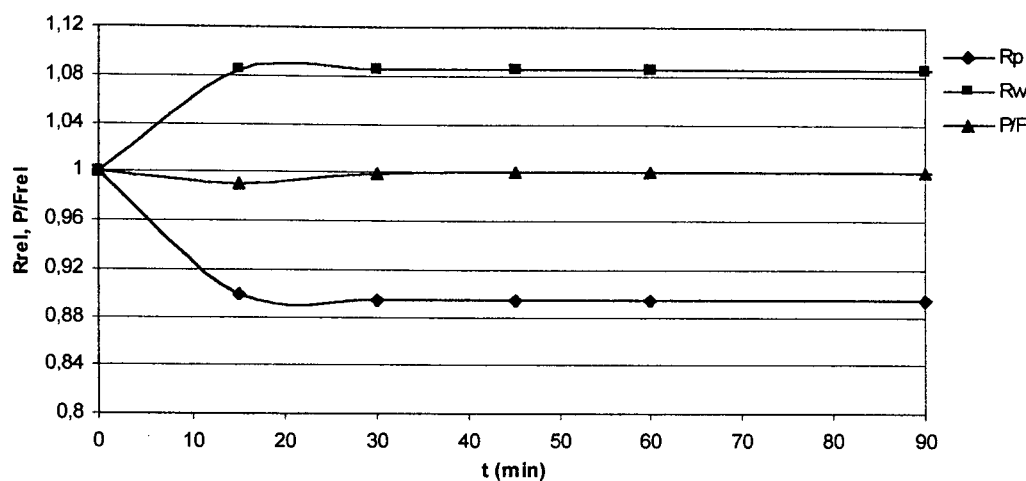


c) Resultados obtidos utilizando-se o modelo H2

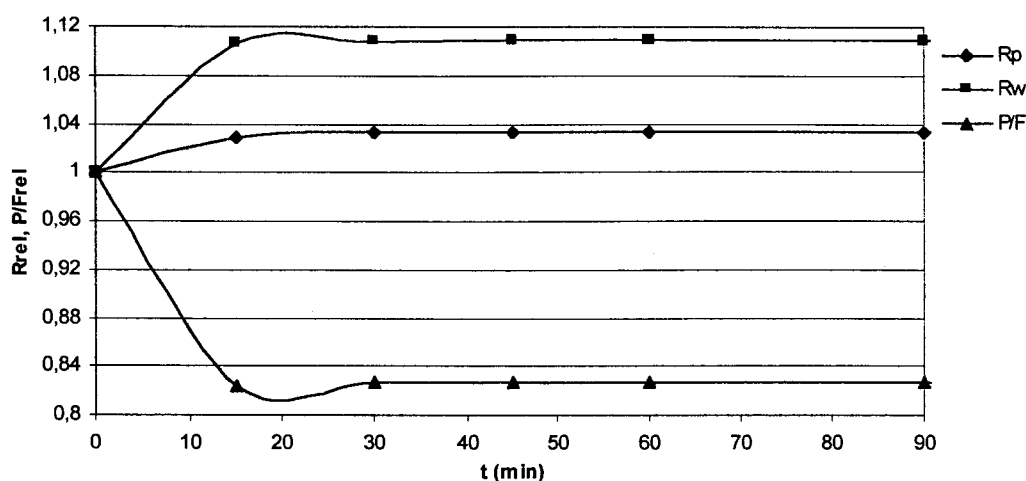
FIGURA 24 - Comportamento da pressão da corrente de produto dos estágios durante o transiente – elevação de 2% na vazão de alimentação da cascata



a) Resultados experimentais

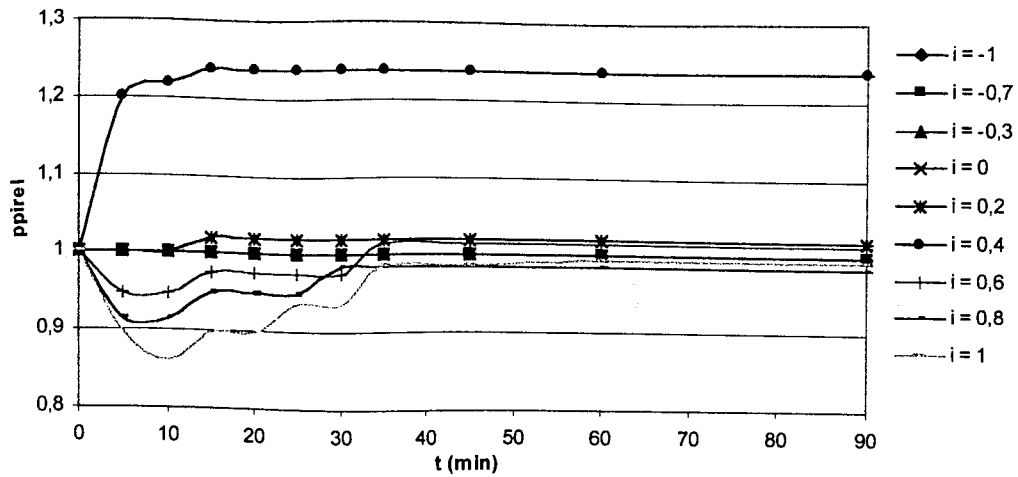


b) Resultados obtidos utilizando-se o modelo H1

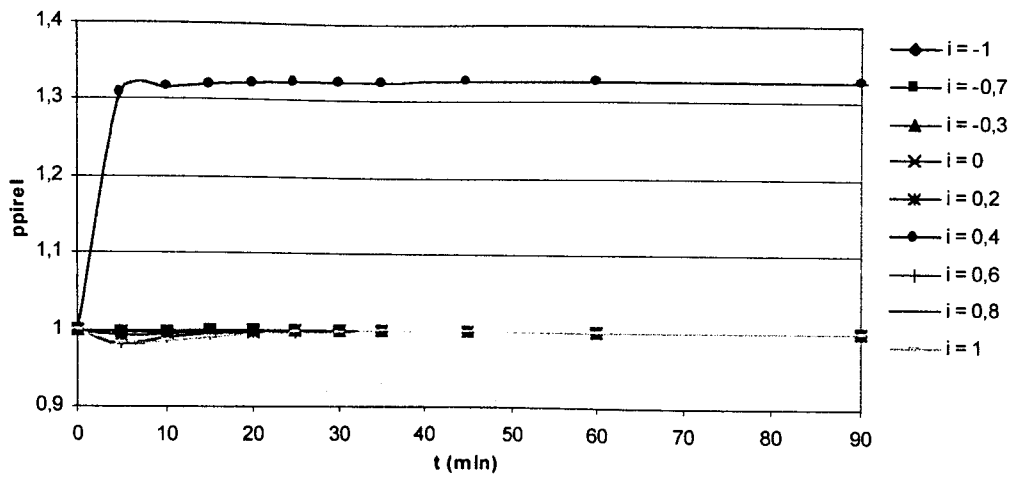


c) Resultados obtidos utilizando-se o modelo H2

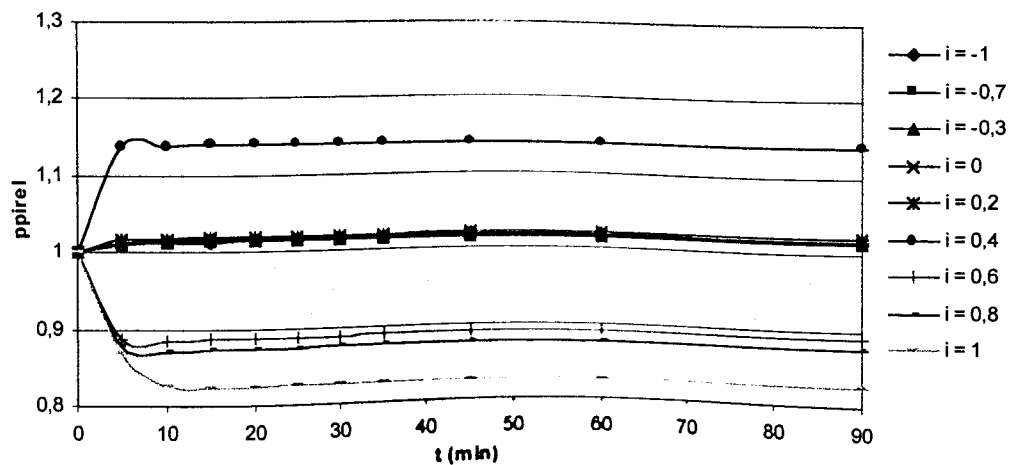
FIGURA 25 - Comportamento da razão isotópica das correntes de produto e rejeito e da relação P/F da cascata durante o transiente – retirada de 25% das ultracentrífugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5



a) Resultados experimentais

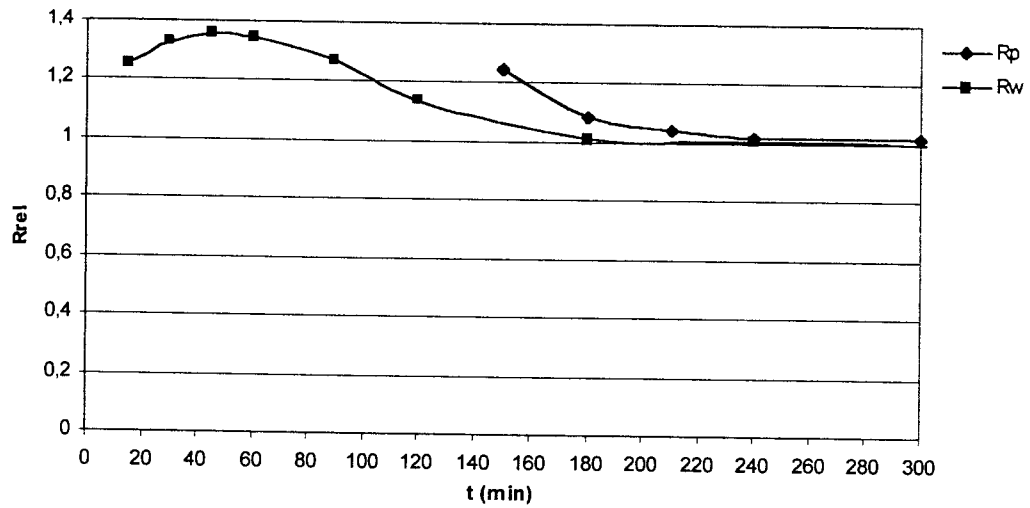


b) Resultados obtidos utilizando-se o modelo H1

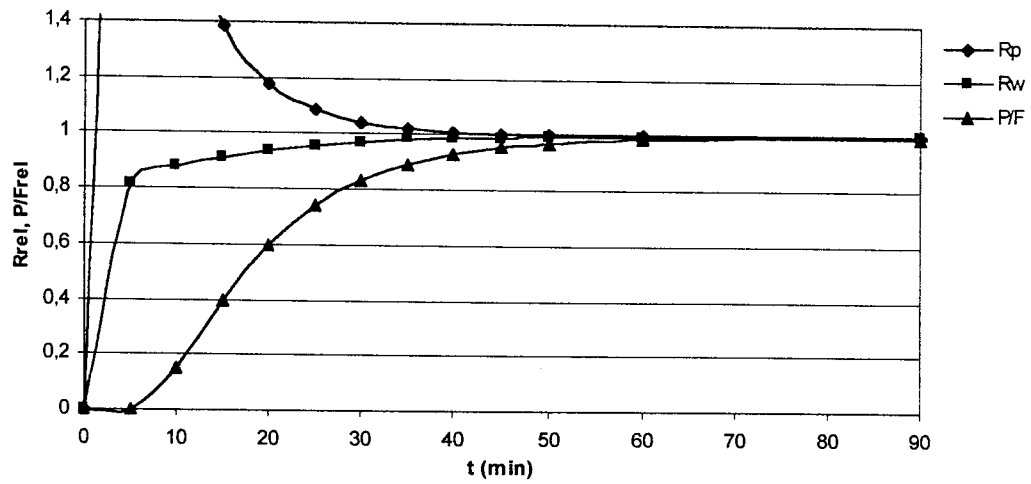


c) Resultados obtidos utilizando-se o modelo H2

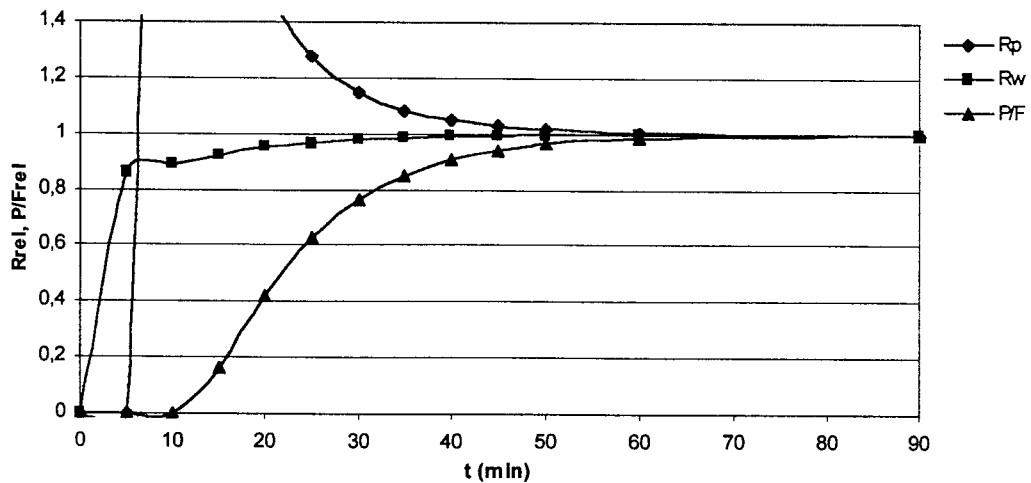
FIGURA 26 - Comportamento da pressão da corrente de produto dos estágios durante o transiente – retirada de 25% das ultracentrifugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5



a) Resultados experimentais

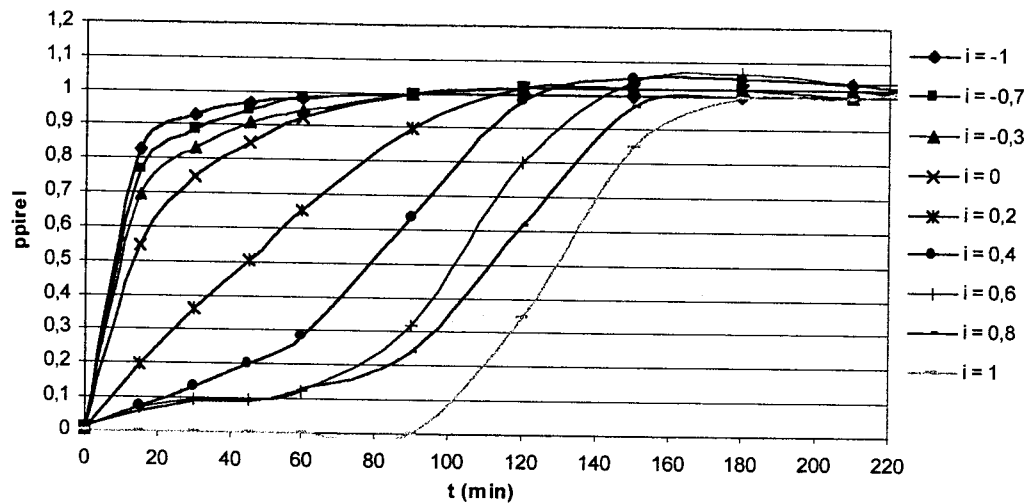


b) Resultados obtidos utilizando-se o modelo H1

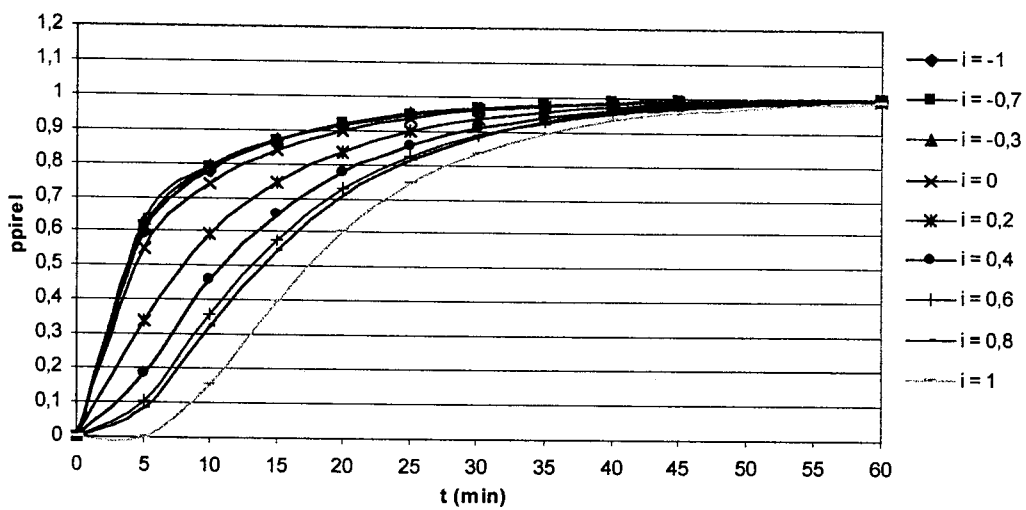


c) Resultados obtidos utilizando-se o modelo H2

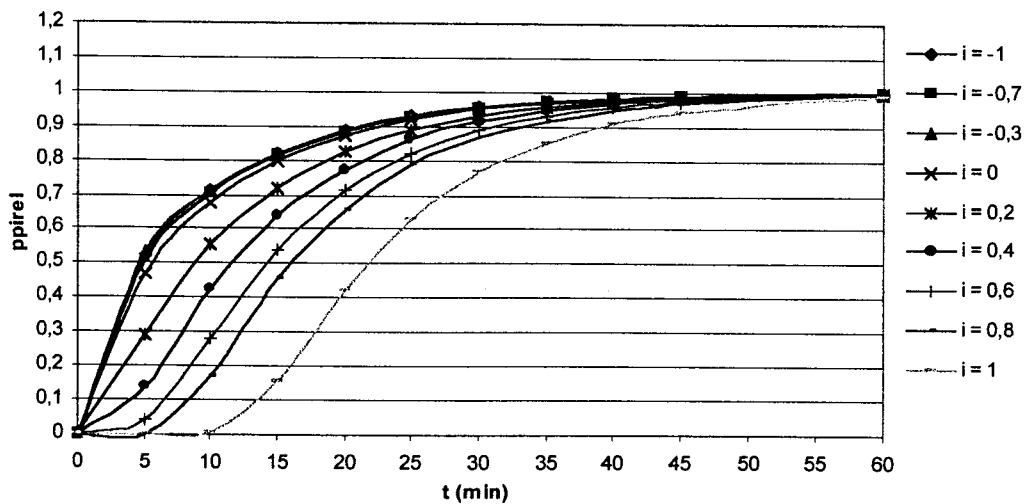
FIGURA 27 - Comportamento da razão isotópica das correntes de produto e rejeito e da relação P/F da cascata durante o transiente – enchimento da cascata com o gás de processo na vazão nominal



a) Resultados experimentais



b) Resultados obtidos utilizando-se o modelo H1



c) Resultados obtidos utilizando-se o modelo H2

FIGURA 28 - Comportamento da pressão da corrente de produto dos estágios durante o transiente – enchimento da cascata com o gás de processo na vazão nominal

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Resultados obtidos utilizando-se os modelos semi-empíricos

5.1.1 Modelos para a simulação da condição nominal de operação de uma cascata

Observando os resultados apresentados nas TAB.3 a 6 e nas FIG.11 a 14, nota-se que a influência do tipo de ultracentrífuga utilizada sobre os resultados da simulação, para uma mesma cascata, depende do modelo utilizado. Para os modelos que utilizam as restrições de corte constante (TAB.4 e FIG.12) e corte simétrico (TAB.5 e FIG.13), essa influência é menor do que para os modelos que utilizam as restrições de vazão de alimentação constante (TAB.3 e FIG.11) e fator de separação constante (TAB.6 e FIG.14), tanto no que diz respeito às variáveis internas quanto no que diz respeito às variáveis externas. Essa constatação baseia-se, para as variáveis internas, na comparação entre o formato das curvas obtidas para os dois tipos de ultracentrífuga utilizando-se cada um dos modelos e, para as variáveis externas, na diferença absoluta entre os valores dos desvios obtidos para os dois tipos de ultracentrífuga utilizando-se cada um dos modelos.

Comparando-se os resultados obtidos para as variáveis internas utilizando-se os cinco modelos propostos com a UC-2, nota-se a similaridade entre o comportamento previsto pelos modelos que utilizam as hipóteses de corte constante (FIG.12(b)) e corte simétrico (FIG.13(b)) e entre os modelos que utilizam as hipóteses de vazão de alimentação constante (FIG.11(b)) e fator de separação constante (FIG.14(b)). Essa similaridade pode ser explicada através da análise do comportamento dessas variáveis em uma ultracentrífuga¹⁷, uma vez que o corte correspondente à operação em processo de separação simétrico varia muito pouco com a vazão de alimentação e que o fator de separação varia pouco com o corte, podendo ser considerado, aproximadamente, como função apenas da vazão de alimentação. Temos, portanto, três padrões distintos de comportamento para essas variáveis, que devem ser analisados quanto à aplicabilidade no dimensionamento de cascatas.

Como pode ser observado nas figuras correspondentes, os modelos que utilizam as restrições de vazão de alimentação constante e fator de separação constante produzem, para as variáveis internas, resultados com desvio em relação aos valores ótimos praticamente constante ao longo da cascata, o que torna sua utilização viável apenas para cascatas cuja proximidade da distribuição de ultracentrífugas por estágio em relação à da cascata ideal seja grande. No caso de cascatas de escala laboratorial, onde a aproximação do número de ultracentrífugas por estágio calculado utilizando-se as equações válidas para a cascata ideal pode chegar à ordem de grandeza de 40%, a obtenção de uma solução utilizando-se esse tipo de restrição pode ser difícil ou até mesmo inviável.

Essas mesmas observações são aplicáveis ao modelo que utiliza a restrição de eficiência constante para todas as ultracentrífugas da cascata (FIG.15), o qual sofre ainda a influência do tipo de curvas experimentais apresentadas pelas ultracentrífugas a serem utilizadas, o que pode ser comprovado pelo fato de não ter sido obtida, mesmo para uma cascata bastante próxima à ideal, solução viável utilizando-se a ultracentrífuga UC-1.

Já os modelos que utilizam as restrições de corte constante ou corte simétrico apresentam uma distribuição de desvio em relação aos valores ótimos para as vazões e pressões internas que permite uma melhor acomodação das distorções necessárias ao longo da cascata e, por essa razão, apresentam solução viável para qualquer tipo de cascata.

Com relação às variáveis externas, observa-se nas TAB.3 a 7 que os modelos que utilizam as restrições de corte constante e de corte simétrico apresentam desvios entre os valores calculados e os correspondentes à cascata ideal muito menores que os outros três. Para esses outros três modelos, existe a possibilidade de, através da alteração da vazão de alimentação da cascata, estabelecer uma nova condição nominal de operação para a qual o desvio das variáveis externas em relação aos correspondentes à cascata ideal seja minimizado. Os melhores resultados relativos às variáveis externas obtidos utilizando esse recurso para esses três modelos avaliados correspondem aos valores apresentados na TAB.23. O comportamento correspondente relativo aos desvios das variáveis internas ao longo da cascata é mostrado, para os três modelos avaliados, na FIG.29.

