

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

#### 4.1. RESULTADOS PRELIMINARES

##### 4.1.1. CONFIRMAÇÃO DA METODOLOGIA FENOMENOLÓGICA NA TRANSPOSIÇÃO DE PRATOS PARA RECHEIOS NA ABSORÇÃO DE ACETONA

Como um exemplo do contido na revisão bibliográfica, que se constituiu numa confirmação da metodologia fenomenológica aplicada à comparação entre pratos e recheios, foi feito um estudo prospectivo de uma transposição de pratos para recheios, utilizando um método empírico para cálculo da altura da unidade de transferência (Riemer, 2007). Este estudo evidenciou a vantagem de utilizar recheios, desde que a implantação da proposta seja acompanhada de adequada alteração da dos diâmetros dos bocais de entrada e saída da corrente gasosa (Nasser & Taqueda, 2008). A descrição de toda a metodologia, incluindo apresentação de resultados segue.

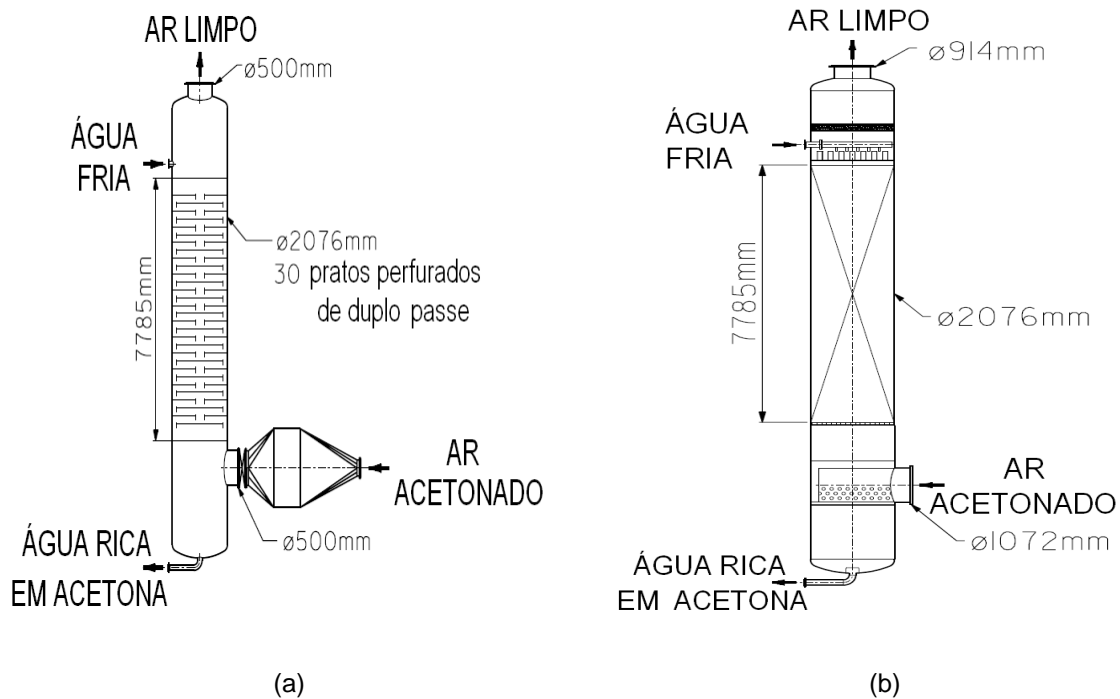
O conjunto de dados estabelecido para executar a simulação designada de *Fotografia*, realizada com as medidas operacionais levantadas na unidade e tratadas através do balanço estatisticamente coerente, fornece todas as informações requeridas de processo, bem como os dados hidráulicos para satisfazer as Equações 2.2 a 2.5 estágio-a-estágio, consistindo das composições molares e mássicas das correntes líquida e gasosa, como ainda as vazões

volumétricas e mássicas de ambas as correntes, como também suas propriedades físicas e condições operacionais, caracterizando o equilíbrio líquido-vapor.

Uma marcante vantagem deste método sobre os usuais é que o cálculo se faz estágio-a-estágio, aumentando sua precisão, considerando as variações de vazões de ambas as fases, tornando a linha de operação ligeiramente não linear, já que a constante de equilíbrio é uma função da concentração, temperatura e pressão. Ao passo que os métodos usuais consideram, para soluções diluídas, a razão entre as vazões molares de líquido e de gás constante ao longo de toda a coluna, determinando a linha de operação como uma reta, dependendo somente da relação líquido-gás, assumida constante (Bennet, 1978).

Usando a Equação 2.2, calcula-se a altura de uma unidade de transferência de massa, ou de um estágio de equilíbrio, designado  $HTO_G$ , uma vez que o processo em estudo, de absorção de acetona em água usando recheios, é governado pela turbulência da corrente gasosa e pela pressão parcial da acetona. Como o cálculo é efetuado estágio-a-estágio, determina-se o valor médio de  $HTO_G$ , observando que os valores calculados pela metodologia descrita, comparados aos valores encontrados em referências tradicionalmente utilizadas na indústria (Leva, 1953, Vital et alli, 1984, Green, 2007), para a operação unitária em estudo, para o binário acetona-água, são bastante próximos.