TABELA 23 - Resultados obtidos para as variáveis externas na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão com vazão de alimentação alterada, visando ajustar a composição da corrente de produto, utilizando as restrições de vazão de alimentação constante, fator de separação constante e eficiência constante para todas as ultracentrífugas

(a) Utilizando a UC-1

Modelo (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	4 (fator de separação constante)
ΔF_c (%)	17,7	-22,1
$(R_p - R_{pid})/R_{pid}$ (%)	0,0009	13,8946
$(R_w - R_{wid})/R_{wid}$ (%)	7,839	-0,9612
$(P/F - P/Fid)/(P/Fid)$ (%)	-11,6366	-16,0229
$(\Delta U - nt \cdot \delta Uot)/(nt \cdot \delta Uot)$ (%)	0,5974	-0,4255
$(E - 100)/100$ (%)	-1,7526	-3,4096

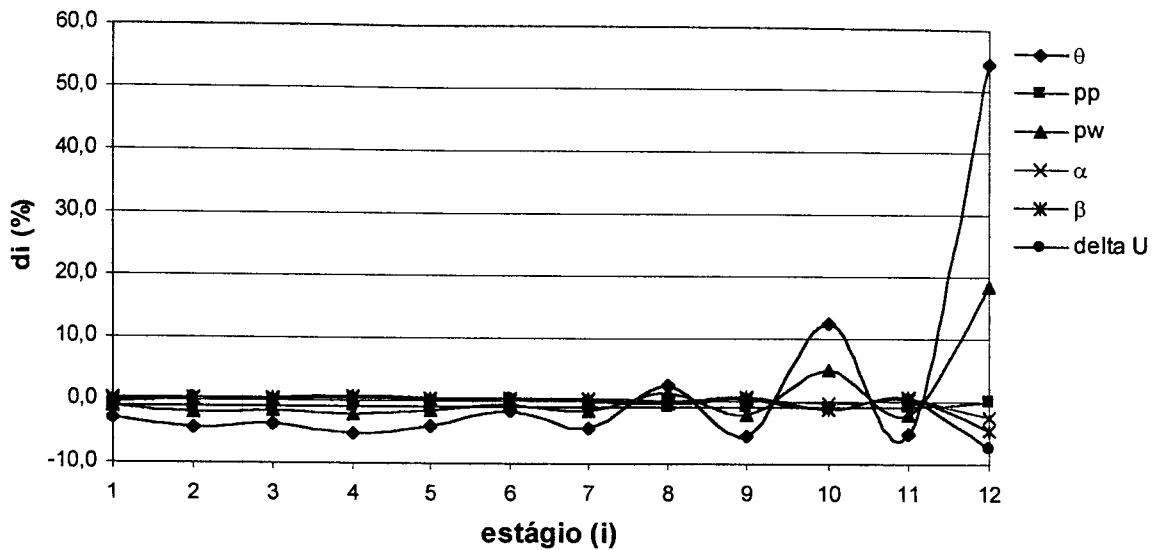
(b) Utilizando a UC-2

Modelo (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	4 (fator de separação constante)	5 (eficiência constante)
ΔF_c (%)	6,4	-28,3	3,8
$(R_p - R_{pid})/R_{pid}$ (%)	0,0016	0,482	5,6862
$(R_w - R_{wid})/R_{wid}$ (%)	5,0028	-18,4455	5,8372
$(P/F - P/Fid)/(P/Fid)$ (%)	-3,9813	13,4812	-10,6744
$(\Delta U - nt \cdot \delta Uot)/(nt \cdot \delta Uot)$ (%)	-0,0039	-1,4279	0
$(E - 100)/100$ (%)	-0,2906	-3,0823	-0,4684

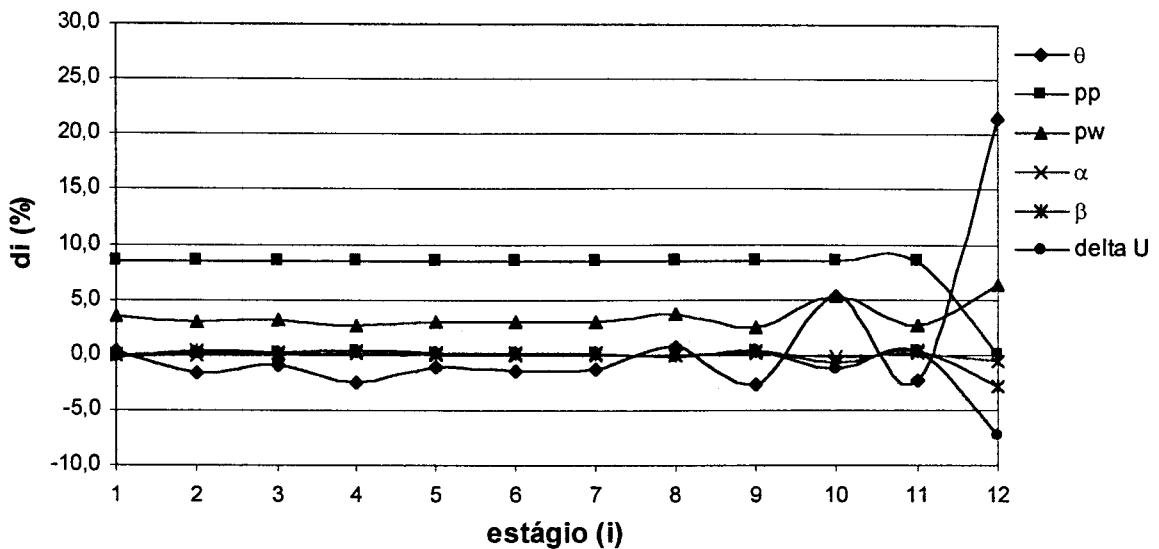
Como pode ser observado na TAB.23, não ocorre, para qualquer dos três modelos, a minimização simultânea dos desvios relativos a todas as variáveis avaliadas.

No caso da utilização da restrição de vazão de alimentação constante, foi possível, para os dois tipos de ultracentrífuga analisados, praticamente anular o desvio da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto da cascata através de uma elevação na vazão de alimentação da cascata sem grandes alterações no comportamento previsto para as variáveis internas, a menos do estágio do topo da cascata (estágio 12), como pode ser observado comparando-se a FIG.29 com a FIG.11. Porém, a razão de abundância do isótopo

^{235}U na corrente de rejeito e, conseqüentemente, a relação P/F, mantiveram um afastamento próximo a 10% em relação aos valores correspondentes à cascata ideal. Esse fato, aliado à obtenção de uma capacidade separativa instalada equivalente à obtida utilizando-se as restrições de corte constante e corte simétrico com uma vazão de alimentação superior, desfavorece a escolha desse modelo para o dimensionamento da cascata em questão.

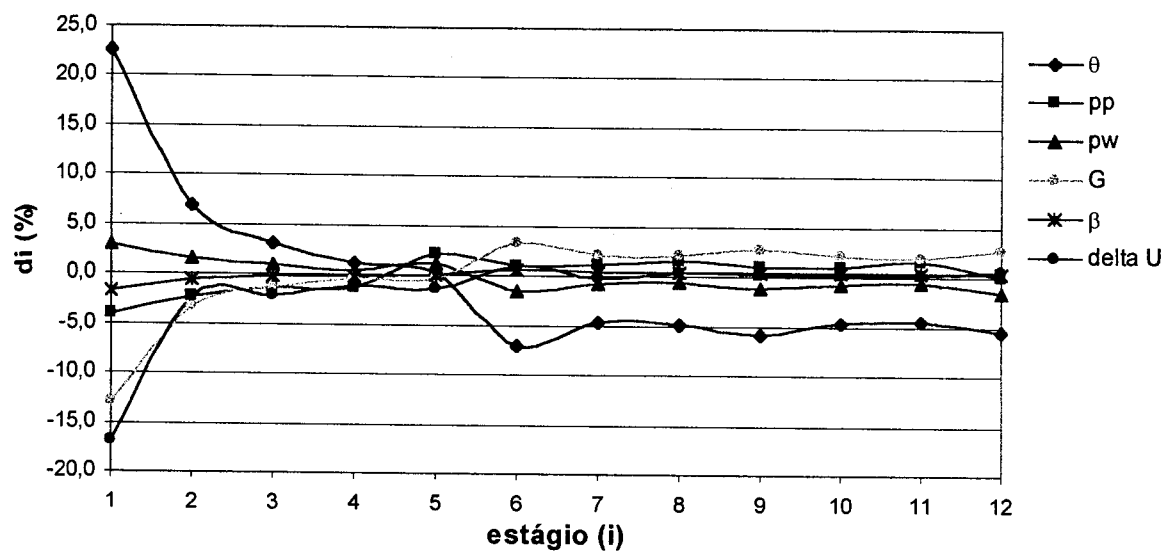


(a) Utilizando a UC-1

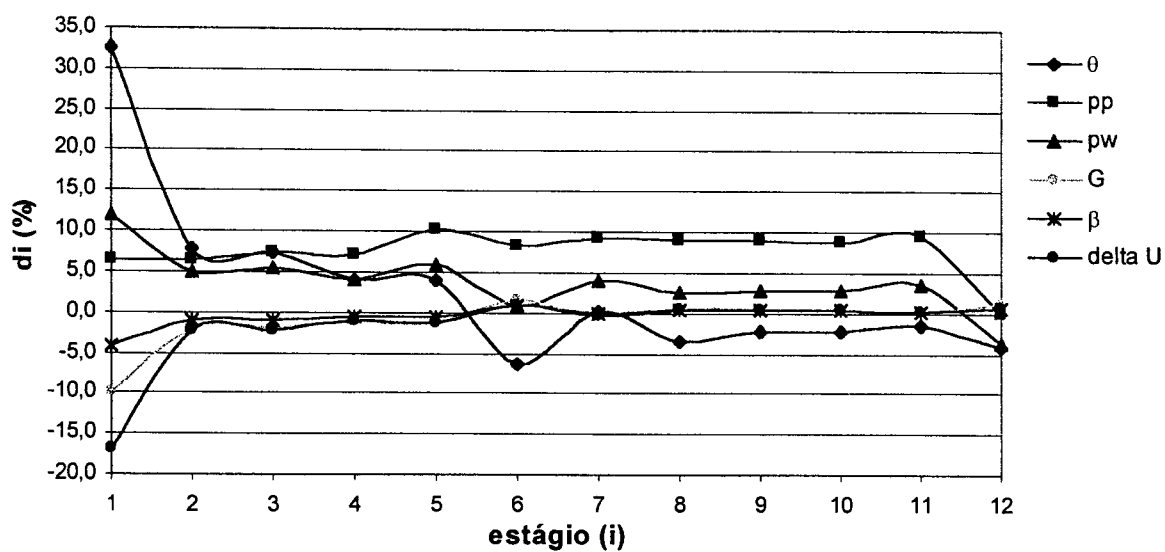


(b) Utilizando a UC-2

FIGURA 29 - Comportamento dos desvios relativos às variáveis internas alterando-se a vazão de alimentação da cascata utilizando-se a restrição de vazão de alimentação constante para todas as ultracentrífugas



(a) Utilizando a UC-1



(b) Utilizando a UC-2

FIGURA 30 - Comportamento dos desvios relativos às variáveis internas alterando-se a vazão de alimentação da cascata utilizando-se a restrição de fator de separação constante para todos os estágios

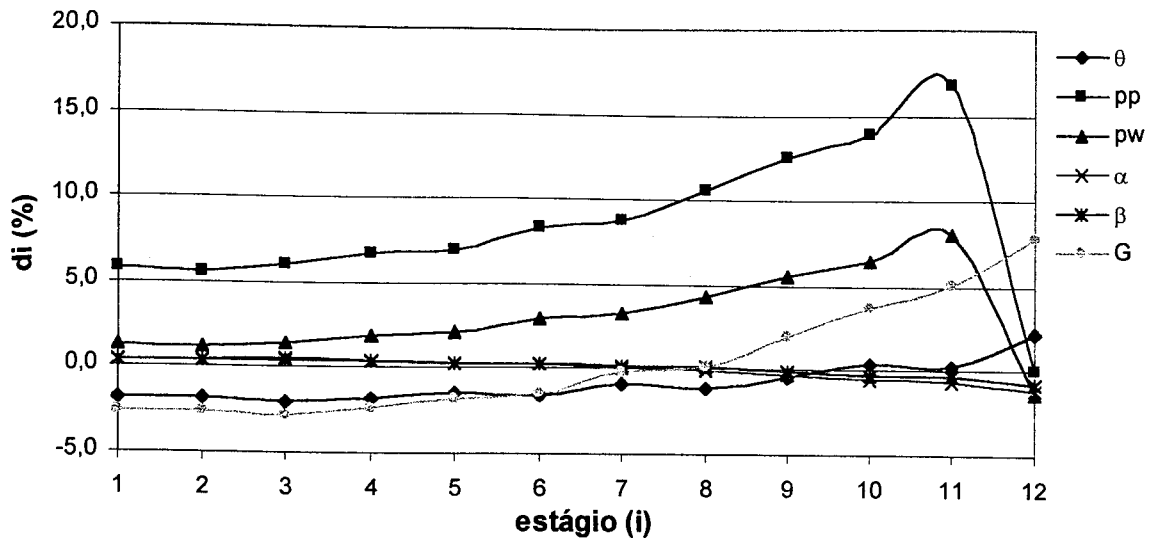


FIGURA 31 - Comportamento dos desvios relativos às variáveis internas alterando-se a vazão de alimentação da cascata utilizando-se a restrição de eficiência constante para todas as ultracentrífugas com a UC-2

No caso da utilização da restrição de fator de separação constante, foi possível minimizar o desvio da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto da cascata mantendo-o em torno de 0,5% através de uma redução de 28,3% na vazão de alimentação apenas para a ultracentrífuga UC-2, porém, mantendo elevados os desvios correspondentes às demais variáveis externas analisadas e com alterações no comportamento previsto para as variáveis internas em toda a seção de recuperação da cascata, especialmente no estágio da base da cascata (estágio 1), como pode ser observado comparando-se a FIG.30(b) com a FIG.14(b). No caso da utilização da ultracentrífuga UC-1, o afastamento da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto da cascata permaneceu em torno de 14%, considerando-se, nesse caso, inviável a minimização dos desvios pretendida. Esses fatos inviabilizam a escolha desse modelo para o dimensionamento da cascata em questão.

No caso da utilização da restrição de eficiência constante, a minimização do desvio da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto da cascata não foi satisfatória, mantendo-o em torno de 6% através de uma elevação de 3,8% na vazão de alimentação da cascata, com um desvio da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de rejeito da cascata também

em torno de 6% e com grandes alterações no comportamento previsto para as variáveis internas, como pode ser observado comparando-se a FIG.31 com a FIG.15. No caso da utilização da ultracentrífuga UC-1, nem mesmo utilizando o recurso de alteração da vazão de alimentação foi possível obter solução para o sistema de equações a ser resolvido. Esses fatos inviabilizam também a escolha desse modelo para o dimensionamento da cascata em questão. Vale a pena observar nessa figura, porém, que a solução mais próxima da equivalente à cascata ideal obtida aproximou o comportamento dos desvios relativos às variáveis internas daquele apresentado quando foram utilizadas as restrições de corte constante (FIG.12(b)) e corte simétrico (FIG.13(b)), o que pode ser considerado como um indício de que o uso dessas restrições realmente é o mais indicado para o dimensionamento da cascata em questão.

Porém, como, para esses três modelos, a influência do tipo de ultracentrífuga a ser utilizada é maior que para os outros dois, podem existir cascatas a serem construídas com ultracentrífugas que levem a melhores soluções para esse tipo de análise efetuada. Portanto, o ajuste da vazão de alimentação com a finalidade de aproximar os resultados fornecidos pelos modelos da tarefa de separação proposta é uma ferramenta cuja utilização deve ser tentada antes do descarte de qualquer dos modelos apresentados, quando estiver sendo feito o dimensionamento de uma cascata.

Com referência aos resultados obtidos nos ensaios para a validação do modelo que utiliza a restrição de corte simétrico para todos os estágios, pode-se observar, nas FIG.16 e 17, que os valores de desvio obtidos para as variáveis internas analisadas distribuem-se aleatoriamente entre os estágios, não apresentando tendência crescente ou decrescente que possa ser atribuída a uma dependência em relação à posição ao longo das cascatas. Esse fato nos permite analisar os desvios relativos a cada estágio das cascatas como variáveis independentes, justificando-se o cálculo de seus valores médios e intervalos de confiança com 95% de confiabilidade correspondentes, apresentados na TAB.8. Nota-se, também, que, no caso das pressões, os desvios calculados representam predominantemente o afastamento do modelo proposto em relação aos valores medidos, uma vez que a incerteza na medição das pressões, expressa através das barras de erro mostradas na FIG.16, é muito menor que a dispersão dos desvios ao longo da cascata na grande maioria dos casos. O mesmo, no entanto,

não pode ser dito a respeito dos fatores de separação, o que se deve à pequena quantidade de resultados experimentais disponíveis para a avaliação. Esse fato contribui para a superestimação do afastamento entre os resultados previstos pelo modelo para os fatores de separação dos estágios e os resultados experimentais.

Observando os resultados apresentados na TAB.8 para as quatro cascatas analisadas, nota-se que os valores médios e os intervalos de confiança encontrados são diferentes entre si para todas as variáveis analisadas, o que é comprovado estatisticamente utilizando-se a técnica de análise de variância⁴⁴. Essa diferença entre os resultados obtidos para as diferentes cascatas não pode, no entanto, ser atribuída somente ao tipo de cascata e ao tipo de ultracentrífuga utilizada, uma vez que ela reflete também o uso de diferentes técnicas de tratamento dos dados experimentais dos ensaios individuais das ultracentrífugas, que geram as curvas utilizadas no modelo em questão, além de diferenças na instrumentação utilizada para o registro dos valores de pressão interestágios.

A estabilidade operacional das cascatas durante os ensaios realizados, visualizada através da amplitude do intervalo de confiança calculado para a relação P/F, é outra fonte de erro que causa a superestimação dos desvios calculados, afetando todas as variáveis analisadas, mas principalmente a razão de abundância do isótopo ²³⁵U nas correntes de produto e rejeito e a capacidade separativa da cascata.

Considerando-se esses fatores que afetam os resultados experimentais ou os resultados da simulação, fazendo com que os valores reais de desvio sejam superestimados, como características de aleatoriedade da amostra utilizada, pode-se calcular os valores médios e os intervalos de confiança com 95% de confiabilidade para as variáveis analisadas utilizando-se os resultados obtidos para as quatro cascatas distintas. Desta forma, obtém-se os valores apresentados na TAB.24, que podem ser adotados como estimativa do erro do modelo proposto em relação às variáveis internas e externas analisadas, considerando-se uma oscilação de até 1,4% no valor da relação P/F medida.

Com base nos resultados apresentados na TAB.24, levando-se em consideração os fatores externos ao modelo propriamente dito que afetam os desvios calculados, e com base na experiência adquirida pelo CTMSP no projeto, implantação e operação de cascatas de separação isotópica por

ultracentrifugação, pode-se dizer que o índice de acerto obtido para o cálculo das variáveis internas e externas à cascata tornam o modelo em questão plenamente adequado à utilização para o dimensionamento de tais cascatas.

TABELA 24 - Valores médios e intervalos de confiança com 95% de confiabilidade para os desvios entre os valores calculados utilizando-se o modelo semi-empírico proposto e os valores experimentais

Variável	Desvio médio	Intervalo de confiança
dp_i (mbar)	0,4335	$-0,1300 \leq dp_i \leq 0,9970$
$d\alpha_i$	-0,0003	$-0,0389 \leq d\alpha_i \leq 0,0383$
dR_p (%)	-0,2253	$-1,5737 \leq dR_p \leq 1,1231$
dR_w (%)	0,0024	$-0,5019 \leq dR_w \leq 0,5107$
$d\Delta U$ (%)	-0,4282	$-2,1243 \leq d\Delta U \leq 1,2680$

Analisando-se a estrutura do modelo semi-empírico estudado acima, nota-se que a validação executada corresponde, na verdade, à validação da metodologia de cálculo da área das restrições físicas introduzidas nas tubulações interestágios, responsáveis pela reprodução, na prática, das vazões e pressões previstas para as ultracentrifugas de cada estágio, o que é confirmado através da reprodução do comportamento separativo previsto para as mesmas utilizando-se as curvas experimentais obtidas em ensaios individuais. Uma vez que essa mesma metodologia de cálculo também é utilizada nos outros quatro modelos semi-empíricos propostos, variando-se apenas os valores das vazões e pressões de acordo com a restrição ao comportamento dos estágios utilizada, pode-se dizer que o erro correspondente a esses outros modelos, relativo às variáveis internas e externas analisadas, também pode ser estimado através dos valores apresentados na TAB.24. O mesmo pode ser esperado com relação aos modelos apresentados nos tópicos 3.1.2.1 e 3.1.2.3, uma vez que a base teórica do modelo validado é comum a todos eles.

5.1.2 Modelos para a simulação da operação de uma cascata fora da condição nominal

Observando os resultados apresentados nas FIG.18 e 19, nota-se também a distribuição aleatória dos desvios ao longo da cascata, o que nos permite tratá-los como variáveis independentes, tornando viável o cálculo de seus valores médios e intervalos de confiança com 95% de confiabilidade, apresentados na TAB.9.

Na FIG.18, observa-se que a dispersão das pressões medidas em cada posição, representada pelas barras de erro, é muito menor que a dispersão dos desvios entre os valores de pressão calculados e medidos para diferentes posições ao longo da cascata, não contribuindo, portanto, para a superestimação dos desvios atribuídos ao modelo. Na FIG.19, não foram introduzidas barras de erro indicando a dispersão dos valores experimentais obtidos, já que foi realizado apenas um ensaio com amostragem das correntes internas por condição de operação analisada. No entanto, como a técnica utilizada para a amostragem é a mesma avaliada na validação do modelo semi-empírico que utiliza a restrição de corte simétrico para todos os estágios, descrita no tópico 5.1.1, valem as mesmas constatações feitas a partir dos resultados apresentados na FIG.17, ou seja, a dispersão obtida na medição dos fatores de separação em cada posição é superior à dispersão dos desvios entre os valores dos fatores de separação calculados e medidos para diferentes posições ao longo da cascata, o que faz com que os desvios relativos aos fatores de separação apresentados na TAB.9 também sejam superestimados.

Observando os resultados apresentados na TAB.9, nota-se que os valores médios de desvio correspondentes a todas as variáveis são diferentes para diferentes condições de operação da mesma cascata, o que é comprovado estatisticamente através da aplicação da técnica de análise de variância, a menos da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto da cascata. Observando-se a amplitude dos intervalos de confiança calculados para a relação P/F nesses ensaios, nota-se uma aparente instabilidade maior da cascata durante os mesmos, já que os valores apresentados na TAB.9 são muito superiores aos correspondentes apresentados na TAB.8. Na verdade, essa instabilidade não é real e pode ser explicada pela pequena quantidade de amostras das correntes de produto e rejeito da cascata coletadas apenas durante os ensaios, devido à curta

duração dos mesmos. Esse fato reflete-se, principalmente, na superestimação dos desvios entre os valores calculados e medidos para a razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito da cascata e, conseqüentemente, na superestimação dos desvios entre os valores calculados e medidos para os fatores de separação do estágio do topo da cascata (posição relativa $i=1$) e no estágio da base da cascata (posição relativa $i=-1$), o que pode ser observado na FIG.19, e na superestimação dos desvios entre os valores calculados e medidos para a capacidade separativa da cascata.

No caso deste modelo, foram realizados ensaios para validação utilizando-se apenas uma cascata, o que elimina a diferença entre técnicas de tratamento dos dados experimentais dos ensaios individuais das ultracentrífugas, que geram as curvas utilizadas no modelo, como fator responsável pela superestimação dos desvios obtidos entre os valores previstos e os resultados experimentais.

Calculando-se os valores médios e os intervalos de confiança com 95% de confiabilidade para as variáveis analisadas utilizando-se os resultados obtidos para as cinco condições de operação distintas, consideradas como uma amostra aleatória das condições de operação diferentes da nominal aplicáveis a uma cascata, obtém-se os resultados apresentados na TAB.25.

TABELA 25 - Valores médios e intervalos de confiança com 95% de confiabilidade para os desvios entre os valores calculados utilizando-se o modelo semi-empírico proposto e os valores experimentais

Variável	Desvio médio	Intervalo de confiança
dp_i (mbar)	1,0479	$0,8119 \leq dp_i \leq 1,2839$
$d\alpha_i$	-0,0087	$-0,0190 \leq d\alpha_i \leq 0,0016$
dR_p (%)	0,0580	$-0,7574 \leq dR_p \leq 0,8734$
dR_w (%)	-0,0389	$-0,8122 \leq dR_w \leq 0,7344$
$d\Delta U$ (%)	0,2514	$-1,4426 \leq d\Delta U \leq 1,9455$

Os valores apresentados na TAB.25 que podem ser adotados como estimativa do erro do modelo proposto em relação às variáveis internas e externas analisadas, considerando-se uma oscilação de até 0,2% no valor da relação P/F medida.

Com base nos resultados apresentados na TAB.25, levando-se em consideração os fatores externos ao modelo propriamente dito que afetam os desvios calculados, e com base na experiência adquirida pelo CTMSP no que diz respeito à operação de cascatas de separação isotópica por ultracentrifugação, pode-se dizer que o índice de acerto obtido para o cálculo das variáveis internas e externas à cascata tornam o modelo em questão plenamente adequado à utilização para a simulação do comportamento de tais cascatas fora de sua condição nominal.