Estes resultados permitiram efetuar a implementação da modificação descrita, servindo ainda como um resultado prático de comparação da utilização de pratos com recheios, assinalando que, para que isto se tornasse possível, além da implantação criteriosa dos recheios e internos, deve-se adequar a coluna para a modificação, alterando os diâmetros dos bocais de entrada e saída das correntes gasosas, quais sejam, a alimentação da corrente de ar acetonado, na porção inferior da coluna, e a saída de ar lavado, pelo topo da coluna, conforme é possível verificar pela Figura 4.1 (Nasser & Taqueda, 2008).



**Figura 4.1** (a) Coluna de pratos perfurados com radiador de resfriamento e (b) Coluna de recheios. Fonte: Nasser e Taqueda, 2008

Como o objetivo do estudo ilustrado pela Figura 4.1 era o de resolver o gargalo da unidade industrial, constituído pela baixa capacidade, comparando a vazão volumétrica original com a da proposta implementada, verifica-se que o resultado foi o de incrementá-la em aproximadamente 150%, com uma redução de 85% da perda de carga, o que significa marcante redução do consumo energético.

A Tabela 4.1 indica resumidamente os percentuais de economias em termos custos proporcionais de produção.

**Tabela 4.1** Resumo das Economias

<b>Descrição</b>	<b>% Economia (por item)</b>	<b>Explicação</b>
Aumento da capacidade de produção.	4	Aumento da capacidade volumétrica de absorção de ar acetinado.
Redução do consumo de energia na movimentação de ar.	34	Redução da perda de carga na coluna. Menor elevação de pressão diminui ruído, melhorando conforto.
Redução das perdas de acetona.	35	Aumento da eficiência do processo. Menor emissão de VOC.
Redução do consumo de energia na destilação e refrigeração da água recirculada à absorção.	10	Melhoria da eficiência da absorção aumenta a concentração de acetona na água rica.
Redução da manutenção.	22	Desativação de 4 colunas velhas, utilização de ventiladores de menor elevação de pressão, com motores elétricos de menor potência.

Detalhando-se a seguir, cada um dos itens indicados na Tabela 4.1:

- Aumento da capacidade de produção: apesar do significativo aumento da capacidade volumétrica de ar acetinado alimentado à coluna, resultante da modificação, ter aumentado os já mencionados 150%, a modificação resultou em um aumento de somente 4% da capacidade de produtiva, porque esta implantação permitiu a desativação de 4 colunas antigas.

- Redução do consumo de energia: energia elétrica para a movimentação

de ar acetonado gerado na fiação até as colunas de absorção, reduzida no percentual indicado, devido à expressiva diminuição da perda de carga. Com a modificação, 3 ventiladores que efetuavam a elevação de pressão de 15 kPa foram substituídos por 1 ventilador para efetuar a elevação de pressão em 5 kPa. Uma consequência importante da menor elevação de pressão requerida é a redução do nível de ruído, visto que os ventiladores são todos instalados internamente a prédios. Esta diminuição de ruído melhora o conforto do ambiente, reduzindo a possibilidade de afastamentos.

- Redução das Perdas de Acetona: o valor indicado na tabela 4.1, de 35%, deve-se tanto ao aumento da eficiência da coluna, devido à melhoria de transferência de massa e energia, pela utilização de recheios estruturados como meio de contato, como também, devido à menor perda de carga através do leito de recheios e da tubulação adequada, foi possível melhorar a aspiração, aumentando a vazão mássica de acetona recuperada, como também reduzindo a emissão de vapores de acetona para o meio ambiente.

- Redução do Consumo de Energia na Destilação e Refrigeração: o aumento da concentração de acetona na água rica resulta na redução de consumo de vapor na destilação, e, energia elétrica na refrigeração.

- Redução da Manutenção: a redução em 22% observada se deve à desativação de 4 colunas antigas providas de pratos perfurados, juntamente com seus respectivos radiadores, estes de manutenção difícil e custosa. A possibilidade de utilização de ventiladores de menor elevação de pressão, acionados por motores elétricos de menor potência, também contribui para a redução indicada.

#### 4.1.2. DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA EMPÍRICA

##### 4.1.2.1. LEVANTAMENTO DE DADOS OPERACIONAIS

Os dados operacionais foram levantados, visando atender ao exposto na Figura 3.3 – Representação esquemática da *Fotografia*. O objetivo é de compor um conjunto de dados de operação das colunas de absorção, incluindo a concentração residual de acetona na água gelada, complementados pelos dados referentes à limpeza das colunas, como ainda os dados operacionais da fiação, levantando os títulos do produto processado na data das medições, bem como sua velocidade. Do ambiente, levantou-se ainda a umidade absoluta.

Os dados foram levantados de forma sistemática entre os meses de Março a Setembro de 2007, para todas as colunas de absorção, e, entre Janeiro de 2008 e Junho de 2009, somente para as colunas de absorção providas de recheios.

Como o levantamento foi iniciado em um momento de transição, em que as antigas colunas de pratos (ano de construção: 1927) estavam para ser definitivamente desativadas, substituídas por nova coluna provida de recheios estruturados, decidiu-se efetuar o levantamento sobre as três colunas providas de pratos remanescentes (ano de construção: 1971), identificadas por 14, 15 e 16, bem como a primeira coluna de absorção provida de recheios estruturados (ano de construção: 2005).