Uma vez que essa mesma metodologia de cálculo validada também é utilizada nos outros dois modelos semi-empíricos apresentados no tópico 3.1.3, pode-se dizer que o erro correspondente a esses outros modelos, relativo às variáveis internas e externas analisadas, também pode ser estimado através dos valores apresentados na TAB.25.

5.2 Resultados obtidos utilizando-se os modelos teóricos

Observando os resultados apresentados nas TAB.10 a 21 - a.1 e a.2, nota-se que, para todos os modelos avaliados, o comportamento dos desvios entre os valores das variáveis internas analisadas previstos pelos modelos teóricos e os correspondentes previstos pelos modelos semi-empíricos ao longo da cascata é similar para os dois tipos de ultracentrífuga utilizados, variando apenas em intensidade, o que nos permite efetuar as comparações necessárias entre os modelos utilizando-se apenas um dos tipos de ultracentrífuga. Uma vez que, utilizando-se a ultracentrífuga UC-1, não foi possível obter solução para o modelo semi-empírico com restrição de eficiência constante para todas as ultracentrífugas, apenas a ultracentrífuga UC-2 será utilizada para a comparação entre os modelos teóricos.

Comparando-se os valores de desvio obtidos para as variáveis internas nos diferentes modelos, observa-se que, para os modelos que utilizam restrições de corte constante para todos os estágios (TAB.10 a 12 - a.2 - modelo semi-empírico 2) e vazão de alimentação constante para todas as ultracentrífugas da

casca (TAB.16 e 17 - a.2 – modelo semi-empírico 1), como era de se esperar, os desvios entre os valores calculados utilizando-se os modelos teóricos e os calculados utilizando-se o modelo semi-empírico que apresenta a mesma restrição ao comportamento dos estágios para as vazões de alimentação das ultracentrífugas e os cortes de todos os estágios são nulos. Esse fato deve-se à presença, tanto nos modelos teóricos quanto nos semi-empíricos, das série de equações (47) e (49) que, combinadas, podem ser escritas sob a forma:

$$\begin{aligned} n_1 G_1 - (1-\theta_2)n_2 G_2 &= 0 \\ -\theta_{i-1}n_{i-1}G_{i-1} + n_i G_i - (1-\theta_{i+1})n_{i+1}G_{i+1} - \delta_i F_c &= 0, \quad i=2,\dots,n-1 \\ -\theta_{n-1}n_{n-1}G_{n-1} + n_n G_n &= 0 \end{aligned} \quad (129)$$

Portanto, uma vez fixada uma das séries de variáveis que compõem esse sistema de equações (os cortes de todos os estágios ou as vazões de alimentação das ultracentrífugas de todos os estágios) em um valor constante, a outra série de variáveis que faz parte do sistema e cujo valor não foi fixado (as vazões de alimentação das ultracentrífugas de todos os estágios ou os cortes de todos os estágios) está automaticamente determinada da mesma forma, tanto nos modelos teóricos quanto nos semi-empíricos equivalentes.

Esse fato torna possível analisar, utilizando esses modelos, a eficácia da restrição complementar utilizada nos modelos teóricos para a simulação do comportamento separativo dos estágios, traduzida pelos desvios entre os valores calculados utilizando-se os modelos teóricos e os calculados utilizando-se o modelo semi-empírico correspondente, que utiliza os resultados experimentais das ultracentrífugas, para os fatores de separação e de enriquecimento e para o poder de separação das ultracentrífugas dos diferentes estágios da casca.

Observando-se os valores de desvio relativos a essas variáveis apresentados nas TAB.10 a 12 - a.2 para o modelo semi-empírico 2 (com restrição de corte constante), constata-se que a restrição complementar de eficiência constante leva aos valores mais baixos de desvio, sendo a que melhor simula o comportamento separativo das ultracentrífugas da casca, seguida pela restrição complementar de parâmetros C_1 e C_5 constantes e, finalmente, pela restrição complementar de fator de separação constante. Comparando-se os valores de desvio obtidos para todas as variáveis internas analisadas calculados

em relação aos demais modelos semi-empíricos avaliados (modelos 1, 3, 4 e 5 de cada tabela), nota-se essa mesma tendência em todos os casos.

A mesma constatação, no entanto, não é obtida quando são comparados os valores de desvio apresentados nas TAB.16 e 17 - a.2 para o modelo semi-empírico 1 (com restrição de vazão de alimentação constante). Esse fato deve-se à relação experimental entre o fator de separação de uma ultracentrífuga e sua vazão de alimentação¹⁷ que, por depender pouco do corte, leva praticamente a uma constância do fator de separação ao longo da cascata quando é utilizada a restrição de vazão de alimentação constante para as ultracentrífugas no modelo semi-empírico e justifica a obtenção de menores desvios para os fatores de separação e enriquecimento e poder de separação quando é utilizada a restrição complementar de fator de separação constante em relação aos obtidos quando é utilizada a restrição complementar de parâmetros C_1 e C_5 constantes. Essa tendência também se confirma na comparação dos desvios obtidos para todas as variáveis internas analisadas em relação aos demais modelos semi-empíricos avaliados (modelos 2, 3, 4 e 5 de cada tabela).

Continua, portanto, válida a conclusão mencionada no penúltimo parágrafo acima, que reflete-se na comparação dos desvios relativos às variáveis externas apresentados nas TAB. 10 a 12 - b.2.

Comparando-se entre si os valores dos desvios apresentados nas TAB.13 a 15 - a.2 referentes ao modelo semi-empírico 3, que apresentam em comum a utilização da restrição de corte simétrico para todos os estágios, nota-se que a combinação dessa restrição com a de eficiência constante no modelo teórico leva aos menores valores de desvio para todas as variáveis internas analisadas, seguida pela restrição complementar de parâmetros C_1 e C_5 constantes e, finalmente, pela restrição complementar de fator de separação constante. Esses fatos confirmam a conclusão mencionada no parágrafo anterior, o que pode ser observado, também, na comparação dos desvios relativos às variáveis externas apresentados nas TAB.13 a 15 - b.2. Novamente, a mesma tendência é observada na comparação dos desvios obtidos para todas as variáveis internas em relação aos valores calculados utilizando-se os demais modelos semi-empíricos avaliados (modelos 1, 2, 4 e 5 de cada tabela).

Comparando-se entre si os valores dos desvios apresentados nas TAB.18 e 19 - a.2 referentes ao modelo semi-empírico 4, que apresentam em

comum a utilização da restrição de fator de separação constante para todos os estágios, nota-se que a combinação dessa restrição com a de eficiência constante no modelo teórico leva a menores valores de desvio para todas as variáveis internas e externas analisadas que sua combinação com a restrição de parâmetros C_1 e C_5 constantes. Essa tendência também é observada quando são comparados os desvios obtidos para todas as variáveis internas em relação aos valores calculados utilizando-se os demais modelos semi-empíricos avaliados (modelos 1, 2, 3 e 5 de cada tabela).

Na comparação entre os valores de desvio apresentados nas TAB.19 e 20 - a.2 referentes ao modelo semi-empírico 5, que apresentam em comum a utilização da restrição de eficiência constante para todos os estágios, nota-se que a combinação dessa restrição com a de fator de separação constante e com a de parâmetros C_1 e C_5 constantes nos modelos teóricos correspondentes levam a valores de desvio para todas as variáveis internas analisadas que não permitem a escolha da melhor restrição complementar a ser utilizada. Quanto à comparação dos desvios obtidos para todas as variáveis internas e externas em relação aos valores calculados utilizando-se os demais modelos semi-empíricos avaliados (modelos 1, 2, 3 e 4 de cada tabela), nota-se a obtenção de valores mais baixos para os modelos 1 e 4 quando é utilizada a restrição complementar de fator de separação constante e para os modelos 2 e 3 quando é utilizada a restrição complementar de parâmetros C_1 e C_5 constantes.

Do que foi exposto acima, pode-se concluir que, exceto quando é utilizada a restrição de vazão de alimentação constante para todas as ultracentrífugas, a restrição complementar que melhor simula o comportamento separativo das ultracentrífugas de uma cascata é a de eficiência constante, seguida pela de parâmetros C_1 e C_5 constantes e, finalmente, pela de fator de separação constante. Quando é utilizada a restrição de vazão de alimentação constante para todas as ultracentrífugas, a restrição de fator de separação constante é a que melhor simula o comportamento separativo das mesmas, seguida pela restrição de parâmetros C_1 e C_5 constantes.

Tomando-se para análise comparativa os modelos que apresentaram melhores resultados nas comparações efetuadas acima (TAB.12, 15, 16, 19 e 20) adicionados ao modelo puramente teórico, que utiliza a restrição de parâmetros C_1 e C_5 constantes aliada ao cálculo teórico dos valores dos fatores de

enriquecimento e empobrecimento dos estágios (TAB.21), nota-se que nenhum deles representa bem todos os modelos semi-empíricos avaliados, principalmente em relação às variáveis externas analisadas. Deve-se observar, no entanto, que os modelos semi-empíricos 1, 4 e 5, como foi comentado no tópico 5.1.1, apresentaram, com relação às variáveis externas, grande afastamento em relação aos correspondentes à cascata ideal e à tarefa de separação proposta, o que nos levou à tentativa de minimização de tais desvios.

Utilizando-se as novas condições nominais de operação, definidas pelas vazões de alimentação que levaram aos melhores resultados para esses três modelos semi-empíricos, mostradas na TAB.23 (b), para recalcular os desvios entre os valores calculados utilizando-se os modelos teóricos avaliados e os semi-empíricos propostos relativos às variáveis internas e externas, obtivemos os resultados apresentados nas TAB.26 a 31. Os resultados mostrados nas TAB.28 a 31 foram calculados alterando-se, também para os modelos teóricos, a vazão de alimentação da cascata, a fim de minimizar o desvio da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto da cascata em relação a seu valor ideal, uma vez que, para a vazão de alimentação utilizada inicialmente, todos eles superestimavam o valor dessa variável, como pode ser verificado nas tabelas apresentadas no APÊNDICE.

Comparando-se os resultados apresentados nas TAB.26 e 27 com os mostrados nas TAB.12 e 15 - a.2, respectivamente, nota-se a redução dos desvios calculados para as variáveis internas em relação ao modelo semi-empírico 5 com vazão de alimentação corrigida, que deve-se à aproximação do comportamento dessas variáveis em relação ao simulado utilizando-se os modelos semi-empíricos 2 e 3 quando é promovida a elevação da vazão de alimentação da cascata, já mostrado na FIG.31, uma vez que os dois modelos teóricos analisados simulam quase que perfeitamente o comportamento desses dois modelos semi-empíricos. No entanto, como não foi possível, corrigindo-se a vazão de alimentação da cascata na utilização do modelo semi-empírico 5, realizar a minimização perfeita do desvio entre a razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto e seu valor ideal, os valores de desvio relativos a essas variáveis apresentados nessas tabelas ainda permaneceram elevados. Conseqüência dessa impossibilidade do ajuste desejado é, também, a manutenção em valores elevados dos desvios relativos às variáveis externas

apresentados, para esse modelo semi-empírico, nessas mesmas tabelas. Essa redução nos valores de desvio pode ser interpretada como um indício de que esses dois modelos teóricos analisados podem simular bem a operação de uma cascata projetada para operar com eficiência constante em todos os estágios, porém, com uma vazão de alimentação mais baixa.

Com relação aos desvios das variáveis internas relativos ao modelo semi-empírico 4 com vazão de alimentação corrigida, nota-se que os modelos teóricos avaliados não conseguem simular as distorções provocadas, em especial na seção de recuperação da cascata, pela redução pronunciada na vazão de alimentação necessária ao ajuste da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto, bem como a conseqüente alteração da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de rejeito e da relação P/F da cascata, mostradas na TAB.23 (b).

Com relação aos desvios das variáveis internas relativos ao modelo semi-empírico 1 com vazão de alimentação corrigida, nota-se a redução de seus valores em alguns estágios, exceto em relação às vazões de alimentação. Essa exceção deve-se à diferença entre o comportamento previsto pelos modelos teóricos, que utilizam a restrição de corte constante ou simétrico e seguem o padrão mostrado, para essas variáveis, nas FIG.12 e 13, e a constância das mesmas, utilizada como restrição no modelo semi-empírico 1. Com relação às variáveis externas, no entanto, observa-se a redução de todos os desvios apresentados.

Comparando-se os valores de desvio apresentados na TAB.28 (b) com os correspondentes mostrados na TAB.16 b.2), nota-se que a elevação da vazão de alimentação da cascata para o ajuste da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto provocou a redução dos desvios relativos às demais variáveis externas analisadas para a maioria dos modelos semi-empíricos avaliados. Mantiveram-se elevados os mesmos desvios já comentados na análise dos resultados mostrados nas TAB.26 e 27 (b), além dos correspondentes à razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de rejeito e à relação P/F da cascata relativos aos modelos semi-empíricos 2 e 3, em virtude desse modelo teórico, utilizando a mesma vazão de alimentação empregada para o ajuste do modelo semi-empírico 1, simular quase que perfeitamente os resultados previstos

TABEL 26 (cont.)

(b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-0,1751	-4,0530	3,7212	0,0211	0,1430
2 (corte constante)	0,0855	-0,1379	0,0000	0,2519	-0,0119
3 (corte simétrico)	1,0316	0,2769	-1,4442	0,3288	-0,0584
4 (fator de separação constante)	-0,6524	23,5334	-12,2395	1,4660	3,0276
5 (eficiência constante)	-5,5445	-4,8095	11,4930	0,0170	0,3219

TABELA 27 (cont.)

(b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-1,0193	-4,4238	5,1363	0,0211	0,1933
2 (corte constante)	-0,7608	-0,5238	1,3643	0,2519	0,0383
3 (corte simétrico)	0,1772	-0,1107	-0,0996	0,3288	-0,0083
4 (fator de separação constante)	-1,4925	23,0559	-11,0421	1,4660	3,0793
5 (eficiência constante)	-6,3432	-5,1774	13,0141	0,0170	0,3723

TABELA 28 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de vazão de alimentação e fator de separação constantes para todas as ultracentrífugas com vazão de alimentação 6,4% superior à utilizada inicialmente e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos com vazão de alimentação corrigida

(a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrigão)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dθ(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dα(%)	0,02	-0,04	-0,02	-0,07	-0,02	-0,04	-0,03	0,04	-0,08	0,19	-0,06	0,65
		dβ(%)	0,01	-0,02	-0,01	-0,03	-0,01	-0,01	-0,01	0,03	-0,03	0,09	-0,03	0,24
	dδU(%)	0,19	-0,26	-0,10	-0,46	-0,14	-0,23	-0,18	0,29	-0,51	1,39	-0,41	4,77	
	2 (corte constante)	dG(%)	7,65	6,10	4,59	2,46	0,84	-1,85	-5,15	-7,09	-10,23	-12,36	-13,55	-15,61
		dθ(%)	0,26	-1,65	-0,99	-2,49	-1,16	-1,55	-1,35	0,60	-2,73	5,37	-2,36	21,53
		dα(%)	-0,93	-0,74	-0,56	-0,29	-0,07	0,30	0,72	1,00	1,43	1,74	1,92	2,28
		dβ(%)	-0,47	-0,13	-0,13	0,19	0,12	0,35	0,51	0,39	1,02	0,11	1,22	-1,70
	dδU(%)	0,82	0,59	0,55	0,25	0,30	0,14	-0,16	-0,04	-0,51	-0,54	-0,62	-3,18	
	3 (corte simétrico)	dG(%)	8,26	7,05	5,63	3,57	1,92	-0,62	-3,92	-5,99	-9,38	-11,88	-13,55	-16,13
		dθ(%)	0,58	-1,40	-0,78	-2,37	-1,10	-1,59	-1,52	0,32	-3,14	4,81	-2,99	20,59
		dα(%)	-1,02	-0,87	-0,69	-0,44	-0,21	0,14	0,55	0,86	1,33	1,69	1,96	2,39
		dβ(%)	-0,55	-0,22	-0,23	0,10	0,04	0,28	0,46	0,37	1,03	0,15	1,31	-1,57
	dδU(%)	0,81	0,61	0,59	0,31	0,36	0,23	-0,04	0,09	-0,35	-0,38	-0,45	-3,07	
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	11,15	2,13	2,03	1,16	1,38	-1,54	0,21	-0,73	-0,42	-0,42	-0,21	-1,03
		dθ(%)	-24,43	-8,80	-7,89	-6,32	-4,92	5,07	-1,44	4,18	-0,48	7,83	-0,81	26,81
		dα(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		dβ(%)	4,25	1,25	1,11	0,87	0,67	-0,61	0,19	-0,52	0,06	-1,00	0,11	-3,27
	dδU(%)	20,44	2,22	2,21	0,97	1,25	-1,05	0,15	-0,48	-0,47	-0,31	-0,26	-3,64	
5 (eficiência constante)	dG(%)	2,68	2,68	2,90	2,46	1,81	1,48	0,21	-0,21	-1,95	-3,63	-4,87	-7,27	
	dθ(%)	2,03	0,09	1,05	-0,68	0,28	0,04	-0,52	1,72	-2,29	4,94	-2,59	18,84	
	dα(%)	-0,38	-0,39	-0,43	-0,35	-0,26	-0,22	-0,04	0,02	0,27	0,52	0,69	1,06	
	dβ(%)	-0,44	-0,20	-0,34	-0,09	-0,16	-0,10	0,05	-0,21	0,42	-0,40	0,66	-1,98	
dδU(%)	0,02	-0,08	-0,04	-0,14	-0,04	-0,07	-0,05	0,05	-0,15	0,02	-0,11	-2,97		

TABELA 28 (cont.)

(b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-0,0314	0,0530	0,0000	-0,0864	-0,0032
2 (corte constante)	0,2296	4,1356	-3,5877	0,1441	-0,1578
3 (corte simétrico)	1,1770	4,5681	-4,9801	0,2210	-0,2043
4 (fator de separação constante)	-0,5094	28,8199	-15,3880	1,3570	2,8772
5 (eficiência constante)	-5,4085	-0,7359	7,4930	-0,0905	0,1755

TABELA 29 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de fator de separação e eficiência constantes para todas as ultracentrífugas com vazão de alimentação 4,6% superior à utilizada inicialmente e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos com vazão de alimentação corrigida

(a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

		estágio												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	0,00	0,10	0,00	0,10	0,00	0,10	0,10	0,00	0,10	-0,10	0,00	2,09
		dθ(%)	1,78	0,15	0,56	0,26	0,22	-0,28	0,20	-0,45	0,68	-1,33	2,11	-2,58
		dα(%)	0,02	-0,04	-0,02	-0,07	-0,02	-0,04	-0,03	0,04	-0,08	0,19	-0,06	0,65
		dβ(%)	-0,23	-0,03	-0,08	-0,07	-0,03	0,03	-0,03	0,08	-0,12	0,27	-0,30	0,64
		dδU(%)	0,18	-0,16	-0,05	-0,30	-0,08	-0,15	-0,11	0,25	-0,34	1,38	-0,28	8,00
	2 (corte constante)	dG(%)	7,65	6,21	4,59	2,57	0,84	-1,74	-5,05	-7,09	-10,13	-12,45	-13,55	-13,84
		dθ(%)	2,04	-1,50	-0,43	-2,23	-0,95	-1,83	-1,16	0,15	-2,06	3,97	-0,30	18,39
		dα(%)	-0,93	-0,74	-0,56	-0,29	-0,07	0,30	0,72	1,00	1,43	1,74	1,92	2,28
		dβ(%)	-0,70	-0,15	-0,20	0,16	0,10	0,38	0,49	0,45	0,94	0,29	0,94	-1,31
		dδU(%)	0,82	0,69	0,60	0,41	0,36	0,23	-0,09	-0,07	-0,34	-0,54	-0,49	-0,21
	3 (corte simétrico)	dG(%)	8,26	7,16	5,63	3,68	1,92	-0,52	-3,82	-5,99	-9,28	-11,97	-13,55	-14,37
		dθ(%)	2,37	-1,25	-0,22	-2,11	-0,88	-1,87	-1,33	-0,13	-2,48	3,42	-0,94	17,48
		dα(%)	-1,02	-0,87	-0,69	-0,44	-0,21	0,14	0,55	0,86	1,33	1,69	1,96	2,39
		dβ(%)	-0,79	-0,24	-0,29	0,07	0,02	0,31	0,44	0,42	0,94	0,33	1,03	-1,17
		dδU(%)	0,80	0,71	0,64	0,48	0,41	0,31	0,03	0,06	-0,18	-0,38	-0,31	-0,09
4 (fator de separação constante)	dG(%)	11,15	2,24	2,03	1,27	1,38	-1,44	0,31	-0,73	-0,31	-0,52	-0,21	1,03	
	dθ(%)	-23,09	-8,67	-7,37	-6,07	-4,71	4,77	-1,24	3,72	0,20	6,40	1,29	23,54	
	dα(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	dβ(%)	4,01	1,23	1,04	0,83	0,65	-0,58	0,17	-0,47	-0,03	-0,81	-0,16	-2,88	
	dδU(%)	20,44	2,32	2,27	1,14	1,32	-0,97	0,22	-0,51	-0,30	-0,31	-0,13	-0,68	
5 (eficiência constante)	dG(%)	2,68	2,79	2,90	2,57	1,81	1,59	0,31	-0,21	-1,84	-3,73	-4,87	-5,33	
	dθ(%)	3,85	0,24	1,62	-0,42	0,50	-0,24	-0,32	1,26	-1,62	3,55	-0,54	15,78	
	dα(%)	-0,38	-0,39	-0,43	-0,35	-0,26	-0,22	-0,04	0,02	0,27	0,52	0,69	1,06	
	dβ(%)	-0,68	-0,22	-0,41	-0,12	-0,19	-0,07	0,03	-0,16	0,33	-0,22	0,38	-1,59	
	dδU(%)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	

TABELA 29 (cont.)

(b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dPIF (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	-0,0359	-0,9272	0,8386	0,0211	0,0500
2 (corte constante)	0,2251	3,1155	-2,7792	0,2519	-0,1047
3 (corte simétrico)	1,1725	3,5437	-4,1833	0,3288	-0,1512
4 (fator de separação constante)	-0,5139	27,5580	-14,6785	1,4660	2,9320
5 (eficiência constante)	-5,4128	-1,7083	8,3944	0,0170	0,2288

TABELA 30 (cont.)