No período inicial indicado, foram levantados aproximadamente 100 conjuntos de dados para cada uma das colunas indicadas. Uma análise preliminar dos conjuntos de dados históricos levantados para as três colunas providas de pratos evidenciou que estes possibilitavam uma análise fenomenológica consistente. Contudo, o mesmo não ocorreu com a coluna provida de recheios, em que o conjunto de dados não possibilitava uma análise processual consistente, por não

ter sido fornecida, por falha no instrumento de medida, a perda de carga através do leito. Visando evitar equívocos de interpretação, este conjunto de dados foi desconsiderado. A inclusão da concentração residual de acetona, resultou na perda de 14 conjuntos de dados para as colunas providas de pratos, disponibilizando, portanto, 83 conjuntos de dados históricos por coluna, para realizar a análise estatística.

Para as colunas providas de recheios, 22 conjuntos de dados para cada uma das colunas foram coletados, no período recente indicado.

#### 4.1.2.2. ADEQUAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA COERENTE

As medidas das concentrações de acetona apresentadas na Figura 3.3, além das medidas de pressão e velocidade do ar limpo são entradas do balanço coerente de massa, conforme o exposto detalhadamente no item 3.3.2, mas que será retomado, por se tratar de sua adequação, visando sua melhoria de ergonomia e precisão.

O primeiro passo é medir a velocidade de saída do ar limpo saindo pelo bocal de topo da coluna, usando o anemômetro, com o qual também se faz a medida de temperatura em diversos pontos do bocal de saída, conforme o detalhadamente exposto no item 3.3.1.1.3.1, para as colunas providas de pratos. No mesmo item, indica-se que a medição de vazão para as colunas providas de recheios se faz pela malha de vazão existente, em que o elemento primário é um Pitot.

O diâmetro da tubulação na saída é conhecido e, assim, é possível determinar a vazão volumétrica de ar limpo. A concentração de acetona na corrente de saída é

medida por um monitor de concentração de compostos orgânicos voláteis em misturas gasosas com ar, conforme o detalhado no item 3.3.1.1.3.3, na condição real de pressão e temperatura, isto é, expressa em  $\text{g}/\text{m}^3$ .

Devido ao quase desprezível conteúdo de acetona nesta corrente de saída, e, supondo que o ar esteja saturado de água, o que é a realidade, devido à elevada vazão de água, bem como por sua eficiente distribuição, a concentração de água e a densidade do ar de saída são obtidas por cartas psicométricas, usando a pressão barométrica local e a temperatura de operação, para as colunas de pratos e a pressão medida, para as colunas providas de pratos. Com a densidade, calcula-se a vazão mássica da corrente de saída, e, com a concentração de água, sua vazão mássica de saída. A vazão mássica de acetona é calculada pelo produto da vazão volumétrica da corrente de saída e a concentração de acetona medida. Subtraindo da vazão mássica da mistura, as vazões mássicas de água e acetona, conforme referenciado, a vazão mássica de ar na saída é calculada.

Para a determinação da vazão de ar acetonado na alimentação, assume-se que as vazões mássicas de ar na entrada e na saída são iguais, devido à baixa solubilidade do ar na corrente líquida de saída, constituída de água e acetona à concentração de 2,5 – 3,5% em massa de acetona. A hipótese de baixa solubilidade do ar na corrente líquida não é afastada da realidade (Chen, 1993; Jamar, 1999), sendo, contudo, importante assinalar que os modelos de equilíbrio do simulador levam em consideração esta solubilidade, confirmando a hipótese.

Através de balanços de massa parciais e globais, e, considerando válido o comportamento de gás ideal para as correntes gasosas de entrada e saída, é possível aplicar um balanço coerente de massa, através de um processo iterativo fazendo uso da correção de alguns fatores, como por exemplo, a velocidade de



saída do gás, que pode não apresentar o valor desejado. Por outro lado, a determinação da concentração de acetona, temperatura e densidade da corrente de fundo e da água gelada ajudam o estabelecimento do balanço coerente de massa, considerando que suas medições são precisas e conhecidas, conforme o detalhado no item 3.3.1.1. O método iterativo consiste em comparar os dados de massa (frações e vazões) obtidos através do parâmetro velocidade, com aqueles obtidos pelo uso das concentrações de acetona.

A cada iteração uma velocidade de saída da corrente de ar limpo é recalculada e então esse valor é recolocado nos cálculos para uma nova iteração com todas as variáveis. A diferença entre os valores obtidos pelos dois métodos, medida de velocidade de saída e de massa de acetona nas diversas correntes, constitui o erro que deve ser minimizado pelo balanço coerente de massa.

Dessa forma, uma importante etapa do trabalho consiste na elaboração de balanço de massa coerente para obtenção da convergência entre as diferentes informações disponíveis a respeito do funcionamento da coluna. Inicialmente, elabora-se uma rotina para realização deste balanço de massa. Ao ser alimentada com as informações provenientes das medições, fornece como resposta, através de um processo iterativo rápido, informações coerentes a respeito das vazões e composições das correntes pertencentes ao processo de absorção. Mantendo-se então a mesma lógica utilizada para a convergência das informações, desenvolve-se, numa planilha Excel, o mesmo trabalho utilizando macros (Ferrari & Pasqualini, 2008).

A confirmação da efetividade da adequação do balanço coerente de massa foi feita através de simulações, com o objetivo de comparar os resultados obtidos através dos balanços, usando dados reais levantados, com aqueles simulados

levando em conta os modelos de equilíbrio. Primeiramente, a vazão mássica, composição, temperatura e pressão são fornecidas para a corrente de ar acetinado e vazão volumétrica e a temperatura para a corrente de água fria. As pressões de entrada e saída também são informadas.

As concentrações de acetona nas saídas das correntes líquida e gasosa são obtidas pelo ajuste manual do número de estágios de equilíbrio. A *Fotografia* é estabelecida, quando os resultados das simulações são próximos aos calculados com os valores medidos.

Os resultados gerados pelo novo balanço foram comparados às simulações, para as medidas referentes ao banco de dados da coluna 14, correspondentes aos dias 7, 13, 15 e 21 de março de 2007.

A planilha contendo estas indicações encontra-se na Tabela 4.2

**Tabela 4.2** Comparação de resultados entre balanço coerente e Aspen

			07.03		13.03		15.03		21.03	
<b>Ar Acetonado (1)</b>			Atual	Aspen	Atual	Aspen	Atual	Aspen	Atual	Aspen
Vazão de Ar Acetonado	m3/h		11513,2178	11513,2192	11821,0922	11821,0922	11017,8533	11017,8533	11371,1741	11371,1741
Vazão Massica de Ar Acetonado	Kg/h		13943,3032	13943,3050	14034,0506	14034,0500	13143,2803	13143,2800	13502,0487	13502,0500
Fração Massa Acetona	%		3,5106	3,5106	3,4570	<b>3,4570</b>	3,6280	3,6280	3,5543	3,5543
Fração Massa Agua	%		1,9627	1,9627	2,0131	<b>2,0131</b>	1,7894	1,7894	1,5371	1,5371
Fração Massa Ar	%		94,5267	94,5267	94,5299	<b>94,5299</b>	94,5826	94,5826	94,9086	94,9086
<b>Ar Lavado (2)</b>										
Vazão de Ar Lavado	m3/h		11477,1606	<b>11506,2241</b>	11572,7033	<b>9862,2481</b>	10796,6376	9215,8674	11120,0047	9469,2181
Vazão Normal de Ar Lavado	Nm3/h		11022,5025	<b>10309,4975</b>	11098,4618	<b>11012,9450</b>	10368,9378	10295,5422	10652,9574	10577,8211
Vazão Massica de Ar Lavado	Kg/h		13235,2877	<b>13183,1067</b>	13326,4960	<b>12610,3727</b>	12450,5189	11783,6702	12791,5559	12107,8818
Fração Massa Acetona	%		0,0128	<b>0,0128</b>	0,0084	<b>0,0084</b>	0,0223	0,0223	0,0116	0,0116
Fração Massa Agua	%		1,6230		1,6714		1,4192		1,1368	
Fração Massa Ar	%		98,3642		98,3201		98,5585		98,8516	
Vazão mássica de acetona	Kg/h		169,8620	168,6647	112,2552	105,8767	277,4736	262,7287	149,0081	140,4635
Concentração de acetona	g/Nm <sup>3</sup>		15,4105	16,3601	10,1145	9,6138	26,7601	25,5187	13,9875	13,2791
<b>erro</b>	<b>%</b>		<b>5,8047</b>		<b>-5,2075</b>		<b>-4,8646</b>		<b>-5,3349</b>	
<b>Água Gelada (3)</b>										
Vazão de Agua Gelada	m <sup>3</sup> /h		15,4900	<b>15,4900</b>	15,7300	<b>15,7300</b>	15,3900	<b>15,3900</b>	16,3500	<b>16,3500</b>
Vazão Massica de Agua Gelada	kg/h		15428,0400		15667,0800		15328,4400		16284,6000	
Fração Massa Acetona	%		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
Fração Massa Agua	%		100,0000		100,0000		100,0000		100,0000	
Fração Massa Ar	%		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
<b>Água Rica (4)</b>										
Vazão de Agua Rica	m3/h		15,4311		15,6702		15,3315		16,2879	
Vazão Massica de Agua Rica	Kg/h		16136,0555	<b>16416,0110</b>	16374,6345	<b>16629,6072</b>	16021,2014	<b>16234,9279</b>	16995,0928	<b>17187,6803</b>
Fração Massa Acetona	%		3,0230	<b>2,9715</b>	2,9560	<b>2,7677</b>	2,9590	<b>2,7778</b>	2,8150	<b>2,6337</b>
Fração Massa Agua	%		95,9770		96,0440		96,0410		96,1850	
Fração Massa Ar	%		1,0000		1,0000		1,0000		1,0000	
Vazão mássica de acetona	Kg/h		487,7930	487,8018	484,0342	460,2626	474,0673	450,9657	478,4119	452,6633
<b>erro</b>	<b>%</b>		<b>0,00</b>		<b>-5,16</b>		<b>-5,12</b>		<b>-5,69</b>	

A finalidade de utilizar a simulação como forma de avaliar a real coerência dos balanços de massa estatisticamente coerentes obtidos é que o simulador foi efetivamente utilizado na realização de muitos estudos e implantações anteriores, constituindo-se, portanto, em boa base comparativa inicial, para permitir a evolução da avaliação empírica pretendida.

O resultado desta etapa, que se pode observar na Tabela 4.2 é que os erros resultantes dos cálculos das variáveis de interesse, concentração de acetona, na corrente de ar lavado, e concentração de acetona na corrente líquida de saída são inferiores aos erros observados nas medições efetuadas, o que é considerado satisfatório, tomando-se a decisão que o balanço coerente adequado substituirá o descrito em 3.3.2 na evolução do presente estudo, bem como em futuros estudos a serem realizados.

As Tabelas 4.3 a 4.5 apresentam o desenvolvimento das planilhas contendo o balanço coerente de massa efetuado pelo balanço de massa adequado, para a coluna 14, como um exemplo, indicando que foram estabelecidas para todos os conjuntos de dados históricos das colunas estudadas, não sendo incluídas no texto por serem idênticas, evitando repetição.