(b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dP/F (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	0,0000	3,0993	-2,7778	0,0211	-0,2000
2 (corte constante)	0,2611	7,3063	-6,2658	0,2519	-0,3544
3 (corte simétrico)	1,2088	7,7519	-7,6195	0,3288	-0,4008
4 (fator de separação constante)	-0,4781	32,7422	-17,7384	1,4660	2,6747
5 (eficiência constante)	-5,3788	2,2865	4,5070	0,0170	-0,0217

TABELA 31 - Comparação entre os resultados obtidos na simulação da condição nominal de operação da cascata padrão utilizando as hipóteses de parâmetros C_1 e C_5 constantes e cálculo teórico dos fatores de enriquecimento e empobrecimento para todos os estágios com vazão de alimentação 16,1% superior à utilizada inicialmente e os obtidos utilizando os modelos semi-empíricos propostos com vazão de alimentação corrigida

(a) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis internas à cascata

		estágio													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Modelo semi-empírico (restrição)	1 (vazão de alimentação constante)	dG(%)	9,09	9,51	10,03	11,39	12,43	13,90	16,30	17,45	20,38	22,47	23,41	25,91	
		dθ(%)	-1,48	0,46	-0,17	1,43	0,13	0,59	0,52	-1,37	2,16	-5,59	1,98	1,98	-17,94
		dα(%)	-1,18	-1,29	-1,34	-1,56	-1,65	-1,85	-2,14	-2,21	-2,67	-2,66	-3,01	-3,01	-2,59
		dβ(%)	-0,37	-0,67	-0,62	-0,93	-0,80	-0,95	-1,08	-0,87	-1,54	-0,50	-1,69	-1,69	1,51
	dδU(%)	-0,06	-0,43	-0,35	-0,68	-0,53	-0,71	-0,89	-0,89	-0,63	-1,53	-0,07	-1,83	5,98	
	2 (corte constante)	dG(%)	17,44	16,19	15,08	14,13	13,38	11,79	10,31	9,13	8,07	7,33	6,68	6,26	
		dθ(%)	-1,22	-1,20	-1,16	-1,10	-1,03	-0,97	-0,84	-0,77	-0,62	-0,52	-0,43	-0,28	
		dα(%)	-2,12	-1,99	-1,87	-1,79	-1,69	-1,52	-1,41	-1,27	-1,20	-1,15	-1,09	-1,02	
		dβ(%)	-0,84	-0,78	-0,74	-0,70	-0,67	-0,60	-0,56	-0,51	-0,50	-0,48	-0,46	-0,46	
	dδU(%)	0,57	0,42	0,30	0,03	-0,09	-0,34	-0,86	-0,86	-0,95	-1,53	-1,97	-2,03	-2,07	
	3 (corte simétrico)	dG(%)	18,10	17,23	16,23	15,37	14,59	13,19	11,75	10,41	9,09	7,92	6,68	5,61	
		dθ(%)	-0,91	-0,95	-0,95	-0,97	-0,97	-1,01	-1,01	-1,05	-1,05	-1,05	-1,07	-1,04	
		dα(%)	-2,21	-2,11	-2,00	-1,93	-1,83	-1,68	-1,56	-1,40	-1,30	-1,20	-1,06	-0,91	
		dβ(%)	-0,93	-0,87	-0,83	-0,79	-0,75	-0,67	-0,61	-0,53	-0,49	-0,44	-0,38	-0,32	
	dδU(%)	0,55	0,44	0,34	0,09	-0,04	-0,25	-0,74	-0,74	-0,82	-1,37	-1,81	-1,86	-1,95	
	4 (fator de separação constante)	dG(%)	21,25	11,85	12,26	12,68	13,98	12,14	16,54	16,60	19,88	21,96	23,15	24,61	
		dθ(%)	-25,55	-8,39	-8,05	-4,97	-4,79	5,69	-0,92	2,76	1,67	1,80	1,16	4,06	
		dα(%)	-1,20	-1,25	-1,32	-1,50	-1,62	-1,81	-2,11	-2,24	-2,60	-2,84	-2,95	-3,23	
		dβ(%)	3,86	0,59	0,50	-0,03	-0,12	-1,55	-0,88	-1,41	-1,45	-1,58	-1,55	-2,04	
	dδU(%)	20,14	2,05	1,96	0,75	0,86	-1,53	-0,56	-0,56	-1,39	-1,49	-1,74	-1,68	-2,53	
5 (eficiência constante)	dG(%)	12,02	12,45	13,23	14,13	14,47	15,59	16,54	17,21	18,03	18,03	17,40	16,76		
	dθ(%)	0,52	0,55	0,88	0,74	0,41	0,63	0,00	0,33	-0,17	-0,92	-0,66	-2,48		
	dα(%)	-1,58	-1,64	-1,75	-1,84	-1,88	-2,03	-2,14	-2,23	-2,34	-2,33	-2,28	-2,20		
	dβ(%)	-0,81	-0,85	-0,94	-0,98	-0,95	-1,05	-1,02	-1,10	-1,10	-0,98	-1,01	-0,74		
dδU(%)	-0,23	-0,25	-0,28	-0,37	-0,44	-0,55	-0,76	-0,86	-1,18	-1,42	-1,54	-1,85			

TABELA 31 (cont.)

(b) Desvios relativos percentuais obtidos para as variáveis externas à cascata

Modelo semi-empírico (restrição)	dRp (%)	dRw (%)	dPIF (%)	dΔU (%)	dE (%)
1 (vazão de alimentação constante)	0,0000	5,9603	-5,3459	-0,5741	-0,5159
2 (corte constante)	0,2611	10,2840	-8,7418	-0,3448	-0,6697
3 (corte simétrico)	1,2088	10,7420	-10,0598	-0,2683	-0,7160
4 (fator de separação constante)	-0,4781	36,4256	-19,9113	0,8622	2,3498
5 (eficiência constante)	-5,3788	5,1248	1,7465	-0,5782	-0,3381

por esse último modelo, que correspondem, como já foi apresentado na TAB.23 (b), a valores mais elevados para a razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de rejeito e a valores mais baixos para a relação P/F da cascata que os correspondentes previstos utilizando-se os modelos semi-empíricos 2 e 3.

Com relação às variáveis internas, nota-se a redução dos desvios relativos aos modelos semi-empíricos 2 e 3 apresentados na TAB.28 (a) quando comparados aos apresentados na TAB.16 - a.2 para alguns estágios, com exceção das vazões de alimentação. A justificativa para essa exceção é a mesma utilizada na análise dos resultados apresentados nas TAB.26 e 27. Também da mesma forma que foi comentado com relação às TAB.26 e 27, esse modelo teórico não consegue simular as distorções provocadas pela redução pronunciada na vazão de alimentação da cascata, necessária ao ajuste dos resultados obtidos utilizando-se o modelo semi-empírico 4, apesar de ambos apresentarem a restrição de fator de separação constante em comum. Relativamente ao modelo semi-empírico 5, nota-se que o perfil do desvio das vazões de alimentação ao longo da cascata aproximou-se daquele obtido para os modelos semi-empíricos 2 e 3, porém com menor intensidade, devido ao ajuste do modelo semi-empírico 5 não ter sido bem sucedido. As demais variáveis internas apresentaram redução dos desvios, excetuando-se os cortes dos estágios 8 a 12, uma vez que a resposta obtida para essas variáveis com a elevação da vazão de alimentação quando é utilizada a restrição de vazão de alimentação constante, mostrada na FIG.29 (b) é diferente da obtida quando é utilizada a restrição de eficiência constante, mostrada na FIG.31.

Para os resultados apresentados na TAB.29, referentes ao modelo teórico que utiliza as restrições de fator de separação e eficiência constantes, valem os mesmos comentários elaborados na análise dos valores de desvio apresentados na TAB.28, referentes ao modelo teórico que utiliza as restrições de vazão de alimentação e fator de separação constantes, uma vez que ambos simulam bem o comportamento previsto para as variáveis internas e externas pelo modelo semi-empírico 1 com elevações de vazão da mesma ordem de grandeza.

Para os modelos teóricos correspondentes às hipóteses de eficiência e parâmetros C_1 e C_5 constantes (TAB.30) e de parâmetros C_1 e C_5 constantes com o cálculo teórico dos fatores de enriquecimento e empobrecimento das ultracentrífugas (TAB.31), a elevação pronunciada da vazão de alimentação,

necessária ao ajuste da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto, causou a elevação dos desvios da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de rejeito da cascata e da vazão de alimentação das ultracentrífugas de todos os estágios em relação aos simulados utilizando-se todos os modelos semi-empíricos avaliados. Esses fatos tornam os modelos em questão pouco apropriados para a simulação da condição nominal de operação de uma cascata, uma vez que a vazão de alimentação por eles determinada para a tarefa de separação especificada será, com certeza, superior àquela que deverá ser utilizada para o dimensionamento da mesma cascata, que será feito utilizando-se um dos modelos semi-empíricos propostos. Além disso, a composição isotópica calculada para a corrente de rejeito da cascata será diferente da estabelecida na tarefa de separação especificada.

Do que foi exposto nos parágrafos anteriores, pode-se concluir que os modelos teóricos mais apropriados para a simulação da condição nominal de operação de uma cascata de ultracentrífugas são os que utilizam as hipóteses de corte e eficiência constantes e corte simétrico e eficiência constante. Caso eles sejam utilizados, a vazão de alimentação estabelecida como nominal e a composição isotópica das correntes de produto e rejeito da cascata em questão estarão próximas a seus valores reais, determinados após o dimensionamento da cascata utilizando-se um dos modelos semi-empíricos propostos com os devidos ajustes necessários.

5.3 Resultados obtidos utilizando-se os modelos dinâmicos

Observando-se as curvas apresentadas na FIG.20, nota-se que os desvios entre a condição final de estabilização prevista utilizando-se os dois modelos dinâmicos propostos e a simulada utilizando-se o modelo estático validado no tópico 5.1.2 apresentam comportamento similar ao longo da cascata para todas as variáveis analisadas, sendo os desvios das vazões e pressões dos estágios relativos ao modelo H2 ligeiramente inferiores aos relativos ao modelo H1 para a simulação da perturbação correspondente a uma elevação na vazão de alimentação em degrau na cascata. Verifica-se, também, analisando-se os resultados apresentados na TAB.22, que, para essa perturbação, o modelo H2 leva à estabilização da cascata com valores da razão P/F e da razão de

abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito um pouco mais próximos aos simulados pelo modelo estático que o modelo H1.

Já nas curvas apresentadas na FIG.21, correspondentes à simulação da retirada de operação de 25% das ultracentrifugas do estágio de posição relativa 0,5, o comportamento dos desvios analisados ao longo da cascata previsto pelos dois modelos é bem distinto. O modelo H1 não consegue simular bem a condição final de estabilização das vazões e pressões nas proximidades do estágio onde foi provocada a perturbação, porém, consegue chegar a um valor de estabilização próximo da razão P/F simulada utilizando-se o modelo estático, como é mostrado na TAB.22. O modelo H2 simula melhor a condição de estabilização para as vazões e pressões nas proximidades do estágio perturbado, porém, leva a um valor de estabilização para a razão P/F muito menor que o simulado utilizando-se o modelo estático, uma vez que simula valores de estabilização mais baixos que os calculados utilizando-se o modelo estático para as vazões de alimentação e pressões correspondentes aos estágios correspondentes às posições relativas 0,6, 0,8 e 1.

As curvas apresentadas na FIG.22, correspondentes à simulação do enchimento da cascata com o gás de processo na vazão de alimentação nominal, e os valores de desvios correspondentes apresentados na TAB.22 mostram que, para esse tipo de perturbação, os dois modelos prevêem exatamente a mesma condição final de estabilização, conseguindo chegar, após a estabilização, exatamente ao valor da razão P/F simulada utilizando-se o modelo estático validado. Esse fato deve-se ao fato das constantes de proporcionalidade utilizadas nos modelos terem sido determinadas para os valores de corte previstos simulando-se a condição final de estabilização pelo modelo semi-empírico estático.

Analisando-se os valores de desvio apresentados na TAB.22 para as três perturbações estudadas, nota-se que, em todos os casos, ambos os modelos prevêem fatores de separação cerca de 2% inferiores aos simulados utilizando-se o modelo semi-empírico estático, o que leva à obtenção de valores inferiores para a razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto e a valores superiores para a razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de rejeito correspondentes à condição de estabilização em relação aos simulados utilizando-se o modelo semi-empírico estático validado. Esse fato pode ser

confirmado nos casos em que a razão P/F final simulada pelos modelos dinâmicos apresenta valores mais próximos aos simulados utilizando-se o modelo estático e demonstra a necessidade de ajuste das equações responsáveis pela previsão do comportamento separativo das ultracentrífugas utilizadas nos modelos dinâmicos (séries de equações (103) e (104)). Os valores elevados de desvio obtidos para a relação P/F da cascata após a estabilização na simulação das perturbações que partem de uma condição inicial de operação para a qual a cascata já está cheia com o gás de processo demonstram a necessidade de ajuste dos coeficientes de proporcionalidade utilizados nos dois modelos para o cálculo das vazões de retirada de produto e rejeito das ultracentrífugas da cascata.

Com relação à comparação entre o comportamento previsto para a razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito da cascata e para as pressões da corrente de produto dos estágios durante os transientes utilizando-se os modelos H1 e H2 e os resultados experimentais, nota-se que, para a perturbação correspondente à elevação em degrau da vazão de alimentação da cascata (FIG.23), ambos os modelos não simulam corretamente a queda da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de rejeito ocorrida na prática. Pode-se observar também, nas FIG.23 (b) e (c), que o modelo H1 prevê uma queda inicial da relação P/F da cascata, retornando a seu valor inicial após a estabilização, o que não ocorre na prática, enquanto que o modelo H2 prevê a elevação da relação P/F e sua manutenção em valor acima do inicial, comportamento mais condizente com a realidade, o que é confirmado através da simulação da condição final de estabilização utilizando-se o modelo semi-empírico estático. Na FIG.24, nota-se que o comportamento das pressões de produto dos estágios da cascata simulado utilizando-se o modelo H2 se aproxima mais do experimental do que o simulado utilizando-se o modelo H1, embora ambos os modelos simulem, para essas variáveis, valores inferiores aos experimentais.

Analisando-se os resultados apresentados nas FIG.25, correspondentes à simulação da retirada de operação de 25% das ultracentrífugas do estágio de posição relativa 0,5, observa-se que o modelo H2 simula melhor o comportamento da razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito que o modelo H1, já que este último simula a queda da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto, o que não ocorre

na prática. Com relação às pressões da corrente de produto dos estágios, nota-se, na FIG.26, que o modelo H2 realmente simula melhor o comportamento da cascata que o modelo H1 também para esse tipo de perturbação, embora a intensidade da resposta tenha que ser ajustada.

Com relação aos resultados apresentados na FIG.27, correspondentes à simulação do enchimento da cascata com o gás de processo na vazão nominal, observa-se que ambos os modelos não conseguem simular a elevação inicial da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de rejeito da cascata acima do valor final de estabilização verificada na prática. Quanto à razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto, parece ter seu comportamento simulado corretamente pelos dois modelos, sendo que o modelo H2 prevê o alcance do valor final de estabilização em um intervalo de tempo ligeiramente mais próximo do observado na prática que o modelo H1. No entanto, observa-se, relativamente a ambos os modelos, a estabilização razão de abundância do isótopo ^{235}U nas duas corrente em um intervalo de tempo muito inferior ao obtido na prática. Da mesma forma, o comportamento das pressões da corrente de produto dos estágios, que pode ser observado, para essa perturbação, na FIG.28, é ligeiramente melhor simulado pelo modelo H2 que pelo modelo H1, porém, a estabilização da cascata é simulada por ambos os modelos em um intervalo de tempo muito inferior ao obtido na prática.

Como verificou-se na análise dos resultados obtidos apresentada, os dois modelos dinâmicos propostos necessitam de ajustes para melhor simular a condição final de estabilização da cascata, tanto no aspecto das vazões e pressões quanto no aspecto do comportamento separativo das ultracentrífugas.

O ajuste das vazões e pressões pode ser conseguido, para os dois modelos propostos, provocando-se um desequilíbrio entre as constantes de proporcionalidade calculadas para as correntes de produto e rejeito, multiplicando-se uma delas por um fator de correção. Foi testado, para cada um dos modelos, o ajuste com a utilização de dois tipos de fator de correção: fator constante e fator proporcional à diferença entre a vazão de alimentação calculada para as ultracentrífugas do estágio em questão e a vazão de alimentação nominal das ultracentrífugas.

Para o ajuste do comportamento separativo simulado pelos dois modelos propostos, inicialmente, tentou-se alterar a hipótese assumida por

Olander³⁹ de linearidade do perfil de concentrações ao longo do eixo da ultracentrífuga. Foram introduzidos, nas equações (93) e (94), perfis ajustados por curvas do segundo e terceiro graus, obtendo-se, em cada caso, as equações correspondentes às séries de equações (103) e (104), que foram introduzidas nos modelos, simulando-se as mesmas perturbações analisadas acima. As respostas obtidas em todos os casos avaliados foram muito semelhantes às correspondentes à utilização do perfil linear de composições para todas as variáveis ao longo do tempo, o que indica não ser prejudicial aos modelos o uso de tal simplificação. Foi testado, então, o ajuste dos parâmetros λ e g , utilizados na série de equações (103), através da introdução de um fator de correção na função de fluxo, que pode ser utilizada para correlacionar esses dois parâmetros.

De acordo com as equações (103), (19) e (20), pode-se escrever as relações:

$$C_1 = 1/\lambda = \frac{\Delta M \omega^2}{RT} \int_0^a F(r) r dr \quad (130)$$

$$C_5 = \frac{z_u}{\lambda g} = \pi a^2 \rho D + \frac{1}{2\pi \rho D} \int_0^a F^2(r) \frac{dr}{r} \quad (131)$$

Multiplicando-se a função de fluxo $F(r)$ por um fator de correção k , obtém-se, para os parâmetros corrigidos g' e λ' as seguintes relações:

$$1/\lambda' = k \frac{\Delta M \omega^2}{RT} \int_0^a F(r) r dr \quad (132)$$

$$\frac{z_u}{\lambda' g'} = \pi a^2 \rho D + k^2 \frac{1}{2\pi \rho D} \int_0^a F^2(r) \frac{dr}{r} \quad (133)$$

Portanto, pode-se escrever:

$$\lambda' = 1/k \lambda \quad (134)$$

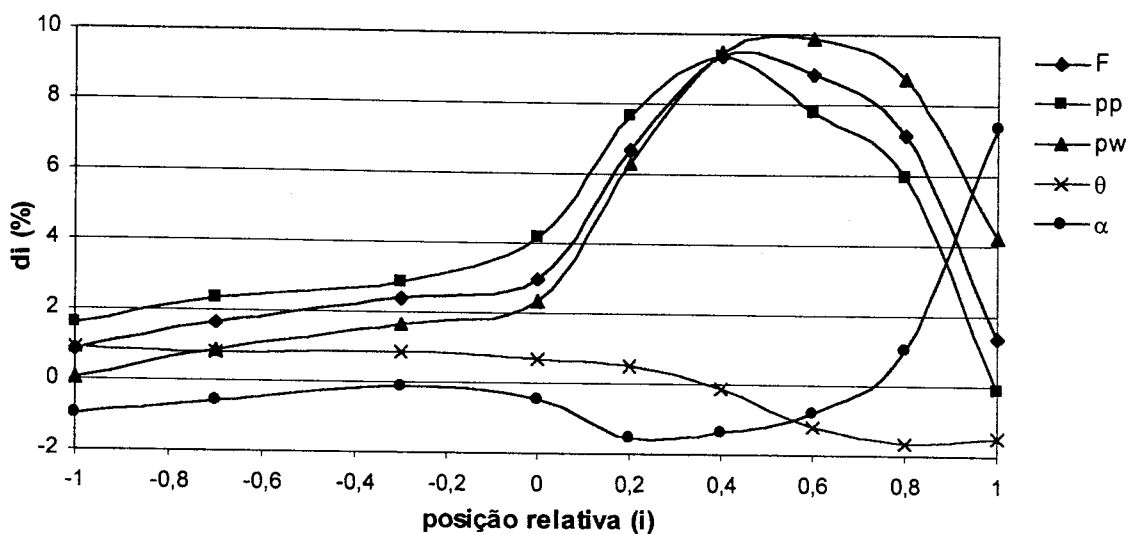
$$\frac{z_u}{\lambda' g'} = \pi a^2 \rho D + k^2 \left[\frac{z_u}{\lambda g} - \pi a^2 \rho D \right] \quad (135)$$

Foram testados, para os modelos H1 e H2, ajustes com dois tipos de coeficiente de correção para o perfil de fluxo: um coeficiente constante e um coeficiente proporcional à diferença entre a vazão de alimentação calculada para as ultracentrífugas de cada estágio e a vazão de alimentação nominal das ultracentrífugas utilizadas.

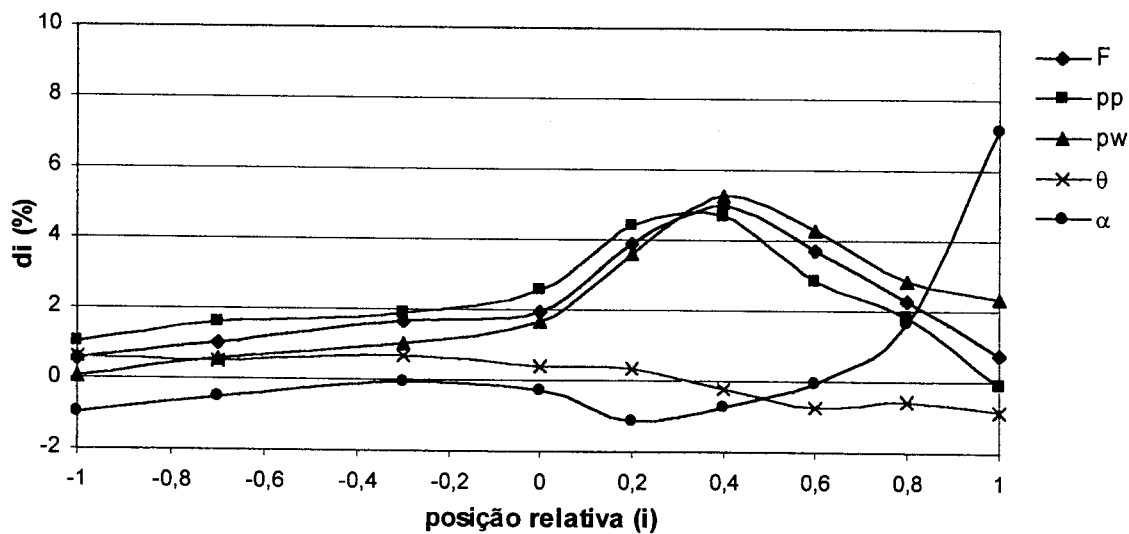
Os melhores resultados obtidos no ajuste das vazões e composições finais de estabilização simulados utilizando-se os modelos H1 e H2 corresponderam, nos dois casos, a coeficientes de correção constantes tanto para a correção das vazões e pressões quanto para a correção do comportamento separativo das ultracentrífugas, porém, com valores distintos para cada tipo de perturbação analisada. Os desvios médios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos H1 e H2 corrigidos com os coeficientes de ajuste definidos para cada perturbação e os calculados utilizando-se o modelo estático e o desvio padrão associado a cada um deles, para as variáveis internas à cascata (vazão e pressão das correntes de alimentação, produto e rejeito, corte, fatores de separação, enriquecimento e empobrecimento e poder de separação das ultracentrífugas dos estágios), em cada uma das perturbações, são mostrados na TAB.32. O comportamento dos desvios correspondentes às vazões de alimentação, cortes, pressões de produto e rejeito e fatores de separação ao longo da cascata para cada uma das perturbações é mostrado nas FIG.32 a 34. Na TAB.32, são apresentados, também, os desvios relativos percentuais entre os valores calculados utilizando-se os modelos dinâmicos ajustados e os calculados utilizando-se o modelo estático para as variáveis externas à cascata (capacidade separativa, capacidade separativa da cascata ideal equivalente, eficiência, relação P/F e razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito da cascata). O comportamento da razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito, da relação P/F da cascata e das pressões das correntes de produto dos estágios ao longo do tempo simulado utilizando-se os modelos H1 e H2 ajustados é mostrado, juntamente com os resultados experimentais obtidos para essas mesmas variáveis, para as três perturbações analisadas, nas FIG.35 a 40.