A partir do levantamento de dados operacionais das colunas 14, 15 e 16, tabelas idênticas às exemplificadas foram estabelecidas para todos os conjuntos de dados históricos constituindo, portanto, um universo de dados operacionais de aproximadamente 300 conjuntos, sendo 100 conjuntos para cada coluna, que foram tratados pelos balanços coerentes, tornando possível o início da análise estatística.

Da mesma forma que o descrito para as colunas providas de pratos, os balanços coerentes das colunas NAT 1 e NAT 2, providas de recheios, foram executados estabelecendo tabelas idênticas para todos os conjuntos de dados históricos,

constituindo um universo de dados operacionais de 22 conjuntos para cada coluna, que foram tratados pelos balanços coerentes, tornando possível o início da análise estatística.

**Tabela 4.3** Planilha com os dados de entrada do balanço de massa do dia 29.3.2007, com dados da coluna 14

DADOS DE ENTRADA			TAG
<b>Ar Acetonado (1)</b>			<b>aa</b>
Concentração de acetona	49,75	g/Nm <sup>3</sup>	<b>Caaa</b>
Pressão	782,43	mmHg	<b>Paa</b>
Temperatura	54,00	°C	<b>Taa</b>
<b>Ar Lavado (2)</b>			<b>al</b>
Concentração de acetona	0,191	g/m <sup>3</sup>	<b>Caal</b>
Pressão	700,00	mmHg	<b>Pal</b>
Temperatura	9,50	°C	<b>Tal</b>
Velocidade do ar	17,884	m/s	<b>Val</b>
<b>Água Gelada (3)</b>			<b>ag</b>
vazão de água	15,96	m <sup>3</sup> /h	<b>Qag</b>
Temperatura	8,50	°C	<b>Tag</b>
Densidade água gelada	1000,22	Kg/m <sup>3</sup>	<b>dag</b>
<b>Água Rica (4)</b>			<b>ar</b>
Concentração de acetona	2,561	% p/p	<b>Caar</b>
Temperatura	22,00	°C	<b>Tar</b>
Densidade da água rica	990,50	Kg/m <sup>3</sup>	<b>dar</b>
Umidade absoluta	0,0157	(Kg água/Kg ar seco)	<b>Ua</b>
<b>Acessórios de Cálculos</b>			
Diâmetro da Tubulação	500,00	mm	<b>Diametro</b>
Área de escoamento da Tubulação	0,19625	m <sup>2</sup>	<b>Area</b>
Porcentagem de Ar na Água Rica	0,60	% (adotado)	<b>porcar</b>
<b>Cálculos Preliminares</b>			
<b>Ar Lavado</b>			
Vazão	3,51	m <sup>3</sup> /s	<b>Qa11</b>
Vazão	12635,05	m <sup>3</sup> /h	<b>Qa12</b>
Vazão	11246,19	Nm <sup>3</sup> /h	<b>Qa13</b>

**Tabela 4.4** Planilha com as iterações necessárias para garantir a coerência do balanço de massa para o dia 29.3.2007, com dados da coluna 14

Cálculos												
Balanço Material	1ª iteração	Unidade	TAG	2ª iteração	3ª iteração	4ª iteração	5ª iteração	6ª iteração	7ª iteração	8ª iteração	9ª iteração	10ª iteração
<b>Água Gelada (3)</b>												
Massa de Água Gelada	15963,59	kg/h	Mag	15963,591	15963,591	15963,59	15963,59	15963,59	15963,59	15963,59	15963,59	15963,59
<b>Ar Lavado (2)</b>												
Massa de acetona	2,41	kg/h	Macal	1,830	1,827	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83
Massa de ar lavado total	14493,18	Kg/h	Mal	10990,032	10974,922	10974,86	10974,86	10974,86	10974,86	10974,86	10974,86	10974,86
Massa de Ar	14266,78	Kg/h	Maral	10818,354	10803,480	10803,42	10803,42	10803,42	10803,42	10803,42	10803,42	10803,42
Massa da água	223,99	Kg/h	Magal	169,848	169,615	169,61	169,61	169,61	169,61	169,61	169,61	169,61
<b>Água Rica (4)</b>												
Volume teórico de água rica	16,12	m3/h	Var	16,117	16,117	16,12	16,12	16,12	16,12	16,12	16,12	16,12
Massa de água	15808,36	Kg/h	Magar	15808,365	15808,365	15808,36	15808,36	15808,36	15808,36	15808,36	15808,36	15808,36
Massa de acetona	418,07	Kg/h	Macar	418,067	418,067	418,07	418,07	418,07	418,07	418,07	418,07	418,07
Massa de ar	97,95	Kg/h	Marar	97,946	97,946	97,95	97,95	97,95	97,95	97,95	97,95	97,95
Massa de água rica	16324,38	Kg/h	Mar	16324,378	16324,378	16324,38	16324,38	16324,38	16324,38	16324,38	16324,38	16324,38
<b>Ar acetonado (1)</b>												
Massa de acetona	420,48	Kg/h	Macao	419,897	419,895	419,89	419,89	419,89	419,89	419,89	419,89	419,89
Massa de água	68,76	Kg/h	Magaa	14,622	14,389	14,39	14,39	14,39	14,39	14,39	14,39	14,39
Massa de ar	14364,72	Kg/h	Maraa	10916,300	10901,426	10901,36	10901,36	10901,36	10901,36	10901,36	10901,36	10901,36
Massa de ar acetonado	14853,97	Kg/h	Maa	11350,820	11335,710	11335,64	11335,64	11335,64	11335,64	11335,64	11335,64	11335,64
Mol de ar	498,08	Kg/Kmol	Molar	378,512	377,997	377,99	377,99	377,99	377,99	377,99	377,99	377,99
Mol de acetona	7,24	Kg/Kmol	Molac	7,230	7,230	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23
Mol de água	3,82	Kg/Kmol	Molag	0,812	0,799	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Mol total	509,14	Kg/Kmol	Moltotal	386,554	386,026	386,02	386,02	386,02	386,02	386,02	386,02	386,02
Massa molar ar acetonado	29,17	kg/Kmol	Mmaa	29,364	29,365	29,37	29,37	29,37	29,37	29,37	29,37	29,37
Densidade do ar acetonado	1,12	kg/m3	daa	1,128	1,128	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
Vazão de ar no ar acetonado	12819,91	m3/h	Varaa	9679,418	9665,874	9665,82	9665,82	9665,82	9665,82	9665,82	9665,82	9665,82
Volume de ar acetonado Normal	8451,87	Nm3/h	VolarN	8440,147	8440,096	8440,10	8440,10	8440,10	8440,10	8440,10	8440,10	8440,10
Volume de ar acetonado	9833,45	m3/h	Volaa	9819,813	9819,754	9819,75	9819,75	9819,75	9819,75	9819,75	9819,75	9819,75
Massa de ar	10892,09	Kg/h	Maracalc	10876,976	10876,911	10876,91	10876,91	10876,91	10876,91	10876,91	10876,91	10876,91
Massa de ar real no ar lavado	10990,03	Kg/h	Maralreal	10974,922	10974,857	10974,86	10974,86	10974,86	10974,86	10974,86	10974,86	10974,86
Velocidade de BM	13,92	m/s	VelBM	13,90	13,90	13,90	13,90	13,90	13,90	13,90	13,90	13,90
Velocidade de anemometro	18,15	m/s	VelAN	13,701	13,681	13,68	13,68	13,68	13,68	13,68	13,68	13,68
erro	4,23		erro	0,1987185	0,2178057	0,2178880	0,2178884	0,2178884	0,2178884	0,2178884	0,2178884	0,2178884
Teste de Validação				FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	TRUE
Velocidade Ideal do Anemometro	13,56	m/s	VelidealAN	13,54	13,54	13,54	13,54	13,54	13,54	13,54	13,54	13,54
<b>Ar Lavado</b>												
Vazão	2,66	m3/s	Qa11	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66
Vazão	9581,03	m3/h	Qa12	9567,86	9567,80	9567,80	9567,80	9567,80	9567,80	9567,80	9567,80	9567,80
Vazão	9152,63	Nm3/h	Qa13	9140,04	9139,99	9139,99	9139,99	9139,99	9139,99	9139,99	9139,99	9139,99

**Tabela 4.5** Planilha com as saídas do balanço de massa coerente para o dia 29.3.2007, com dados da coluna 14

Teste de Validação	TRUE	Unidade	TAG
<b>Resultados Balanço Material</b>			
Velocidade Ar Lavado (Balanço de Massa)	13,90	m/s	VelBM
Velocidade Ar Lavado (Anemometro)	13,68	m/s	VelAN
Velocidade Ideal Ar Lavado (Anemometro)	13,54	m/s	VelidealAN
<b>Ar Acetonado (1)</b>			
			aa
Vazão de Ar Acetonado	9665,82	m <sup>3</sup> /h	Varaa
Vazão Normal de Ar Acetonado	8440,10	Nm <sup>3</sup> /h	
Vazão Massica de Ar Acetonado	11335,64	Kg/h	-
Fração Massa Acetona	3,70	%	-
Fração Massa Agua	0,13	%	-
Fração Massa Ar	96,17	%	-
<b>Ar Lavado (2)</b>			
			al
Vazão de Ar Lavado m <sup>3</sup> /h	9567,80	m <sup>3</sup> /h	Qa12
Vazão Normal de Ar Lavado Nm <sup>3</sup> /h	9139,99	Nm <sup>3</sup> /h	Qa13
Vazão Massica de Ar Lavado	10974,86	Kg/h	Mal
Fração Massa Acetona	0,02	%	-
Fração Massa Agua	1,55	%	-
Fração Massa Ar	98,44	%	-
<b>Água Gelada (3)</b>			
			ag
Vazão de Agua Gelada m <sup>3</sup> /h	15,96	m <sup>3</sup> /h	Qag
Vazão Massica de Agua Gelada	15963,59	kg/h	Mag
Fração Massa Acetona	0,00	%	-
Fração Massa Agua	100,00	%	-
Fração Massa Ar	0,00	%	-
<b>Água Rica (4)</b>			
			ar
Vazão de Agua Rica m <sup>3</sup> /h	16,12	m <sup>3</sup> /h	Var
Vazão Massica de Agua Rica	16324,38	Kg/h	Mar
Fração Massa Acetona	2,56	%	-
Fração Massa Agua	96,84	%	-
Fração Massa Ar	0,60	%	-

[Ac]= 49,75 g/Nm<sup>3</sup>

[Ac]= 191,00 mg/m<sup>3</sup>



## 4.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA

### 4.2.1. TABULAÇÃO DOS RESULTADOS DOS BALANÇOS DE MASSA ESTATISTICAMENTE COERENTES E IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Todas as variáveis de saída dos balanços estatisticamente coerentes foram tabuladas num quadro resumo, para todos os dias em que os levantamentos foram executados. Estas variáveis são as de conhecido efeito fenomenológico.