TABELA 32 - Desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando os modelos dinâmicos H1 e H2 ajustados e os calculados utilizando o modelo semi-empírico estático para as três perturbações analisadas

Perturbação	Elevação em degrau na vazão de alimentação		Retirada de ultracentrífugas da cascata		Enchimento da cascata	
	H1 ajustado	H2 ajustado	H1 ajustado	H2 ajustado	H1 ajustado	H2 ajustado
Variável	desv.med.(%)	desv.med.(%)	desv.med.(%)	desv.med.(%)	desv.med.(%)	desv.med.(%)
Fi	5,8848	2,9977	0,3036	2,3230	0,0000	0,0000
Pi	5,5572	2,9694	0,3388	3,7525	0,0000	0,0000
Wi	6,2310	3,3311	0,4118	4,0269	0,0000	0,0000
pfi	5,7300	2,9416	0,3106	2,2867	0,0085	0,0413
ppi	5,6772	3,0411	0,3041	2,2879	0,0022	0,0467
pwi	6,2267	3,3422	0,3911	3,7184	-0,0015	0,0148
θi	-0,2904	1,1533	0,0616	3,3635	-0,0039	0,0555
αi	0,2464	2,3716	0,8728	2,0835	0,9796	2,0602
βi	0,0833	1,0305	0,3444	0,8847	0,3911	0,8051
γi	0,1503	1,3974	0,5253	1,3480	0,5777	1,2714
δUi	6,0673	15,0876	5,2034	12,6162	5,8411	12,5530
ΔU	0,1219	-	0,1963	-	0,5243	-
ΔU _{id}	-0,2718	-	-0,2824	-	-0,0540	-
E	-0,3929	-	-0,4776	-	-0,5758	-
P/F	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-
Rp	-0,1256	-	-0,0768	-	-0,0237	-
Rw	0,0286	-	0,1573	-	0,0142	-

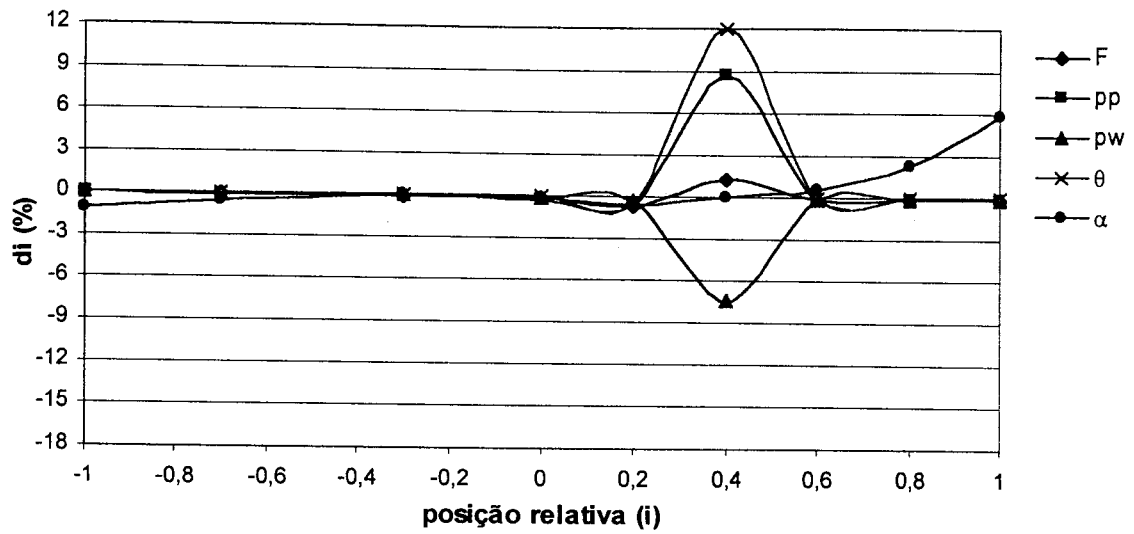


a) Utilizando o modelo H1 ajustado

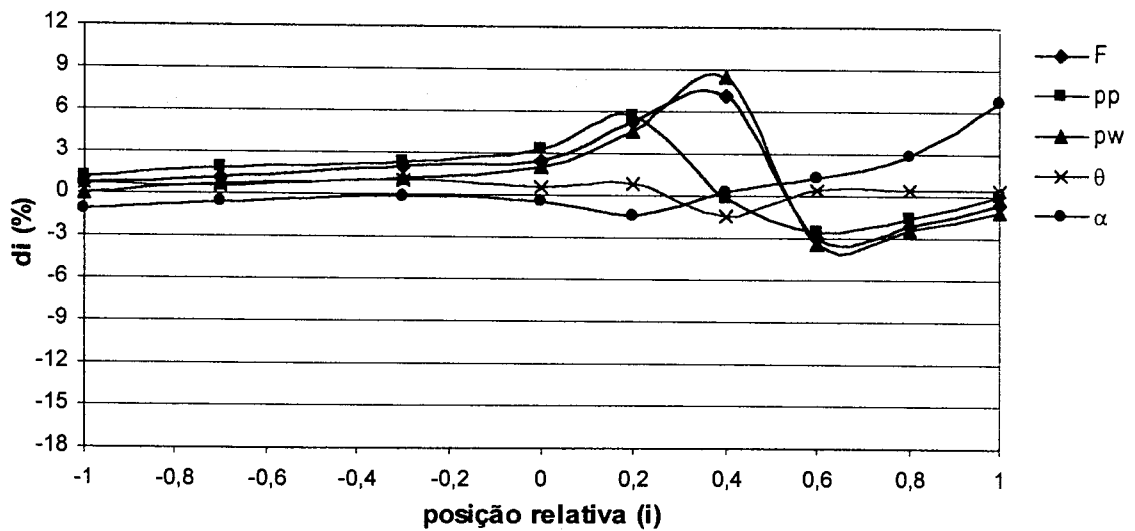


b) Utilizando o modelo H2 ajustado

FIGURA 32 - Comportamento dos desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos ajustados e os valores correspondentes calculados utilizando-se o modelo semi-empírico estático ao longo da cascata para uma elevação de 2% na vazão de alimentação

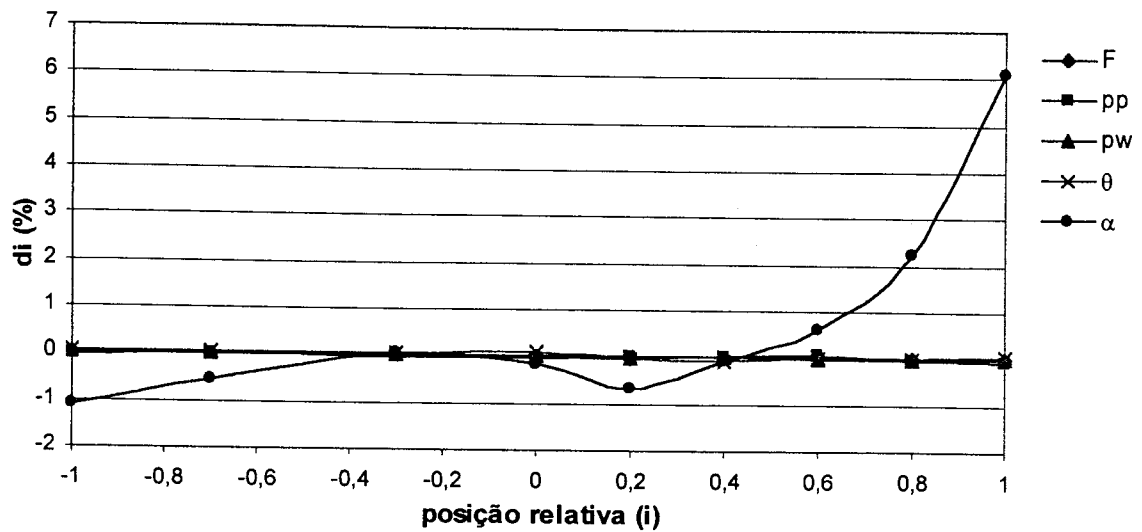


a) Utilizando o modelo H1 ajustado

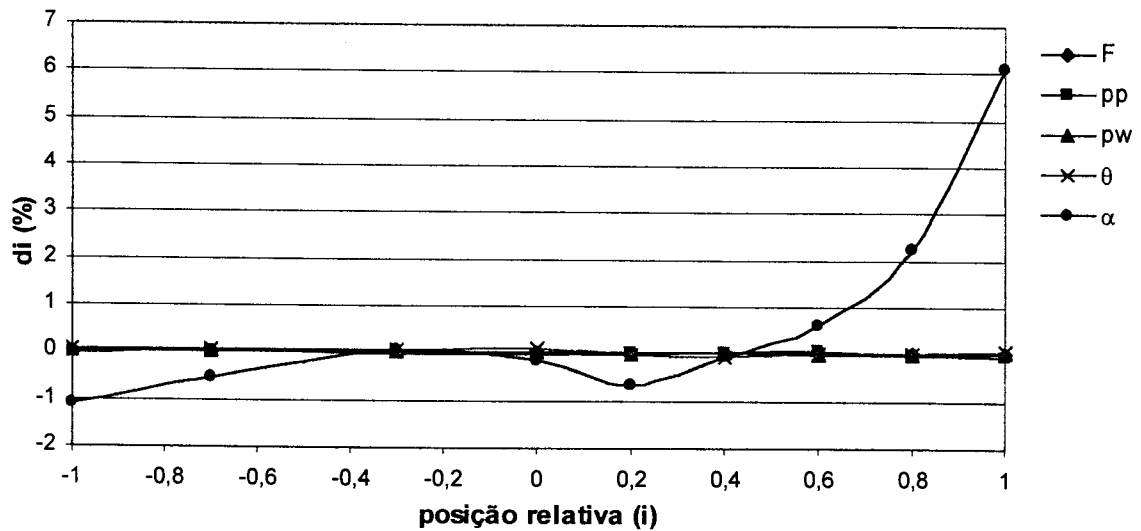


b) Utilizando o modelo H2 ajustado

FIGURA 33 - Comportamento dos desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos ajustados e os valores correspondentes calculados utilizando-se o modelo semi-empírico estático ao longo da cascata para a retirada de 25% das ultracentrífugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5

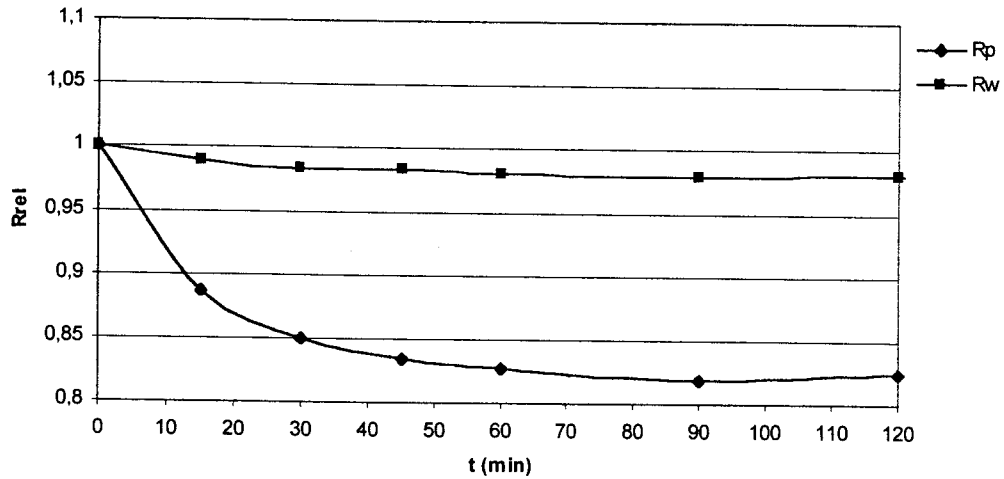


a) Utilizando o modelo H1 ajustado

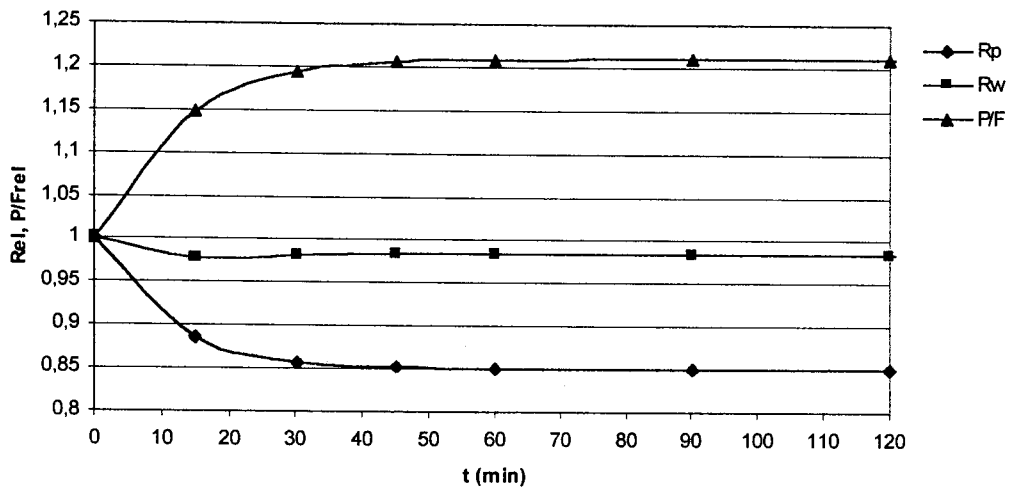


b) Utilizando o modelo H2 ajustado

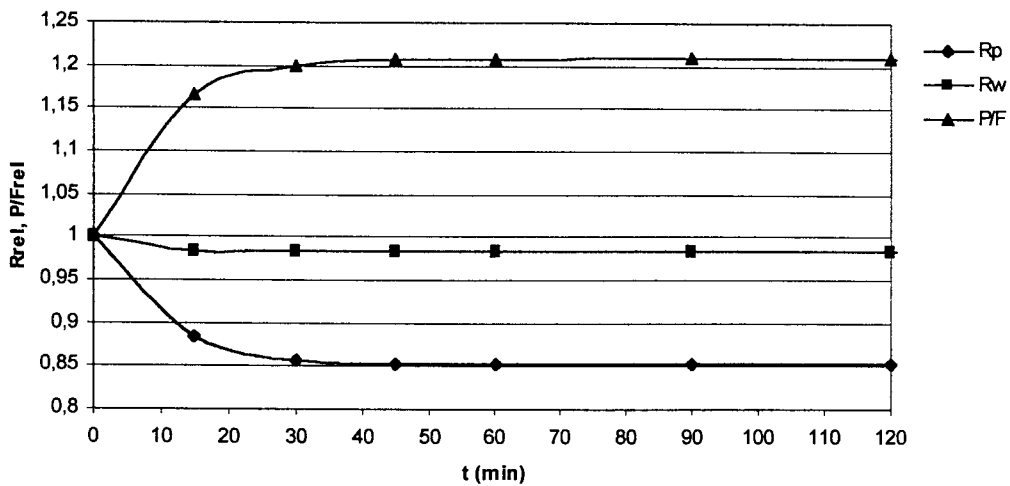
FIGURA 34 - Comportamento dos desvios relativos percentuais entre os valores finais de estabilização calculados utilizando-se os modelos dinâmicos ajustados e os valores correspondentes calculados utilizando-se o modelo semi-empírico estático ao longo da cascata para o enchimento com o gás de processo na vazão nominal



a) Resultados experimentais

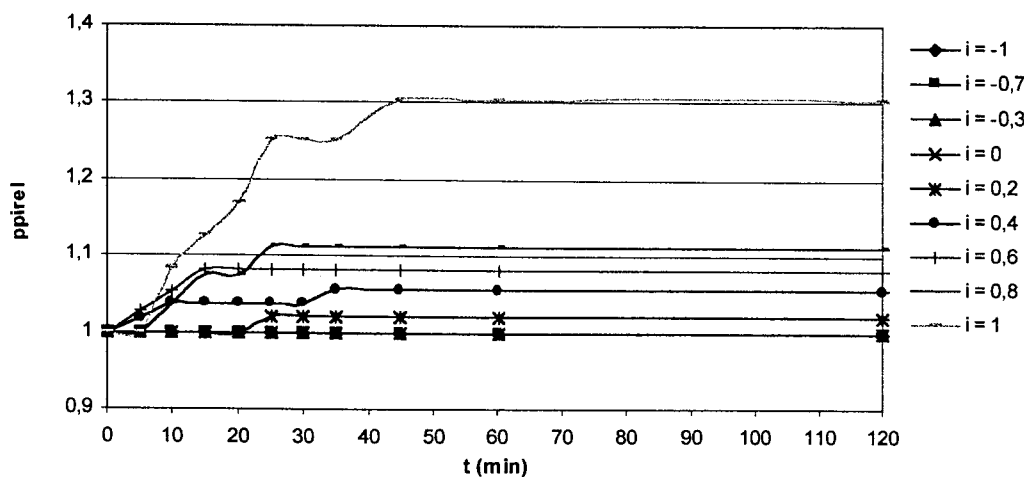


b) Resultados obtidos utilizando o modelo H1 ajustado

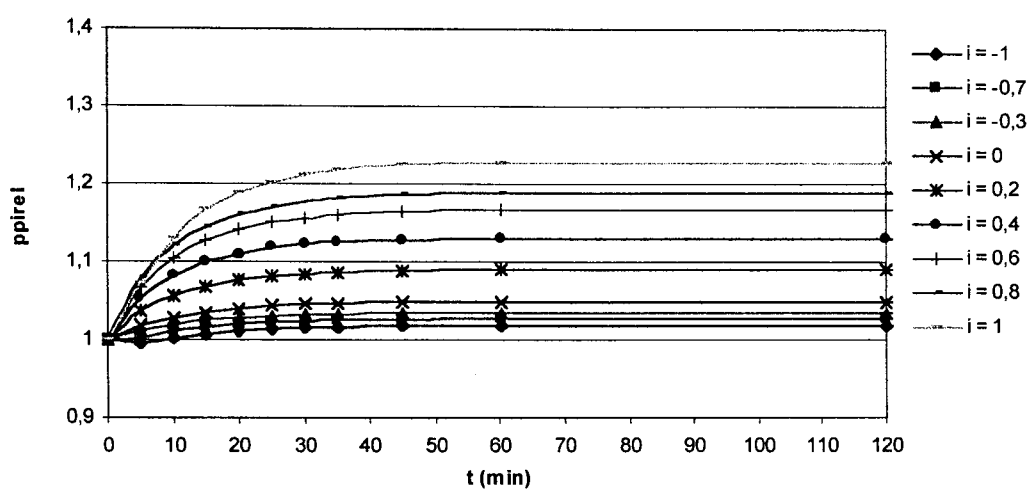


c) Resultados obtidos utilizando o modelo H2 ajustado

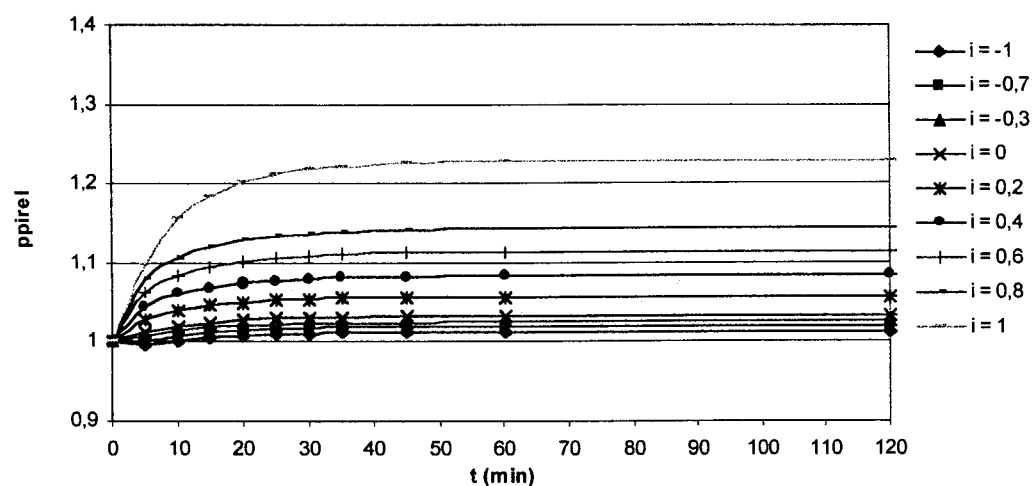
FIGURA 35 - Comportamento da razão isotópica das correntes de produto e rejeito e da relação P/F da cascata durante o transiente – elevação de 2% na vazão de alimentação da cascata



a) Resultados experimentais

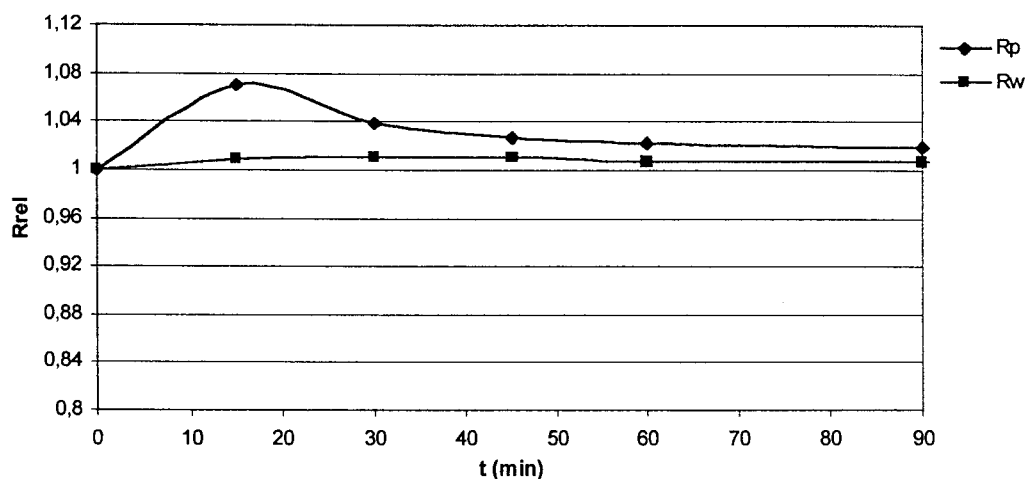


b) Resultados obtidos utilizando o modelo H1 ajustado

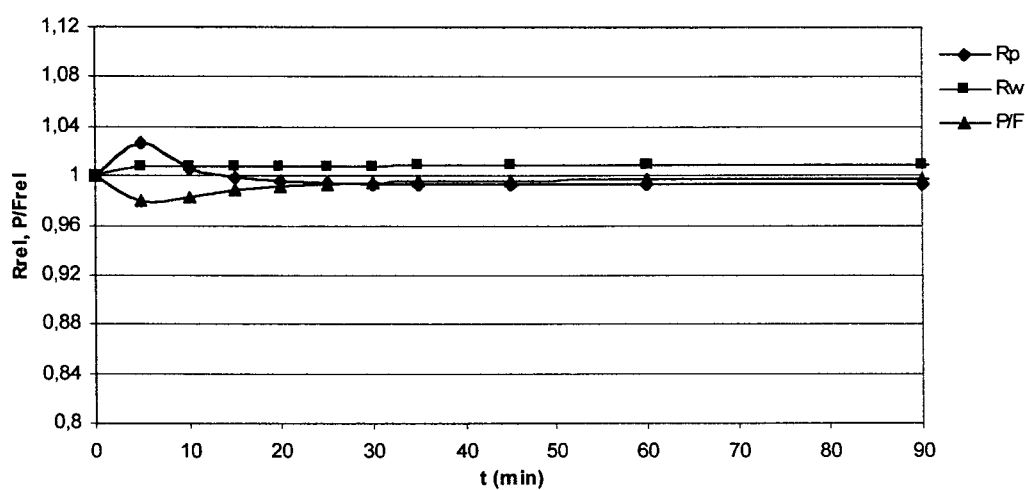


c) Resultados obtidos utilizando o modelo H2 ajustado

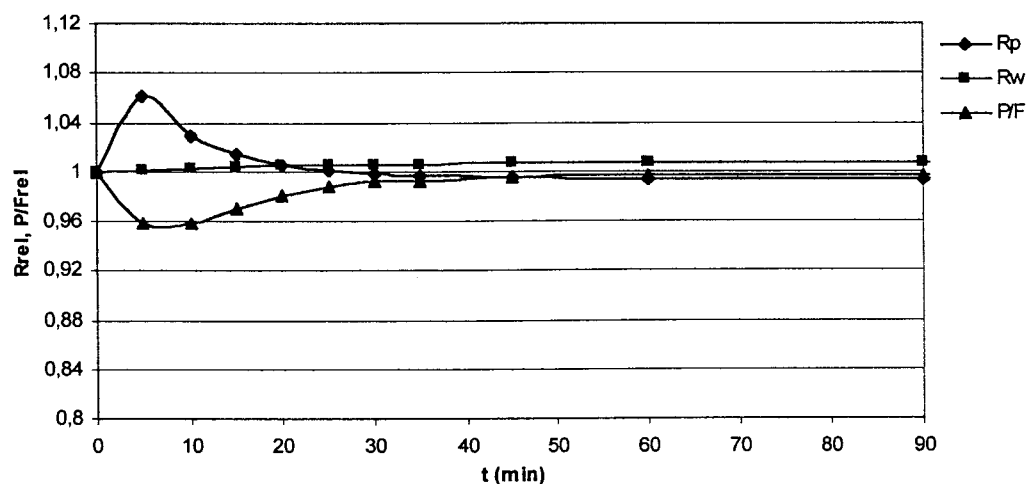
FIGURA 36 - Comportamento da pressão da corrente de produto dos estágios durante o transiente – elevação de 2% na vazão de alimentação da cascata