Além destas variáveis, os levantamentos incluíram os denominados “ruídos”, conforme o detalhado na Introdução, e determinação explicitada no item 3.4.1 do capítulo de Metodologia e Métodos.

O quadro resumo final, constituído das variáveis descritas, foi construído numa planilha Excel, em que os dias de levantamento constituíam colunas e as variáveis linhas. Transpondo esta planilha, os dias passam a constituir as linhas e as variáveis de saída passam a constituir as colunas. Estas variáveis tabuladas nas colunas deste quadro são as que serão analisadas estatisticamente.

Além das variáveis já descritas, com a evolução da análise foram criadas outras variáveis, resultantes de relações entre as variáveis de efeito fenomenológico, com o objetivo específico de tornar os modelos de regressão obtidos de mais fácil manipulação ou mesmo compreensão. Destas, com o objetivo de facilitar a leitura, além de preservar a objetividade do texto, somente as de interesse comprovado serão descritas.

A Tabela 4.6 apresenta a listagem e identificação das variáveis, explicando que as contidas nas células em branco são as de efeito fenomenológico conhecido, as em amarelo são os ruídos e as em azul são as relações.

**Tabela 4.6** Identificação e descrição das variáveis

Variáveis $v_i$	Descrição das Variáveis
1	Vazão de água gelada
2	Temperatura de água gelada
3	[Ac] <sub>ar acetinado</sub>
4	Temperatura de ar acetinado
5	Pressão de alimentação
6	Perda de Carga
7	[Ac] <sub>ar lavado</sub>
8	Pressão de Saída
9	Temperatura de ar lavado
10	[Ac] <sub>água rica</sub>
11	Temperatura de águarica
12	fração mássica de acetona na corrente de ar acetinado
13	fração mássica de água na corrente de ar acetinado
14	fração mássica de ar na corrente de ar acetinado
15	vazão volumétrica de ar acetinado
16	vazão mássica de ar acetinado
17	vazão volumétrica de água gelada
18	vazão mássica de água gelada
19	fração mássica de acetona na corrente de água rica
20	fração mássica de água na corrente de água rica
21	fração mássica de ar na corrente de água rica
22	vazão volumétrica de água rica
23	vazão mássica de água rica
24	fração mássica de acetona na corrente de ar lavado
25	fração mássica de água na corrente de ar lavado
26	fração mássica de ar na corrente de ar lavado
27	vazão volumétrica de ar lavado
28	vazão mássica de ar lavado
29	título global médio
30	velocidade de fiação
31	tempo de limpeza
32	[Ac] <sub>água pobre</sub>
33	umidade absoluta no ar atmosférico
34	relação entre $v_{12}$ e $v_3$ , via erro médio calculado
35	relação entre $v_{12}$ e $v_3$ , via correção pela densidade, calculada ponto-a-ponto
36	relação direta entre $v_3$ e $v_{12}$ , resultando na massa específica nas condições de operação
37	relação entre $v_3$ e $v_{35}$
38	relação entre $v_{12}$ e $v_3$ , via aplicação da lei dos gases perfeitos conforme o exposto no texto
39	correção da massa específica para a condição normal
40	vazão volumétrica na condição normal
41	vazão mássica de acetona alimentada
42	fração mássica de acetona na corrente de alimentação, calculada na condição normal, expressa em g/Nm <sup>3</sup>
43	correção de $v_{42}$ para kg/Nm <sup>3</sup>

## 4.2.2. EVOLUÇÃO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises estatísticas foram efetuadas individualmente para cada uma das colunas de absorção existentes, conforme o detalhamento que se segue.

### 4.2.2.1. COLUNA 14

#### 4.2.2.1.1. MATRIZ DE CORRELAÇÕES

Conforme o descrito no item 2.2.2, esta matriz, também designada pelo Minitab de *Matrix Plot*, é utilizada para iniciar a análise estatística, indicando visualmente a potencial relação entre as variáveis avaliadas.

Foi estabelecida considerando as variáveis de efeito fenomenológico conhecido e todas as variáveis designadas como ruídos, conforme pode ser visualizado na Figura 4.2, sendo também possível ver que as variáveis analisadas possuem alguns dados muito dispersos, que podem prejudicar a análise como um todo.

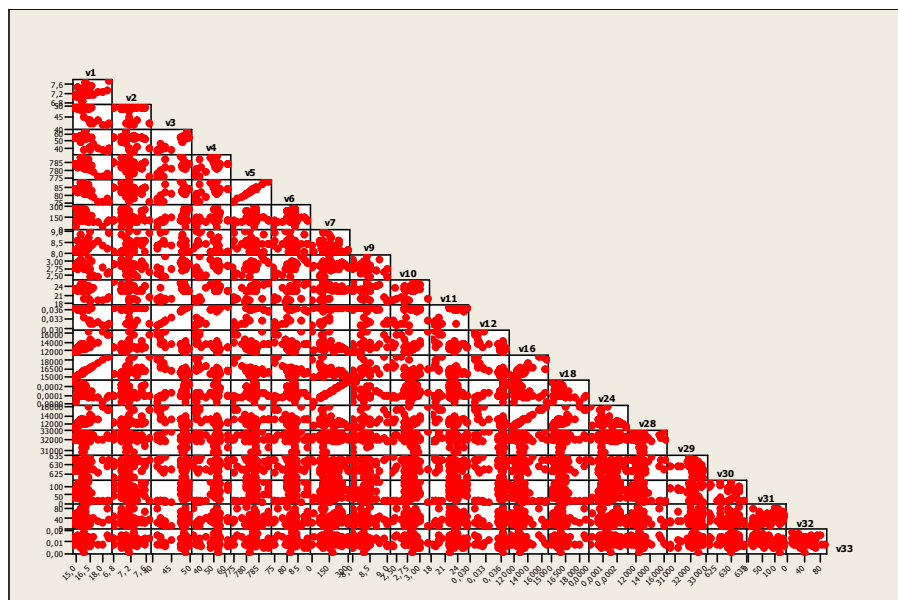


Figura 4.2 Matriz de correlações inicial da Coluna 14.