a) Resultados experimentais

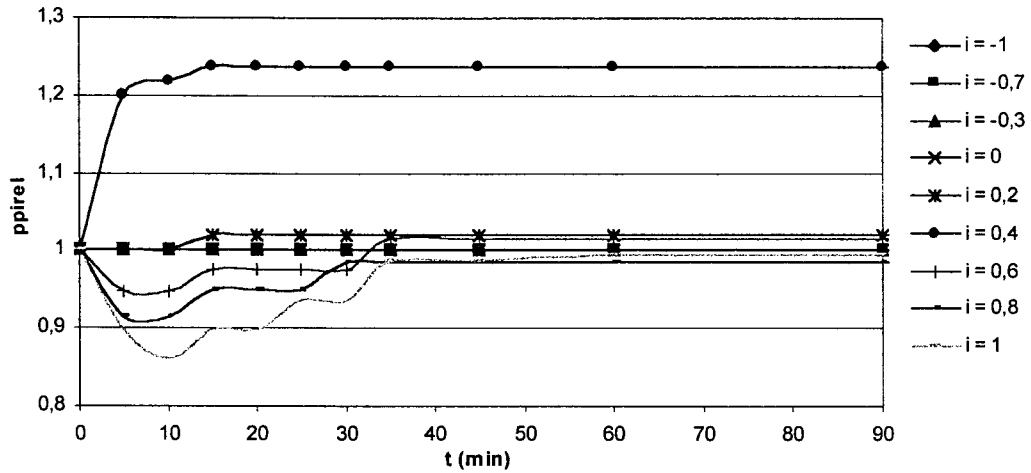


b) Resultados obtidos utilizando o modelo H1 ajustado

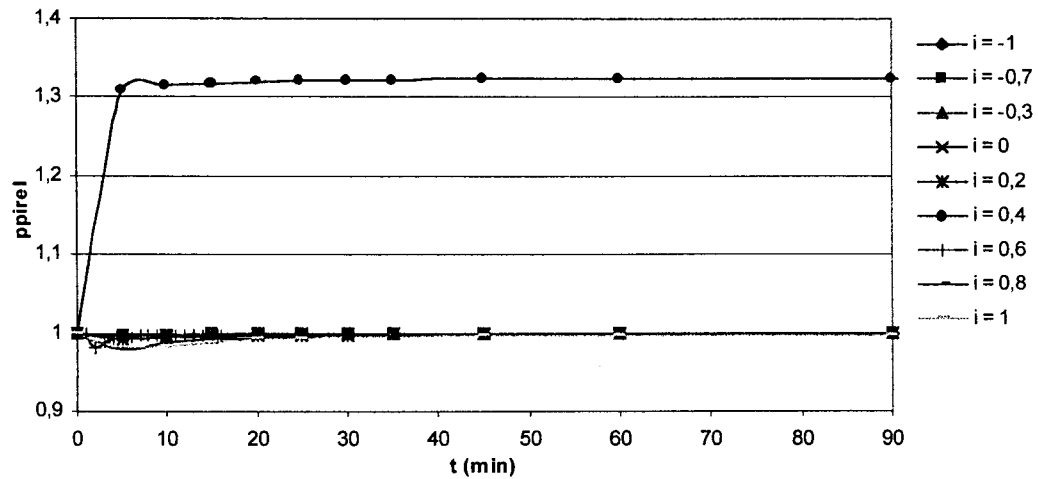


c) Resultados obtidos utilizando o modelo H2 ajustado

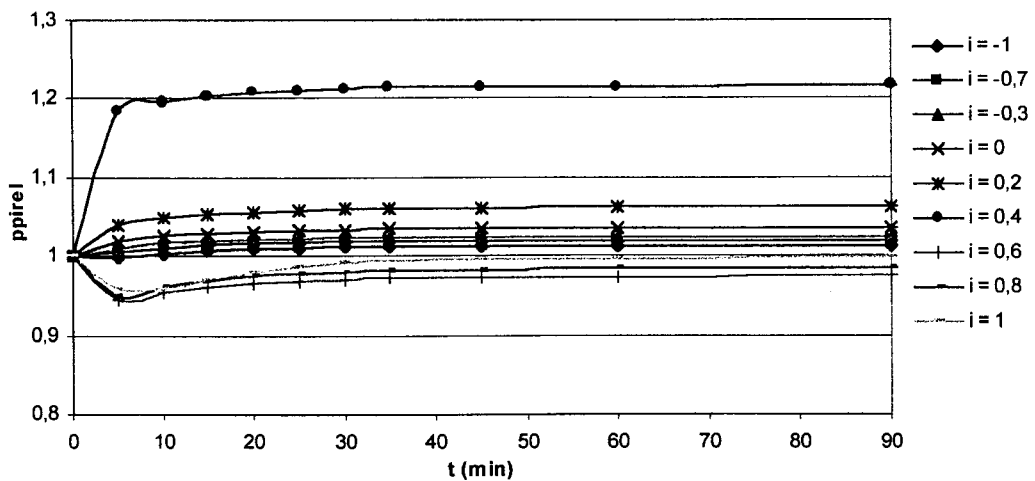
FIGURA 37 - Comportamento da razão isotópica das correntes de produto e rejeito e da relação P/F da cascata durante o transiente – retirada de 25% das ultracentrifugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5



a) Resultados experimentais

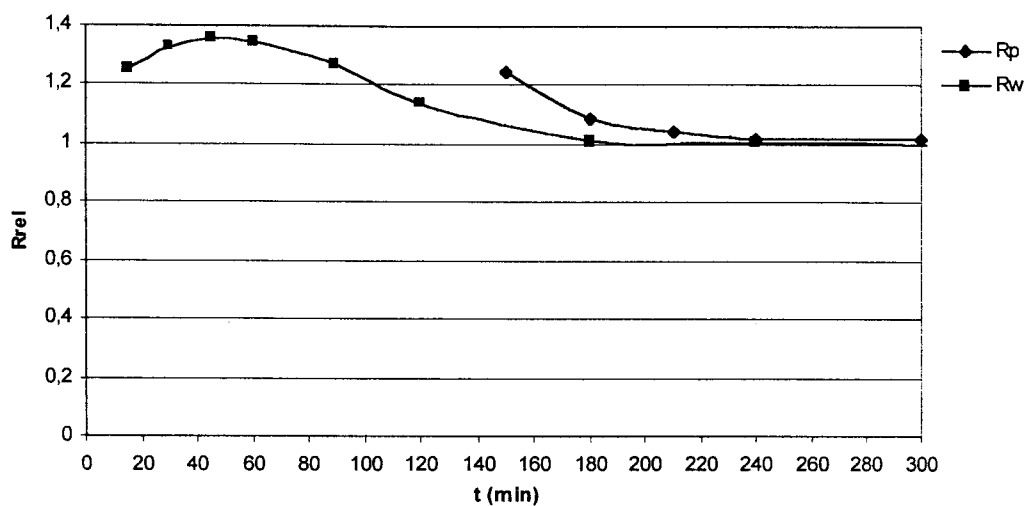


b) Resultados obtidos utilizando o modelo H1 ajustado

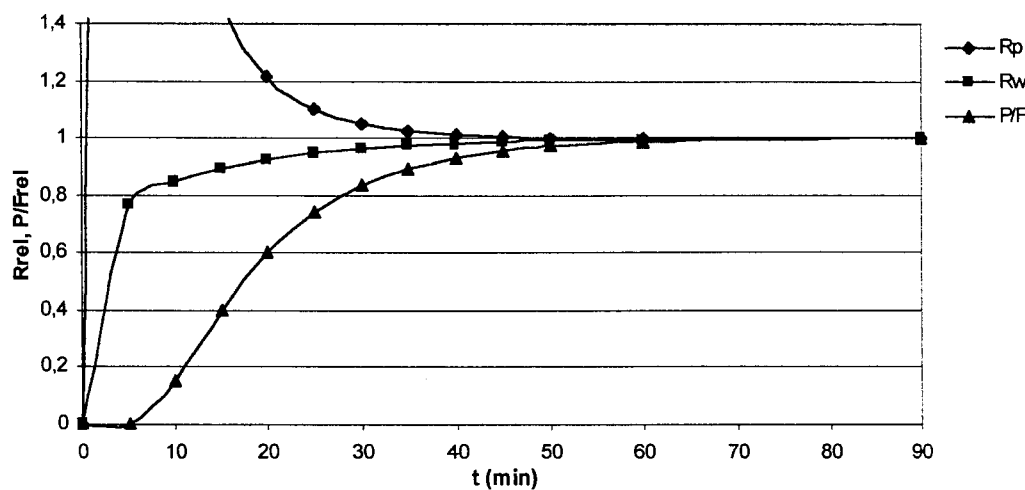


c) Resultados obtidos utilizando o modelo H2 ajustado

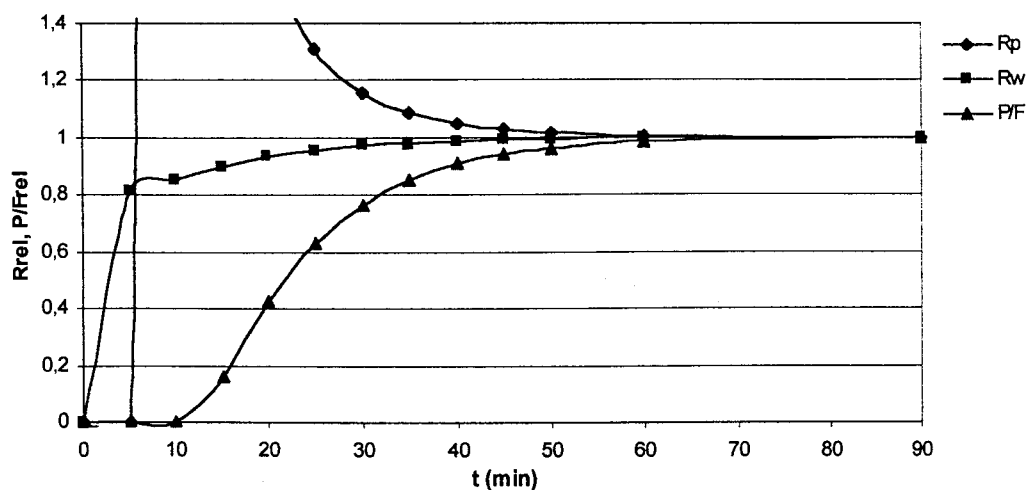
FIGURA 38 - Comportamento da pressão da corrente de produto dos estágios durante o transiente – retirada de 25% das ultracentrífugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5



a) Resultados experimentais

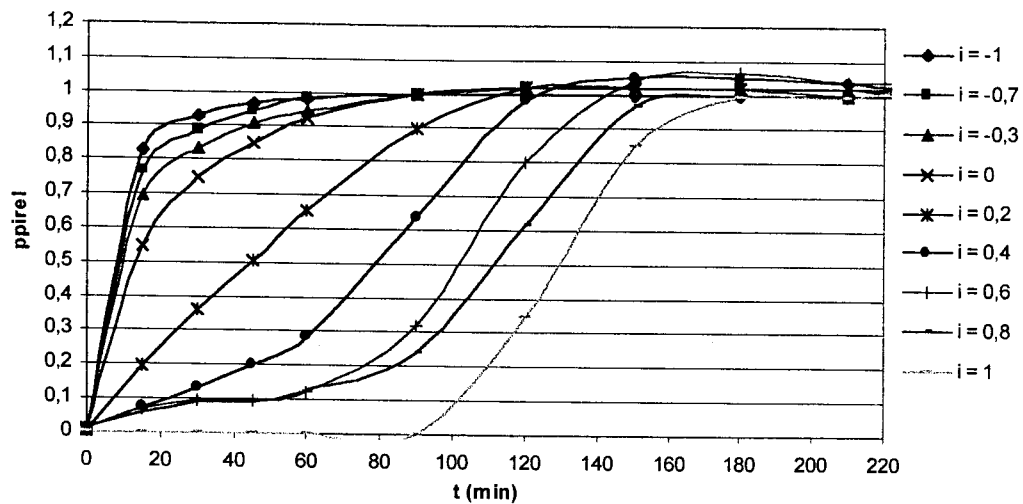


b) Resultados obtidos utilizando o modelo H1 ajustado

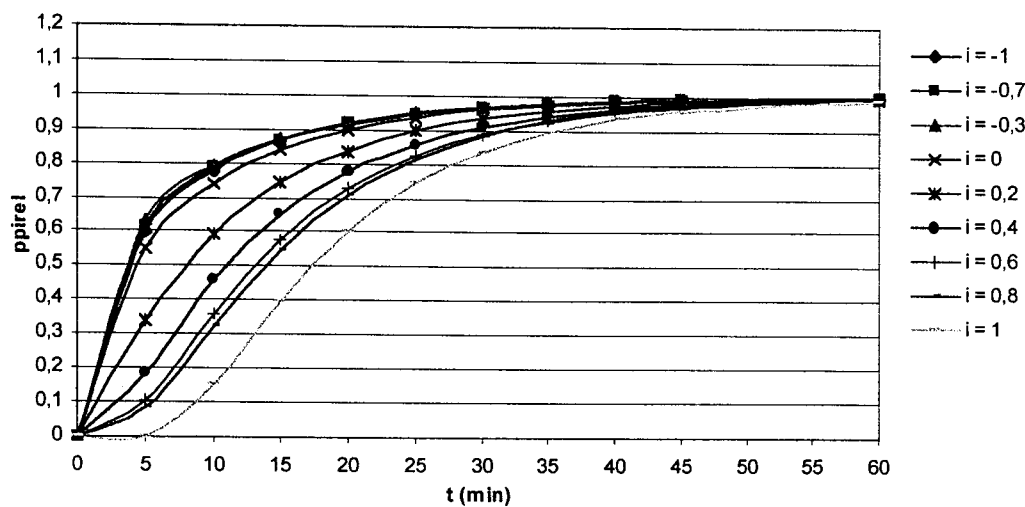


c) Resultados obtidos utilizando o modelo H2 ajustado

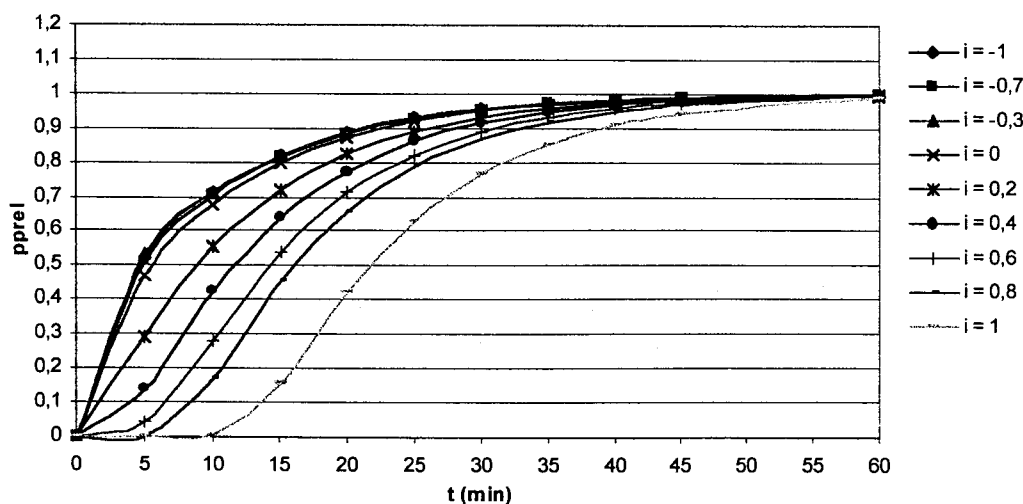
FIGURA 39 - Comportamento da razão isotópica das correntes de produto e rejeito e da relação P/F da cascata durante o transiente - enchimento da cascata com o gás de processo na vazão nominal



a) Resultados experimentais



b) Resultados obtidos utilizando o modelo H1 ajustado



c) Resultados obtidos utilizando o modelo H2 ajustado

FIGURA 40 - Comportamento da pressão da corrente de produto dos estágios durante o transiente – enchimento da cascata com o gás de processo na vazão nominal

Observando-se os valores de desvio apresentados na TAB.32 referentes às variáveis externas à cascata, nota-se que o ajuste das vazões e composições simuladas utilizando-se os modelos dinâmicos em relação aos valores calculados para essas variáveis utilizando-se o modelo semi-empírico estático através da introdução, nos modelos, dos coeficientes de correção mencionados no parágrafo anterior foi bem sucedido. Com relação às variáveis internas analisadas, a comparação entre os valores de desvio apresentados na TAB.32 e os mostrados na TAB.22 permite constatar a redução, na maioria dos casos, dos valores médios, em valor absoluto, e da dispersão dos desvios ao longo da cascata para as vazões e pressões. Observa-se, com relação a essas variáveis, que, para as perturbações correspondentes à elevação em degrau na vazão de alimentação e à retirada de operação de 25% das ultracentrífugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5, o efeito do ajuste sobre os desvios foi mais pronunciado para o modelo H2 que para o modelo H1. Já com relação à simulação do enchimento da cascata, nota-se a redução, em valor absoluto dos desvios do fator de separação, enriquecimento e empobrecimento dos estágios. Observa-se também, nesse caso, que os dois modelos simulam exatamente a mesma condição final de estabilização para todas as variáveis analisadas.

Comparando-se as curvas apresentadas na FIG.32 com as mostradas na FIG.20, correspondentes à simulação da elevação em degrau da vazão de alimentação da cascata com e sem o ajuste dos modelos, respectivamente, nota-se que o ajuste dos modelos promoveu a inversão do comportamento previsto para as vazões de alimentação e pressões dos estágios da seção de enriquecimento de forma mais intensa em relação ao modelo H1 do que em relação ao modelo H2. Com relação aos fatores de separação, o efeito do ajuste foi praticamente o mesmo em relação aos dois modelos, com a aproximação da curva de desvios em relação ao eixo das abscissas e a manutenção de valores de desvio elevados no estágio do topo da cascata (posição relativa $i=1$). A observação da FIG.32 permite dizer que o modelo H2 ajustado simula melhor a condição final de estabilização da cascata em relação às variáveis analisadas do que o modelo H1 ajustado, em face da obtenção de valores de desvio mais próximos a zero para quase todas as variáveis.

Comparando-se as curvas apresentadas na FIG.33 com as mostradas na FIG.21, correspondentes à simulação da retirada de operação de 25% das

ultracentrífugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5 com e sem o ajuste dos modelos, respectivamente, nota-se uma influência muito pequena do ajuste realizado sobre a condição final de estabilização prevista para as vazões e pressões para o modelo H1. Já com relação ao modelo H2, o ajuste foi eficiente, reduzindo de forma significativa, em valor absoluto, os desvios das vazões e pressões para os estágios de posição relativa superior a 0,5. Também para essa perturbação, o efeito do ajuste sobre os desvios obtidos para os fatores de separação dos estágios foi praticamente o mesmo para os dois modelos, com a aproximação da curva em relação ao eixo das abscissas e a manutenção de valores de desvio mais elevados no estágio do topo da cascata. A observação da FIG.33 não permite a constatação de qual dos dois modelos ajustados melhor simula a condição final de estabilização da cascata para esse tipo de perturbação.

A comparação das curvas mostradas nas FIG.34 e 22, correspondentes à simulação do enchimento da cascata com o gás de processo na vazão nominal com e sem o ajuste dos modelos, permite constatar que o efeito do ajuste da razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito da cascata em relação a seus valores simulados utilizando o modelo semi-empírico estático através da introdução de um coeficiente de correção na função de fluxo é apenas o deslocamento da curva de desvios dos fatores de separação dos estágios em direção ao eixo das abscissas, já que eleva os valores simulados para essas variáveis. Nota-se, também nesse caso, que o valor do fator de separação do estágio do topo da cascata (posição relativa $i=1$) é superestimado. As curvas apresentadas na FIG.34 confirmam a afirmação feita com relação à TAB.32, de que os dois modelos ajustados simulam, para esse tipo de perturbação, exatamente a mesma condição final de estabilização.

Comparando-se as curvas apresentadas na FIG.35 com as mostradas na FIG.23, referentes à comparação entre o comportamento previsto pelos dois modelos dinâmicos para a razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito da cascata ao longo do tempo com os resultados experimentais com e sem o ajuste dos modelos, respectivamente, para a simulação de uma elevação em degrau na vazão de alimentação da cascata, nota-se que o ajuste realizado foi capaz de corrigir a distorção no comportamento da razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de rejeito da cascata constatada anteriormente para os dois modelos, tornando ambos os resultados satisfatórios.

O tempo de estabilização estimado pelos modelos ajustados para esse tipo de perturbação, considerando-se as três variáveis mostradas nas curvas, é de cerca de 70 minutos, valor compatível com os resultados experimentais.

Comparando-se as curvas apresentadas na FIG.36 com as mostradas na FIG.24, referentes à comparação entre o comportamento previsto pelos dois modelos dinâmicos para a pressão da corrente de produto dos estágios ao longo do tempo com os resultados experimentais com e sem o ajuste dos modelos, respectivamente, para esse mesmo tipo de perturbação, nota-se que o ajuste realizado corrigiu também as distorções de comportamento apresentadas pelos valores simulados pelo modelo H1 em relação aos valores experimentais para essas variáveis, além de aproximar os valores simulados para as mesmas utilizando-se ambos os modelos dos experimentais. A observação da FIG.36 permite constatar que o modelo H2 ajustado simula melhor o comportamento das pressões analisadas para esse tipo de perturbação que o modelo H1 ajustado. O tempo de estabilização previsto pelos modelos ajustados para essas variáveis, estimado através das curvas apresentadas, é de cerca de 50 minutos, valor compatível com os resultados experimentais.

Comparando-se as curvas apresentadas na FIG.37 com as mostradas na FIG.25, referentes à comparação entre o comportamento previsto pelos dois modelos dinâmicos para a razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito da cascata ao longo do tempo com os resultados experimentais com e sem o ajuste dos modelos, respectivamente, para a simulação da retirada de operação de 25% das ultracentrífugas do estágio correspondente à posição relativa 0,5, nota-se que o ajuste foi eficiente para corrigir as diferenças de comportamento com relação aos resultados experimentais obtidas inicialmente para os dois modelos quando analisada a razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito da cascata, especialmente para o modelo H1, que previa um comportamento totalmente inverso ao observado na prática para a razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto da cascata. Observando-se as curvas apresentadas na FIG.37, nota-se que o comportamento previsto para essas variáveis utilizando-se o modelo H2 ajustado, embora não reproduza com fidelidade o constatado experimentalmente, aproxima-se mais deste que o previsto utilizando-se o modelo H1 ajustado, o que o torna mais indicado para simular a resposta dessas variáveis a esse tipo de perturbação. O

tempo de estabilização estimado para as três variáveis analisadas na FIG.37 utilizando-se as curvas apresentadas é de cerca de 50 minutos, valor compatível com o obtido experimentalmente.

Com relação ao comportamento previsto pelos dois modelos ajustados para a pressão da corrente de produto dos estágios durante o transiente provocado por essa mesma perturbação, nota-se, comparando as curvas apresentadas nas FIG.38 e 26, válidas para os modelos com e sem ajuste, respectivamente, que o ajuste aproximou o comportamento previsto para essas variáveis do obtido experimentalmente, especialmente para o modelo H2. A observação da FIG.38 permite constatar que o modelo H2 também simula melhor o comportamento dessas variáveis para esse tipo de perturbação. O tempo de estabilização estimado para essas variáveis utilizando-se as curvas apresentadas na FIG.38 é de cerca de 70 minutos, valor comparável ao verificado experimentalmente.

A comparação entre os resultados mostrados nas FIG.39 e 27, referentes ao comportamento previsto para a razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito da cascata ao longo do tempo simuladas, para a perturbação correspondente ao enchimento da cascata com o gás de processo na vazão de alimentação nominal, pelos modelos dinâmicos com e sem ajuste, respectivamente, mostra um efeito praticamente nulo do ajuste efetuado para os dois modelos, não permitindo a correção da diferença de comportamento observada inicialmente para a razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de rejeito da cascata com relação ao obtido experimentalmente. Com relação às curvas referentes à razão de abundância do isótopo ^{235}U na corrente de produto da cascata apresentadas na FIG.39, observa-se uma tendência à simulação de valores ligeiramente mais elevados quando é utilizado o modelo H2 ajustado, o que leva à estabilização em um intervalo de tempo ligeiramente superior ao obtido utilizando-se o modelo H1 ajustado. Quanto à estimativa do tempo de estabilização dessas variáveis para esse tipo de perturbação utilizando-se as curvas apresentadas na FIG.39, leva a valores muito inferiores ao obtido experimentalmente, uma vez que o comportamento simulado para as variáveis analisadas utilizando-se o modelo H2 ajustado prevê sua estabilização em cerca de 80 minutos, enquanto o valor constatado experimentalmente é de cerca de 280 minutos.

A comparação entre o comportamento experimental observado para a pressão da corrente de produto dos estágios da cascata ao longo do tempo durante o enchimento da cascata com o gás de processo na vazão nominal e o simulado utilizando-se os modelos H1 e H2 ajustados, que pode ser feito observando-se as curvas mostradas na FIG.40, mostra que as curvas previstas utilizando-se o modelo H2 são apenas ligeiramente mais próximas às obtidas experimentalmente que as simuladas utilizando-se o modelo H1. Nesse caso, o ajuste é indiferente, uma vez que foi efetuado apenas em relação ao comportamento separativo das ultracentrífugas, não influenciando os valores de pressão calculados. Também para essas curvas, o tempo de estabilização estimado para as variáveis (cerca de 60 minutos para o modelo dinâmico H2) é muito inferior ao constatado experimentalmente (cerca de 220 minutos).

Do que foi exposto relativamente à comparação entre o desempenho dos dois modelos dinâmicos propostos para a simulação do comportamento das variáveis internas e externas da cascata submetida a perturbações, pode-se concluir que o modelo H2 ajustado é o mais apropriado para a utilização, lembrando-se, porém, que ele não é capaz de simular corretamente o tempo de estabilização das variáveis internas e externas à cascata durante seu enchimento com o gás de processo.

6 CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados apresentados no tópico 5.1.1, referentes à utilização dos cinco modelos semi-empíricos propostos na simulação da condição nominal de operação de uma cascata de ultracentrífugas, pode-se concluir que os modelos correspondentes à imposição das restrições de corte constante e corte simétrico para todos os estágios são os mais amplamente aplicáveis, atendendo ao dimensionamento de cascatas desde a escala laboratorial até a industrial.

Os modelos correspondentes à imposição das restrições de vazão de alimentação constante, fator de separação constante e eficiência constante para todas as ultracentrífugas da cascata podem não apresentar solução viável para cascatas laboratoriais e são mais dependentes do formato das curvas experimentais obtidas em ensaios individuais com as ultracentrífugas constituintes da cascata. Caso aplicados com a mesma vazão de alimentação utilizada para os modelos que utilizam as restrições de corte constante e corte simétrico para todos os estágios, podem levar a valores afastados da tarefa de separação especificada para a razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito da cascata, podendo ser ajustados de modo a atender aos valores especificados através da alteração da vazão de alimentação da cascata.

Com referência à validação do modelo que utiliza a restrição de corte simétrico para todos os estágios, conclui-se que o grau de afastamento entre os valores calculados e os experimentais obtidos para as variáveis internas e externas avaliadas, mostrado através dos valores médios e intervalos de confiança apresentados, tornam-no apto ao dimensionamento completo de uma cascata, necessário à sua implantação.

Esse mesmo grau de afastamento deverá ser obtido caso seja feito o mesmo tipo de análise em cascatas que utilizem as demais restrições propostas, combinadas entre si ou não, e mesmo em cascatas que não necessitem de restrições físicas nas tubulações interestágios, uma vez que os modelos correspondentes têm a mesma base teórica do que foi validado neste trabalho.

Da mesma forma, com referência à validação do modelo semi-empírico que simula a operação de uma cascata de ultracentrífugas fora da condição nominal, conclui-se que o grau de afastamento entre os valores calculados e os experimentais obtidos para as variáveis internas e externas avaliadas, mostrado através dos valores médios e intervalos de confiança apresentados, tornam-no apto à utilização para a simulação de falhas que obriguem a cascata a sair fora de sua condição nominal de operação, ou mesmo de falhas que a impeçam de atingir a condição nominal de operação.

Esse mesmo grau de afastamento deverá ser obtido caso seja feito o mesmo tipo de análise em cascatas que utilizem restrições nas tubulações interestágios de produto e rejeito ou em cascatas que não necessitem de restrições físicas nas tubulações interestágios, uma vez que os modelos correspondentes têm a mesma base teórica do que foi validado neste trabalho.

A partir da avaliação dos modelos teóricos propostos para a substituição dos modelos semi-empíricos analisados nas fases de planejamento e concepção de cascatas de separação isotópica por ultracentrifugação, pode-se concluir que as combinações de restrições teóricas ao comportamento dos estágios que permitem a simulação da condição nominal de operação de uma cascata de ultracentrífugas mais próxima à que será obtida quando for utilizado um dos modelos semi-empíricos avaliados são as que utilizam as hipóteses de corte e eficiência constantes e corte simétrico e eficiência constante. Caso os modelos teóricos correspondentes sejam utilizados, a vazão de alimentação estabelecida como nominal e os valores da composição isotópica simulados para as correntes de produto e rejeito da cascata em questão estarão próximos a seus valores determinados após o dimensionamento feito utilizando-se um dos modelos semi-empíricos propostos, mesmo nos casos em que ajustes de vazão sejam necessários.

Pode-se concluir, também, que a maior aproximação do comportamento separativo experimental das ultracentrífugas é conseguida quando esse comportamento é simulado utilizando-se a hipótese de eficiência constante para as mesmas, seguida pela hipótese de parâmetros C_1 e C_5 constantes com o cálculo do fator de enriquecimento ou de empobrecimento utilizando-se as relações teóricas (17) ou (18) e, finalmente, pela hipótese de fator de separação constante, utilizada nas publicações encontradas em literatura.

Com relação à análise dos resultados obtidos na simulação de perturbações nas condições de operação de uma cascata feita utilizando-se os modelos H1, que preserva a hipótese proposta por Olander³⁹ de proporcionalidade entre a vazão das correntes de produto e rejeito das ultracentrífugas e seu inventário gasoso, e H2, que introduz a hipótese de proporcionalidade entre a pressão na extremidade dos coletores de produto e de rejeito das ultracentrífugas e seu inventário gasoso, pode-se concluir que a hipótese utilizada no modelo H2 leva a resultados mais próximos aos experimentais para as perturbações analisadas que a hipótese utilizada no modelo H1.

Os dois modelos, no entanto, necessitaram ser ajustados por coeficientes de correção introduzidos nas próprias hipóteses de proporcionalidade que os distinguem, desequilibrando-se as constantes definidas para a corrente de produto e de rejeito, promovendo a simulação correta da relação P/F atingida pela cascata após a estabilização, e na função de fluxo, promovendo a simulação correta da razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito da cascata após a estabilização.

Cabe lembrar que os coeficientes de ajuste determinados são diferentes para cada perturbação, para cada cascata e para cada tipo de ultracentrífuga a ser utilizada, devendo ser determinados fazendo-se o ajuste dos valores da relação P/F e da razão de abundância do isótopo ^{235}U nas correntes de produto e rejeito da cascata simulados pelo modelo dinâmico em relação aos calculados simulando-se a condição final de estabilização pelo modelo semi-empírico estático.

Conclui-se, também, que o modelo dinâmico H2 ajustado pode ser utilizado para estimar o tempo de estabilização das variáveis internas e externas à cascata para perturbações similares às estudadas, com exceção de seu enchimento com o gás de processo.

Como sugestão de trabalhos futuros para a continuidade das pesquisas envolvendo a modelagem matemática do comportamento de cascatas de ultracentrífugas, pode-se citar a extensão dos modelos semi-empíricos e teóricos propostos neste trabalho para a simulação da operação de cascatas considerando-se o gás de processo como uma mistura com mais de dois isótopos, ou seja, uma mistura multicomponente.

Sugere-se, também, a incorporação às restrições teóricas analisadas neste trabalho, de novos avanços que permitam simular melhor, teoricamente, o comportamento separativo das ultracentrífugas, tanto estática como dinamicamente.

Com referência aos modelos dinâmicos, pode-se estudar melhor a simulação do enchimento da cascata com o gás de processo, uma vez que os resultados obtidos neste trabalho não se mostraram satisfatórios.

Sugere-se, também, a aplicação dos modelos propostos e sua avaliação para a simulação de outras formas de perturbação, como, por exemplo, a redução na frequência de rotação das ultracentrífugas da cascata e a retirada de material em pontos internos.

APÊNDICE – Resultados obtidos utilizando-se os modelos teóricos descritos nos tópicos 3.1.1.1 a 3.1.1.12

Cascata com corte e fator de separação constantes

(a) Utilizando a UC-1

estágio	(G-Got)/Got (%)	(θ - θ ot)/ θ ot (%)	(α - α ot)/ α ot (%)	(β - β ot)/ β ot (%)	(δ U- δ Uot)/ δ Uot (%)
1	-16,3514	0,0000	0,0000	0,0000	-16,3958
2	-12,9730	0,0000	0,0000	0,0000	-12,9084
3	-9,3243	0,0000	0,0000	0,0000	-9,3748
4	-5,2703	0,0000	0,0000	0,0000	-5,2166
5	-1,3514	0,0000	0,0000	0,0000	-1,3764
6	5,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5,0373
7	12,4324	0,0000	0,0000	0,0000	12,4689
8	18,7838	0,0000	0,0000	0,0000	18,7728
9	27,0270	0,0000	0,0000	0,0000	27,0198
10	34,3243	0,0000	0,0000	0,0000	34,3589
11	40,5405	0,0000	0,0000	0,0000	40,4951
12	48,2432	0,0000	0,0000	0,0000	48,2216

(Rp-Rpid)/Rpid (%) :	0,0860
(Rw-Rwid)/Rwid (%) :	0,0212
(P/F-P/Fid)/(P/Fid) (%) :	-0,1648
(Δ U-nt* δ Uot)/(nt* δ Uot) (%) :	3,5648
(E-100)/100 (%) :	-0,00004

(b) Utilizando a UC-2

estágio	(G-Got)/Got (%)	(θ - θ ot)/ θ ot (%)	(α - α ot)/ α ot (%)	(β - β ot)/ β ot (%)	(δ U- δ Uot)/ δ Uot (%)
1	-7,1055	0,0000	0,0000	-0,0087	-7,0750
2	-5,7471	0,0000	0,0000	-0,0087	-5,7424
3	-4,3887	0,0000	0,0000	-0,0087	-4,3910
4	-2,4033	0,0000	0,0000	0,0000	-2,4323
5	-0,8359	0,0000	0,0000	0,0000	-0,8417
6	1,8809	0,0000	0,0000	0,0000	1,9068
7	5,4336	0,0000	0,0000	0,0000	5,3869
8	7,6280	0,0000	0,0000	0,0087	7,6020
9	11,3898	0,0000	0,0000	0,0087	11,3700
10	14,1066	0,0000	0,0000	0,0087	14,1248
11	15,6740	0,0000	0,0000	0,0174	15,7280
12	18,4953	0,0000	0,0000	0,0174	18,5205

(Rp-Rpid)/Rpid (%) :	0,3024
(Rw-Rwid)/Rwid (%) :	0,0517
(P/F-P/Fid)/(P/Fid) (%) :	-0,4083
(Δ U-nt* δ Uot)/(nt* δ Uot) (%) :	1,2363
(E-100)/100 (%) :	-0,0003

Cascata com corte e parâmetros C_1 e C_5 constantes

(a) Utilizando a UC-1

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	-16,3514	0,0000	1,3549	0,6442	-2,3654
2	-12,9730	0,0000	1,0416	0,4969	-1,7986
3	-9,3243	0,0000	0,7283	0,3497	-1,3533
4	-5,2703	0,0000	0,3726	0,1748	-0,9890
5	-1,3514	0,0000	0,0508	0,0276	-0,7923
6	5,0000	0,0000	-0,4573	-0,2209	-0,7229
7	12,4324	0,0000	-1,0162	-0,4877	-1,0063
8	18,7838	0,0000	-1,4735	-0,7086	-1,4921
9	27,0270	0,0000	-2,0323	-0,9846	-2,4174
10	34,3243	0,0000	-2,4981	-1,2147	-3,4642
11	40,5405	0,0000	-2,8707	-1,3987	-4,4705
12	48,2432	0,0000	-3,3195	-1,6196	-5,8701

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	-1,3254
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	1,5263
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-0,1648
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	-1,4373
$(E-100)/100$ (%) :	-0,7087

(b) Utilizando a UC-2

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	-7,1055	0,0000	0,7856	0,3563	-1,8313
2	-5,7471	0,0000	0,6043	0,2694	-1,6834
3	-4,3887	0,0000	0,4155	0,1912	-1,5481
4	-2,4033	0,0000	0,1511	0,0695	-1,3860
5	-0,8359	0,0000	-0,0604	-0,0261	-1,2728
6	1,8809	0,0000	-0,4155	-0,1999	-1,1375
7	5,4336	0,0000	-0,8612	-0,3998	-1,0557
8	7,6280	0,0000	-1,1407	-0,5302	-1,0321
9	11,3898	0,0000	-1,6015	-0,7474	-1,0887
10	14,1066	0,0000	-1,9263	-0,8952	-1,1705
11	15,6740	0,0000	-2,1076	-0,9821	-1,2130
12	18,4953	0,0000	-2,4248	-1,1298	-1,3530

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	-0,6271
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	1,4424
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-0,4083
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	-1,3106
$(E-100)/100$ (%) :	-0,1587

Cascata com corte e eficiência constantes

(a) Utilizando a UC-1

estágio	$(G-G_{ot})/G_{ot}$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	-16,3514	0,0000	1,5751	0,7454	0,0000
2	-12,9730	0,0000	1,2025	0,5705	0,0000
3	-9,3243	0,0000	0,8468	0,4049	0,0000
4	-5,2703	0,0000	0,4573	0,2209	0,0000
5	-1,3514	0,0000	0,1186	0,0552	0,0000
6	5,0000	0,0000	-0,3980	-0,1932	0,0000
7	12,4324	0,0000	-0,9400	-0,4509	0,0000
8	18,7838	0,0000	-1,3549	-0,6534	0,0000
9	27,0270	0,0000	-1,8545	-0,8926	0,0000
10	34,3243	0,0000	-2,2525	-1,0951	0,0000
11	40,5405	0,0000	-2,5658	-1,2423	0,0000
12	48,2432	0,0000	-2,9215	-1,4171	0,0000

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	-0,9495
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	1,1291
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-0,1648
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	0,0000
$(E-100)/100$ (%) :	-0,6295

(b) Utilizando a UC-2

estágio	$(G-G_{ot})/G_{ot}$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	-7,1055	0,0000	1,0576	0,4780	0,0000
2	-5,7471	0,0000	0,8460	0,3824	0,0000
3	-4,3887	0,0000	0,6421	0,2955	0,0000
4	-2,4033	0,0000	0,3475	0,1564	0,0000
5	-0,8359	0,0000	0,1209	0,0521	0,0000
6	1,8809	0,0000	-0,2644	-0,1217	0,0000
7	5,4336	0,0000	-0,7176	-0,3390	0,0000
8	7,6280	0,0000	-1,0047	-0,4606	0,0000
9	11,3898	0,0000	-1,4579	-0,6779	0,0000
10	14,1066	0,0000	-1,7752	-0,8257	0,0000
11	15,6740	0,0000	-1,9565	-0,9039	0,0000
12	18,4953	0,0000	-2,2586	-1,0429	0,0000

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	-0,1736
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	0,7470
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-0,4083
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	0,0000
$(E-100)/100$ (%) :	-0,1480

Cascata com corte simétrico e fator de separação constante

(a) Utilizando a UC-1

estágio	(G-Got)/Got (%)	(θ - θ_{ot})/ θ_{ot} (%)	(α - α_{ot})/ α_{ot} (%)	(β - β_{ot})/ β_{ot} (%)	(δU - δU_{ot})/ δU_{ot} (%)
1	-16,4865	-0,0209	0,0000	0,0000	-16,4305
2	-12,9730	0,0000	0,0000	0,0000	-12,9605
3	-9,4595	0,0000	0,0000	0,0000	-9,4327
4	-5,2703	0,0000	0,0000	0,0000	-5,2802
5	-1,4865	0,0000	0,0000	0,0000	-1,4401
6	5,0000	0,0000	0,0000	0,0000	4,9621
7	12,4324	0,0209	0,0000	0,0000	12,3822
8	18,6486	0,0209	0,0000	0,0000	18,6918
9	26,8919	0,0209	0,0000	0,0000	26,9504
10	34,3243	0,0417	0,0000	0,0000	34,3126
11	40,4054	0,0417	0,0000	0,0000	40,4893
12	48,2432	0,0417	0,0000	0,0000	48,2679

(Rp-Rpid)/Rpid (%) :	0,0363
(Rw-Rwid)/Rwid (%) :	0,0212
(P/F-P/Fid)/(P/Fid) (%) :	-0,0898
(ΔU - $nt*\delta U_{ot}$)/($nt*\delta U_{ot}$) (%) :	3,5026
(E-100)/100 (%) :	0,0000

(b) Utilizando a UC-2

estágio	(G-Got)/Got (%)	(θ - θ_{ot})/ θ_{ot} (%)	(α - α_{ot})/ α_{ot} (%)	(β - β_{ot})/ β_{ot} (%)	(δU - δU_{ot})/ δU_{ot} (%)
1	-7,2100	-0,0430	0,0000	0,0000	-7,1930
2	-5,8516	-0,0430	0,0000	0,0000	-5,8919
3	-4,5977	-0,0215	0,0000	0,0000	-4,5609
4	-2,6123	-0,0215	0,0000	0,0000	-2,6069
5	-1,0449	0,0000	0,0000	0,0000	-1,0053
6	1,6719	0,0215	0,0000	0,0000	1,7117
7	5,2247	0,0215	0,0000	0,0000	5,1808
8	7,4190	0,0430	0,0000	0,0000	7,4101
9	11,1808	0,0859	0,0000	0,0000	11,2174
10	14,0021	0,1074	0,0000	0,0000	14,0508
11	15,7785	0,1289	0,0000	0,0000	15,7736
12	18,7043	0,1719	0,0000	0,0000	18,7329

(Rp-Rpid)/Rpid (%) :	0,0195
(Rw-Rwid)/Rwid (%) :	0,0517
(P/F-P/Fid)/(P/Fid) (%) :	-0,0560
(ΔU - $nt*\delta U_{ot}$)/($nt*\delta U_{ot}$) (%) :	1,0758
(E-100)/100 (%) :	0,0000

Cascata com corte simétrico e parâmetros C_1 e C_5 constantes

(a) Utilizando a UC-1

estágio	$(G-G_{ot})/G_{ot}$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	-17,1622	-0,3754	1,4650	0,7270	-2,1109
2	-13,9189	-0,3128	1,1601	0,5797	-1,6425
3	-10,6757	-0,2294	0,8553	0,4233	-1,2723
4	-6,6216	-0,1251	0,4996	0,2485	-0,9658
5	-2,7027	-0,0417	0,1694	0,0828	-0,8039
6	3,3784	0,1043	-0,3303	-0,1656	-0,7923
7	10,5405	0,2503	-0,8976	-0,4509	-1,1046
8	16,8919	0,3754	-1,3634	-0,6810	-1,6193
9	25,4054	0,5422	-1,9561	-0,9846	-2,6083
10	33,2432	0,6674	-2,4642	-1,2423	-3,7650
11	40,2703	0,7925	-2,8961	-1,4631	-4,9390
12	49,1892	0,9385	-3,4127	-1,7208	-6,6046

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	-1,9637
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	1,1291
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	1,3723
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	-1,4698
$(E-100)/100$ (%) :	-0,5685

(b) Utilizando a UC-2

estágio	$(G-G_{ot})/G_{ot}$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	-7,7325	-0,2793	0,9216	0,4606	-1,6456
2	-6,5831	-0,2363	0,7554	0,3737	-1,5575
3	-5,4336	-0,1719	0,5817	0,2868	-1,4757
4	-3,4483	-0,0859	0,3097	0,1477	-1,3766
5	-1,8809	-0,0215	0,0755	0,0348	-1,3105
6	0,7315	0,0859	-0,2719	-0,1391	-1,2539
7	4,1797	0,2363	-0,7327	-0,3737	-1,2570
8	6,4786	0,3222	-1,0349	-0,5215	-1,2948
9	10,5538	0,4941	-1,5486	-0,7822	-1,4537
10	13,7931	0,6230	-1,9565	-0,9821	-1,6425
11	16,0920	0,7304	-2,2284	-1,1212	-1,7967
12	19,7492	0,8593	-2,6590	-1,3384	-2,1082

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	-1,8709
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	0,8861
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	1,5041
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	-1,4018
$(E-100)/100$ (%) :	-0,1034

Cascata com corte simétrico e eficiência constante

(a) Utilizando a UC-1

estágio	(G-Got)/Got (%)	(θ - θ_{ot})/ θ_{ot} (%)	(α - α_{ot})/ α_{ot} (%)	(β - β_{ot})/ β_{ot} (%)	(δU - δU_{ot})/ δU_{ot} (%)
1	-17,1622	-0,4380	1,6513	0,8190	0,0000
2	-13,9189	-0,3337	1,3041	0,6534	0,0000
3	-10,5405	-0,2503	0,9654	0,4785	0,0000
4	-6,6216	-0,1460	0,5758	0,2853	0,0000
5	-2,7027	-0,0626	0,2371	0,1196	0,0000
6	3,3784	0,0834	-0,2710	-0,1380	0,0000
7	10,5405	0,2294	-0,8129	-0,4049	0,0000
8	16,8919	0,3337	-1,2363	-0,6257	0,0000
9	25,4054	0,4797	-1,7614	-0,8834	0,0000
10	33,2432	0,6048	-2,1932	-1,1043	0,0000
11	40,1351	0,7091	-2,5489	-1,2791	0,0000
12	48,7838	0,8133	-2,9554	-1,4908	0,0000

(Rp-Rpid)/Rpid (%) :	-1,4530
(Rw-Rwid)/Rwid (%) :	0,8156
(P/F-P/Fid)/(P/Fid) (%) :	1,0349
(ΔU - $nt*\delta U_{ot}$)/($nt*\delta U_{ot}$) (%) :	0,0003
(E-100)/100 (%) :	-0,5107

(b) Utilizando a UC-2

estágio	(G-Got)/Got (%)	(θ - θ_{ot})/ θ_{ot} (%)	(α - α_{ot})/ α_{ot} (%)	(β - β_{ot})/ β_{ot} (%)	(δU - δU_{ot})/ δU_{ot} (%)
1	-7,6280	-0,3437	1,1482	0,5736	0,0000
2	-6,5831	-0,3008	0,9820	0,4867	0,0000
3	-5,4336	-0,2363	0,7932	0,3911	0,0000
4	-3,5528	-0,1504	0,5137	0,2520	0,0000
5	-1,8809	-0,0644	0,2719	0,1304	0,0000
6	0,5225	0,0430	-0,0755	-0,0435	0,0000
7	3,9707	0,1719	-0,5363	-0,2694	0,0000
8	6,1651	0,2793	-0,8309	-0,4172	0,0000
9	10,1358	0,4296	-1,3220	-0,6692	0,0000
10	13,3751	0,5585	-1,6921	-0,8517	0,0000
11	15,5695	0,6445	-1,9414	-0,9821	0,0000
12	19,1223	0,7734	-2,3266	-1,1733	0,0000

(Rp-Rpid)/Rpid (%) :	-1,0177
(Rw-Rwid)/Rwid (%) :	0,3576
(P/F-P/Fid)/(P/Fid) (%) :	0,9505
(ΔU - $nt*\delta U_{ot}$)/($nt*\delta U_{ot}$) (%) :	0,0000
(E-100)/100 (%) :	-0,0979

Cascata com vazão de alimentação e fator de separação constantes

(a) Utilizando a UC-1

estágio	$(G-G_{ot})/G_{ot}$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	0,0000	-2,6694	0,0000	0,2116	-0,1388
2	0,0000	-4,5255	0,0000	0,3589	-0,3065
3	0,0000	-3,8790	0,0000	0,3129	-0,2429
4	0,0000	-5,3389	0,0000	0,4325	-0,4048
5	0,0000	-4,0459	0,0000	0,3221	-0,2545
6	0,0000	-9,2596	0,0000	0,7454	-1,0352
7	0,0000	-4,2336	0,0000	0,3405	-0,2718
8	0,0000	-10,6986	0,0000	0,8650	-1,3360
9	0,0000	-5,5683	0,0000	0,4509	-0,4222
10	0,0000	-14,9114	0,0000	1,2147	-2,4521
11	0,0000	-5,2138	0,0000	0,4233	-0,3701
12	0,0000	-43,9208	0,0000	3,6441	-19,3858

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	46,7672
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	20,5690
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-62,2103
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	-0,7520
$(E-100)/100$ (%) :	-17,8418

(b) Utilizando a UC-2

estágio	$(G-G_{ot})/G_{ot}$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	0,0000	0,2578	0,0000	-0,0435	0,0047
2	0,0000	-1,6541	0,0000	0,2086	-0,0975
3	0,0000	-0,9882	0,0000	0,1304	-0,0535
4	0,0000	-2,4919	0,0000	0,3216	-0,1620
5	0,0000	-1,1600	0,0000	0,1477	-0,0598
6	0,0000	-4,5542	0,0000	0,5997	-0,3760
7	0,0000	-1,3534	0,0000	0,1825	-0,0677
8	0,0000	-4,5757	0,0000	0,6171	-0,3744
9	0,0000	-2,7282	0,0000	0,3737	-0,1683
10	0,0000	-5,3061	0,0000	0,7214	-0,4625
11	0,0000	-2,3631	0,0000	0,3303	-0,1274
12	0,0000	-16,9066	0,0000	2,2945	-3,2708

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	25,5150
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	11,0665
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-30,1499
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	-0,1964
$(E-100)/100$ (%) :	-2,2542

Cascata com vazão de alimentação e parâmetros C_1 e C_5 constantes

(a) Utilizando a UC-1

estágio	$(G-G_{ot})/G_{ot}$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	0,0000	-2,6694	-0,1355	0,1472	-1,8333
2	0,0000	-4,5255	-0,2794	0,2209	-3,6319
3	0,0000	-3,8790	-0,2286	0,1932	-3,0247
4	0,0000	-5,3389	-0,3387	0,2577	-4,4301
5	0,0000	-4,0459	-0,2456	0,2024	-3,1924
6	0,0000	-9,2596	-0,6012	0,4325	-8,1256
7	0,0000	-4,2336	-0,2625	0,2116	-3,4122
8	0,0000	-10,6986	-0,6944	0,4877	-9,4558
9	0,0000	-5,5683	-0,3557	0,2669	-4,7134
10	0,0000	-14,9114	-0,9400	0,6810	-13,2497
11	0,0000	-5,2138	-0,3387	0,2485	-4,4185
12	0,0000	-43,9208	-1,9815	2,1993	-37,7827

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	42,9941
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	21,7814
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-62,2103
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	-5,3235
$(E-100)/100$ (%) :	-19,3475

(b) Utilizando a UC-2

estágio	$(G-G_{ot})/G_{ot}$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	0,0000	0,2578	0,2493	0,0782	1,7668
2	0,0000	-1,6541	-0,0076	0,2086	-0,1919
3	0,0000	-0,9882	0,0755	0,1564	0,4484
4	0,0000	-2,4919	-0,1284	0,2607	-1,0840
5	0,0000	-1,1600	0,0453	0,1738	0,2344
6	0,0000	-4,5542	-0,3928	0,4085	-3,1874
7	0,0000	-1,3534	0,0076	0,1825	-0,0519
8	0,0000	-4,5757	-0,4079	0,4085	-3,3023
9	0,0000	-2,7282	-0,1889	0,2781	-1,5292
10	0,0000	-5,3061	-0,5137	0,4606	-4,1235
11	0,0000	-2,3631	-0,1662	0,2520	-1,3058
12	0,0000	-16,9066	-1,7072	1,3297	-14,8847

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	24,8818
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	11,6506
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-30,1499
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	-1,0992
$(E-100)/100$ (%) :	-2,5617

Cascata com fator de separação e parâmetros C_1 e C_5 constantes

(a) Utilizando a UC-1

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	-3,3784	-4,5255	0,0000	0,3681	-3,7187
2	-3,5135	-4,6298	0,0000	0,3681	-3,8228
3	-3,9189	-5,1303	0,0000	0,4141	-4,3491
4	-3,9189	-5,0469	0,0000	0,4049	-4,2739
5	-4,7297	-5,9437	0,0000	0,4785	-5,2108
6	-5,2703	-6,5276	0,0000	0,5245	-5,8181
7	-5,1351	-6,3399	0,0000	0,5153	-5,6503
8	-6,2162	-7,5287	0,0000	0,6073	-6,8995
9	-6,6216	-7,8832	0,0000	0,6349	-7,2928
10	-7,5676	-8,9885	0,0000	0,7270	-8,4842
11	-10,9459	-12,6799	0,0000	1,0306	-12,5036
12	-17,9730	-20,6674	0,0000	1,6840	-21,6240

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	36,2210
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	18,9176
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-56,1370
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	-5,6082
$(E-100)/100$ (%) :	-13,5425

(b) Utilizando a UC-2

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\theta_{ot})/\theta_{ot}$ (%)	$(\alpha-\alpha_{ot})/\alpha_{ot}$ (%)	$(\beta-\beta_{ot})/\beta_{ot}$ (%)	$(\delta U-\delta U_{ot})/\delta U_{ot}$ (%)
1	-0,1045	-1,6756	0,0000	0,2173	-0,2045
2	-0,2090	-1,7830	0,0000	0,2260	-0,3178
3	-0,7315	-2,2986	0,0000	0,2955	-0,8590
4	-0,6270	-2,2127	0,0000	0,2868	-0,7945
5	-1,3584	-2,9431	0,0000	0,3824	-1,5528
6	-1,8809	-3,4801	0,0000	0,4606	-2,1365
7	-1,6719	-3,2223	0,0000	0,4259	-1,9194
8	-2,7168	-4,3179	0,0000	0,5823	-3,0883
9	-3,0303	-4,4898	0,0000	0,6084	-3,3306
10	-3,7618	-5,2846	0,0000	0,7127	-4,2085
11	-6,4786	-8,2707	0,0000	1,1212	-7,4038
12	-12,2257	-14,6294	0,0000	1,9903	-14,4080

$(R_p-R_{pid})/R_{pid}$ (%) :	32,9912
$(R_w-R_{wid})/R_{wid}$ (%) :	14,8494
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-36,9940
$(\Delta U-nt*\delta U_{ot})/(nt*\delta U_{ot})$ (%) :	-1,8847
$(E-100)/100$ (%) :	-3,6318

Cascata com fator de separação e eficiência constantes

(a) Utilizando a UC-1

estágio	(G-Got)/Got (%)	(θ - θ ot)/ θ ot (%)	(α - α ot)/ α ot (%)	(β - β ot)/ β ot (%)	(δ U- δ Uot)/ δ Uot (%)
1	0,1351	5,1929	0,0000	-0,4141	0,0000
2	0,2703	-4,3170	0,0000	0,3497	0,0000
3	0,0000	-1,1470	0,0000	0,0920	0,0000
4	0,2703	-4,7550	0,0000	0,3865	0,0000
5	0,1351	-2,5443	0,0000	0,2024	0,0000
6	0,8108	-7,7164	0,0000	0,6257	0,0000
7	0,1351	-3,3994	0,0000	0,2761	0,0000
8	0,5405	-6,6736	0,0000	0,5337	0,0000
9	0,4054	-4,9635	0,0000	0,4049	0,0000
10	0,5405	-6,0271	0,0000	0,4877	0,0000
11	0,2703	-4,3170	0,0000	0,3497	0,0000
12	1,2162	-10,1147	0,0000	0,8190	0,0000

(Rp-Rpid)/Rpid (%) :	21,7670
(Rw-Rwid)/Rwid (%) :	11,5597
(P/F-P/Fid)/(P/Fid) (%) :	-38,7042
(Δ U-nt* δ Uot)/(nt* δ Uot) (%) :	0,0000
(E-100)/100 (%) :	-6,0808

(b) Utilizando a UC-2

estágio	(G-Got)/Got (%)	(θ - θ ot)/ θ ot (%)	(α - α ot)/ α ot (%)	(β - β ot)/ β ot (%)	(δ U- δ Uot)/ δ Uot (%)
1	0,0000	3,1579	0,0000	-0,4172	0,0000
2	0,1045	-1,5038	0,0000	0,1912	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,1045	-2,1912	0,0000	0,2868	0,0000
5	0,0000	-0,6874	0,0000	0,0869	0,0000
6	0,3135	-3,8238	0,0000	0,5041	0,0000
7	0,1045	-1,2460	0,0000	0,1651	0,0000
8	0,2090	-2,7927	0,0000	0,3737	0,0000
9	0,2090	-2,7497	0,0000	0,3737	0,0000
10	0,1045	-1,7186	0,0000	0,2434	0,0000
11	0,1045	-2,1912	0,0000	0,3042	0,0000
12	0,3135	-3,9313	0,0000	0,5388	0,0000

(Rp-Rpid)/Rpid (%) :	14,1772
(Rw-Rwid)/Rwid (%) :	6,7830
(P/F-P/Fid)/(P/Fid) (%) :	-19,0282
(Δ U-nt* δ Uot)/(nt* δ Uot) (%) :	0,0000
(E-100)/100 (%) :	-0,9786

Cascata com eficiência e parâmetros C_1 e C_5 constantes

(a) Utilizando a UC-1

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\thetaot)/\thetaot$ (%)	$(\alpha-\alphaot)/\alphaot$ (%)	$(\beta-\betaot)/\betaot$ (%)	$(\delta U-\delta Uot)/\delta Uot$ (%)
1	-16,2162	-0,1251	1,5497	0,7454	0,0000
2	-12,9730	-0,4171	1,2109	0,6165	0,0000
3	-10,1351	-0,6257	0,9146	0,4877	0,0000
4	-6,7568	-0,7716	0,6012	0,3497	0,0000
5	-3,7838	-0,8342	0,3303	0,2301	0,0000
6	0,6757	-0,7925	-0,0423	0,0368	0,0000
7	5,8108	-0,5631	-0,4573	-0,1748	0,0000
8	9,8649	-0,2503	-0,7537	-0,3405	0,0000
9	15,8108	0,4588	-1,1686	-0,5981	0,0000
10	21,8919	1,4181	-1,5581	-0,8558	0,0000
11	28,2432	2,7112	-1,9223	-1,1227	0,0000
12	38,9189	5,6100	-2,4812	-1,5736	0,0000

$(Rp-Rpid)/Rpid$ (%) :	-0,4743
$(Rw-Rwid)/Rwid$ (%) :	1,3381
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-1,2145
$(\Delta U-nt*\delta Uot)/(nt*\delta Uot)$ (%) :	0,0000
$(E-100)/100$ (%) :	-0,5507

(b) Utilizando a UC-2

estágio	$(G-Got)/Got$ (%)	$(\theta-\thetaot)/\thetaot$ (%)	$(\alpha-\alphaot)/\alphaot$ (%)	$(\beta-\betaot)/\betaot$ (%)	$(\delta U-\delta Uot)/\delta Uot$ (%)
1	-5,3292	-1,5038	0,7932	0,5649	0,0000
2	-5,1202	-1,5038	0,7705	0,5562	0,0000
3	-4,9112	-1,4823	0,7403	0,5388	0,0000
4	-4,0752	-1,4608	0,6043	0,4693	0,0000
5	-3,5528	-1,4393	0,5212	0,4346	0,0000
6	-2,7168	-1,3963	0,4004	0,3737	0,0000
7	-1,1494	-1,3534	0,1813	0,2607	0,0000
8	-0,8359	-1,2889	0,1209	0,2347	0,0000
9	1,1494	-1,2030	-0,1435	0,0956	0,0000
10	2,1944	-1,0956	-0,2946	0,0174	0,0000
11	2,4033	-1,0311	-0,3248	0,0000	0,0000
12	3,7618	-0,8808	-0,5137	-0,1043	0,0000

$(Rp-Rpid)/Rpid$ (%) :	9,4400
$(Rw-Rwid)/Rwid$ (%) :	4,8637
$(P/F-P/Fid)/(P/Fid)$ (%) :	-13,5429
$(\Delta U-nt*\delta Uot)/(nt*\delta Uot)$ (%) :	0,0000
$(E-100)/100$ (%) :	-0,5596

Cascata com parâmetros C1 e C5 constantes, considerando válidas as equações teóricas para o cálculo de β e γ

(a) Utilizando a UC-1

estágio	(G-Got)/Got (%)	(θ - θ_{ot})/ θ_{ot} (%)	(α - α_{ot})/ α_{ot} (%)	(β - β_{ot})/ β_{ot} (%)	(δU - δU_{ot})/ δU_{ot} (%)
1	-15,2703	-1,1262	1,3634	0,7454	-1,0237
2	-12,5676	-1,0845	1,1093	0,6165	-0,6824
3	-9,8649	-1,0219	0,8637	0,4969	-0,4106
4	-6,4865	-0,9385	0,5589	0,3405	-0,1735
5	-3,2432	-0,8759	0,2794	0,2024	-0,0463
6	1,7568	-0,7716	-0,1440	-0,0092	-0,0116
7	7,8378	-0,6465	-0,6266	-0,2485	-0,2140
8	12,9730	-0,5422	-1,0162	-0,4509	-0,5610
9	20,0000	-0,4171	-1,5243	-0,7086	-1,2666
10	26,2162	-0,2920	-1,9646	-0,9294	-2,0820
11	31,6216	-0,1877	-2,3118	-1,1043	-2,8801
12	38,5135	-0,0834	-2,7521	-1,3343	-4,0599

(Rp-Rpid)/Rpid (%) :	1,8449
(Rw-Rwid)/Rwid (%) :	2,8850
(P/F-P/Fid)/(P/Fid) (%) :	-6,7630
(ΔU -nt δU_{ot})/(nt δU_{ot}) (%) :	-0,5082
(E-100)/100 (%) :	-1,0777

(b) Utilizando a UC-2

estágio	(G-Got)/Got (%)	(θ - θ_{ot})/ θ_{ot} (%)	(α - α_{ot})/ α_{ot} (%)	(β - β_{ot})/ β_{ot} (%)	(δU - δU_{ot})/ δU_{ot} (%)
1	-5,3292	-1,6756	0,7705	0,5736	-0,1652
2	-5,3292	-1,6541	0,7705	0,5736	-0,1636
3	-5,2247	-1,6327	0,7554	0,5649	-0,1573
4	-4,3887	-1,5682	0,6345	0,5041	-0,1196
5	-3,8662	-1,5252	0,5590	0,4606	-0,0960
6	-3,1348	-1,4608	0,4608	0,4085	-0,0692
7	-1,7764	-1,3749	0,2568	0,3042	-0,0283
8	-1,3584	-1,3319	0,2115	0,2781	-0,0173
9	0,4180	-1,2030	-0,0529	0,1391	0,0063
10	1,5674	-1,1171	-0,2040	0,0608	0,0110
11	1,7764	-1,0311	-0,2342	0,0435	0,0157
12	3,1348	-0,9237	-0,4155	-0,0521	0,0063

(Rp-Rpid)/Rpid (%) :	9,9115
(Rw-Rwid)/Rwid (%) :	5,1140
(P/F-P/Fid)/(P/Fid) (%) :	-14,1468
(ΔU -nt δU_{ot})/(nt δU_{ot}) (%) :	-0,0862
(E-100)/100 (%) :	-0,5801

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- GRESLEY, J. A. B. Enriching recycled uranium. *Atom*, p. 13-16, March 1989.
- 2- MIGLIAVACCA, S. C. P. Notas de aula da disciplina TNM-777 – Processos de Separação Isotópica do Urânio, 2002.
- 3- LINDEMANN, F. A. & ASTON, F. W. *Phil. Mag.* (6) 37, 523, 1919 apud JORDAN, I *Separação dos Isótopos de Urânio pelo Processo da Ultracentrifugação em Fase Gasosa*. São Paulo: 1980. (IPEN-Inf-3).
- 4- BEAMS, J. W. High speed centrifuging. *Revs. Mod. Phys.*, 10: 245-63, 1938 apud JORDAN, I *Separação dos Isótopos de Urânio pelo Processo da Ultracentrifugação em Fase Gasosa*. São Paulo: 1980. (IPEN-Inf-3).
- 5- BEAMS, J. W. & SKARSTROM, C. The concentration of isotopes by the evaporative centrifuge method. *Phys. Rev.*, 56: 266-72, 1939 apud JORDAN, I *Separação dos Isótopos de Urânio pelo Processo da Ultracentrifugação em Fase Gasosa*. São Paulo: 1980. (IPEN-Inf-3).
- 6- HUMPHREYS, R. F. Separation of bromine isotopes by centrifugation. *Phys. Rev.*, Ithaca, N. Y., 56: 684-91, 1939 apud JORDAN, I *Separação dos Isótopos de Urânio pelo Processo da Ultracentrifugação em Fase Gasosa*. São Paulo: 1980. (IPEN-Inf-3).
- 7- BEAMS, J. W.; HAGG, A. C.; MURPHREE, E. V. *Developments in the centrifuge separation project*. Washington, D. C., United States Atomic Energy Commission, 1951 (TID-5230) apud JORDAN, I *Separação dos Isótopos de Urânio pelo Processo da Ultracentrifugação em Fase Gasosa*. São Paulo: 1980. (IPEN-Inf-3).
- 8- BEYERLE, K.; GROTH, W.; HARTECK, P.; JENSEN, H. Ueber Gaszentrifugen. *Angew. Chem., Chemie Ingr-Tech.*, Berlin (59), 1950 apud JORDAN, I *Separação dos Isótopos de Urânio pelo Processo da Ultracentrifugação em Fase Gasosa*. São Paulo: 1980. (IPEN-Inf-3).

- 9- GROTH, W.; BEYERLE, K.; IHLE, H.; MURRENHOF, A.; NANN, E.; WELGE, K. H. Anreicherung der Uran-Isotope nach dem Gaszentrifugenverfahren. In: FORSCHUNGBERICHTe des Wirtschaftsund Berchtsministeriums. Koel u. Opladen, Westdeutscher Verlag, 1958. (Wirtschafts-und Werkersministerium Nordrhein-Westfalen Nr. 510).
- 10- ZIPPE, G.; BEAMS, J. W.; KUHLETHAU, A. R. *The development of short bowl ultracentrifuges: progress report n° 1*. Charlottesville, Univ. Virginia, Dec. 1958 (ORO-210) apud JORDAN, I *Separação dos Isótopos de Urânio pelo Processo da Ultracentrifugação em Fase Gasosa*. São Paulo: 1980. (IPEN-Inf-3).
- 11- JORDAN, I. *Separação dos Isótopos de Urânio pelo Processo da Ultracentrifugação em Fase Gasosa*. São Paulo: 1980. (IPEN-Inf-3).
- 12- COHEN, K. *The Theory of Isotope Separation as Applied to Large Scale Production of ^{235}U* , New York, NY, Mc Graw Hill, 1951.
- 13- BENEDICT, M. ; PIGFORD, T. H. & LEVI, H. W. *Nuclear Chemical Engineering*, 2nd. Ed., New York, NY, Mac Graw Hill, 1981.
- 14- VILLANI, S. *Separazione degli Isotopi*, Roma, Comitato Nazionale per Energia Nucleare, 1974.
- 15- VILLANI, S. *Uranium Enrichment*, Topics in Applied Physics , Vol. 35, 1979.
- 16- SOUBBARAMAYER. Enrichment : Centrifuge Process - *International Nuclear Fuel Seminar*, Pierrelatte, France, CEA-CONF-10076, Sep., 1989.
- 17- MIGLIAVACCA, S. C. P. *Modelagem do Comportamento Separativo de Ultracentrifugas Via Rede Neural*. São Paulo: 1999. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- 18- JORDAN, I. ; BUCHMANN, J. H. *Teoria da Separação Isotópica na Centrífuga a Contracorrente e Cálculo dos Parâmetros de Separação*, São Paulo, Jul, 1983. (IPEN-Pub-C-5).
- 19- PRATT, H. R. C. *Countercurrent Separation Processes*, Amsterdam, Elsevier, 1967.
- 20- UNITED STATES. Department of Energy. National Security Program Office. *Safeguards Training Course for ABACC Inspectors*, Rio de Janeiro, Outubro, 1994.

- 21- PORTOGHESE, C. P. P.; BUCHMANN, J. H. Effect of differences in gas-dynamic behavior on the separation performance of ultracentrifuges connected in parallel. In: FIFTH WORKSHOP ON SEPARATION PHENOMENA IN LIQUIDS AND GASES, September 22-26, 1996, Foz do Iguaçu. *Proceedings ...* Foz do Iguaçu: 1996. p. 144-155.
- 22- JORDAN, I. *Teoria e Projeto de Cascatas de Separação de Isótopos Quase-Ideais*, São Paulo, Jul, 1983. (IPEN-Pub-C-4).
- 23- OKAMOTO, T. ; NISHIMURA, H. CCS-I : A Code to Analyze a Dynamic Behavior of Uranium Enrichment Process in a Centrifuge Cascade : An Application to the Safeguards Effectiveness Assessment, *Japan Atomic Energy Research Inst.*, Tokyo, Japan, JAERI-M-90-031, Feb, 1990.
- 24- MIGLIAVACCA, S. C. P. *Cálculo dos parâmetros de separação de uma centrífuga a contracorrente com variação axial do fluxo interno*. São Paulo: 1991. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- 25- APELBLAT, A. ; ILAMED-LEHRER, Y. The Theory of a Real Isotope Enriching Cascade - I, II, *J. Nucl. Energy*, v. 22 : 1-14, 1968.
- 26- KAWAI, T.; INOUE, K.; MOTODA, H.; KOBAYASHI, T.; KIGUCHI, T. Sensitivity Analysis of Ideal Centrifuge Cascade for Producing Slightly Enriched Uranium, *Nuclear Science and Engineering*: 50, 63-72, 1973.
- 27- KIGUCHI, T. ; MOTODA, H. ; KAWAI, T. Stochastic Fluctuation in a Uranium Enriching Cascade Using the Centrifuge Process, *Nuclear Technology*, v. 17, Feb, 1973.
- 28- VON HALLE, E. Cascade Design Considerations for Cascades Composed of Stages with Large Separation Factors, *Enrichment Planning Department, Operations Analysis and Planning Division, Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant*, K/04-4175, Feb., 1978.
- 29- KAI, T. Basic Characteristics of a Low Uranium Enrichment Cascade by Centrifugation (I), *Journal of the Atomic Energy Society of Japan*, Vol. 17, No. 1, Jan., 1975.
- 30- YAMAMOTO, I. ; KANAGAWA, A. Analytical Solution for Real Cascade Equation in Steady State, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 12[2], Feb, 1975.

- 31- SHIBATA, Y.; YONENAGA, H.; OSAKI, N. Development of a computer program for performance analysis of gas centrifuge cascade: summary of paper to the American Nuclear Society winter meeting, Washington, 12th-15th November, 1978. *American Nuclear Society Transactions*. V 30, 1978, pp 323-324. CONF-7811109.
- 32- PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. *Chemical Engineers' Handbook*. 5. ed., Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., 1973.
- 33- SANTELER, D. J. Exit loss in viscous tube flow, *J. Vac. Sci. Technol.*, A, v. 4, n. 3, p. 348-352, May/Jun, 1986.
- 34- OKAMOTO, T. ; NISHIMURA, H. CCS-I : A Code to Analyze a Dynamic Behavior of Uranium Enrichment Process in a Centrifuge Cascade : An Application to the Safeguards Effectiveness Assessment, *Japan Atomic Energy Research Inst.*, Tokyo, Japan, JAERI-M-90-031, Feb, 1990.
- 35- OKAMOTO, T. ; KIYOSE, R. Analysis of Power Supply Loss Accidents in UF₆ Centrifuge Cascade with Side Flows, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 15[4], Apr, 1978.
- 36- YAMASHITA, S. Accurate Kinetics Equations of a Square Cascade for Gas Separation, *Nuclear Science and Engineering*, v. 54, 1974.
- 37- YAMASHITA, S. ; OKAMOTO, T. Effect of Separation Factors on Product Assay of an Ideal Cascade Composed of UF₆ Centrifuges, *Nuclear Technology*, v. 26, Jun, 1975.
- 38- NISHIMURA, H. Development of a Safeguards Evaluation Method that has False Alarm Analysis as a Key Element and Its Application to a Centrifuge Enrichment Plant, *Japan Atomic Energy Research Inst.*, Tokyo, JAERI-M-91-219, Jan, 1992.
- 39- OLANDER, D. R. Separative Performance Transients in a Gas Centrifuge, *Nuclear Technology*, v. 44, Jul, 1979.
- 40- GMELIN, L. *Handbuch der Anorganischen Chemie*, Springer – Verlag, 1980.
- 41- BOX, G. E. P. ; HUNTER, W. G. ; HUNTER, J. S. *Statistics for Experimenters*, John Wiley & Sons, 1978.

-
- 42- FIFTH WORKSHOP ON SEPARATION PHENOMENA IN LIQUIDS AND GASES, September 22-26, 1996, Foz do Iguaçu. *Proceedings ...* Foz do Iguaçu: 1996.
- 43- KAHANER, D. ; MOLER, C. ; NASH, S. *Numerical Methods and Software*, Prentice Hall, Inc. , 1989.
- 44- ATALLA, L. T. *Interpretação Quantitativa de Resultados Experimentais*, São Paulo, Jan, 1978. (INF-IEA-60).



M22616



Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Diretoria de Ensino & Informação Científica e Tecnológica
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3816 - 9148
SÃO PAULO - São Paulo - Brasil
[http: //www.ipen.br](http://www.ipen.br)

O Ipen é uma autarquia vinculada à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo, gerida técnica, administrativa e financeiramente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência e Tecnologia, e associada à Universidade de São Paulo.