#### 4.2.2.1.2. CARTAS DE CONTROLE

Através das cartas de controle das variáveis analisadas que apresentaram pontos dispersos, é possível diagnosticar o quanto estes pontos estão dispersos, bem como a causa desta dispersão, eliminando os conjuntos correspondentes, caso necessário.

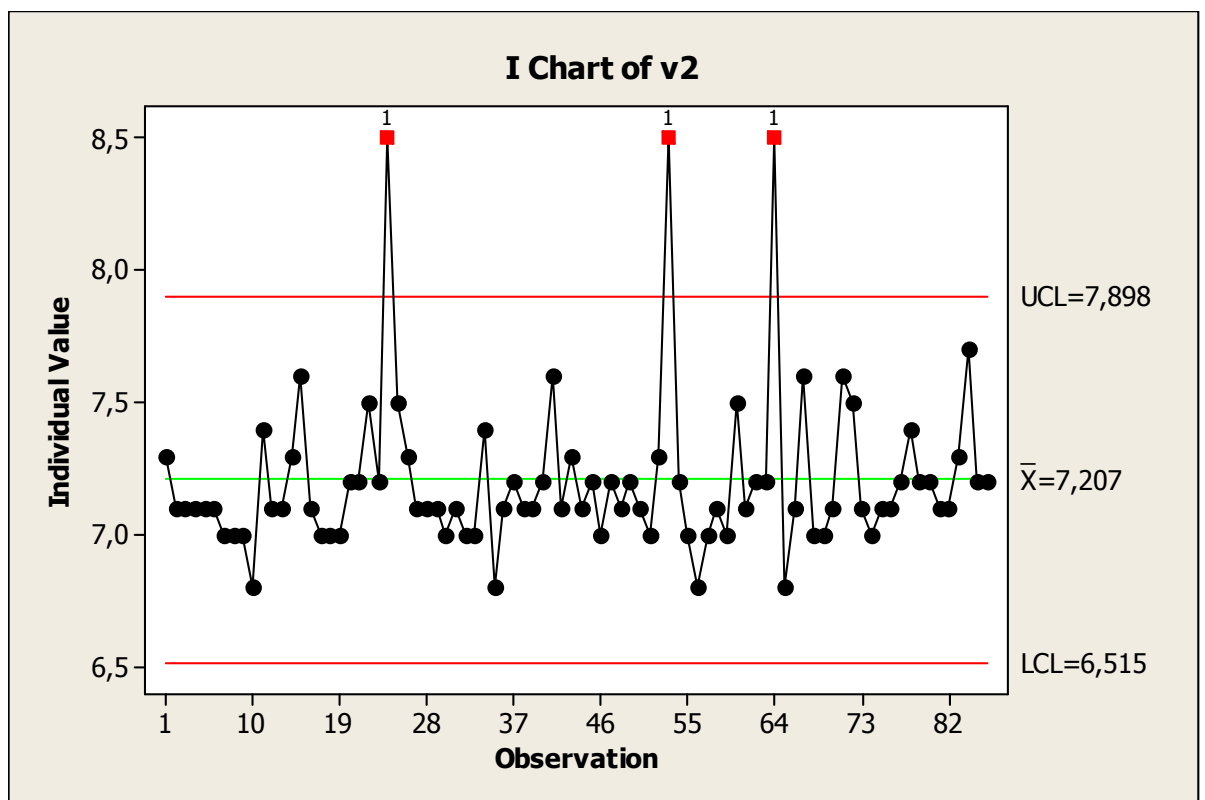


Figura 4.3 Carta de Controle da variável  $v_2$

A Figura 4.3, contendo a carta de controle da variável  $v_2$ , temperatura de água gelada, indica alguns pontos fora dos limites determinados de acordo com o exposto no item 2.2.3, que, contudo, estão dentro da normalidade operacional da unidade.

Para não carregar o texto com as todas as cartas de controle da Coluna 14, bem como das outras colunas analisadas, todas as demais cartas foram colocadas no Apêndice A, complementadas pelas análises efetuadas.

Pelo apresentado nas cartas de controle, bem como pelo descrito nas respectivas análises, foram eliminados 6 conjuntos de dados. Conforme exposto no item 2.2.3, a eliminação dos conjuntos de dados contendo os pontos dispersos, melhora a qualidade da matriz de correlações, proporcionando uma melhor visualização das correlações entre as diversas variáveis, como de fato ocorreu no presente estudo, mas que, devido à qualidade da cópia, bem como para evitar a repetição, não será incluída no texto. A análise estatística continua, para o caso presente, com 77 conjuntos de dados.

#### 4.2.2.1.3. TESTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Conforme o exposto no item 2.2.4, as correlações entre as variáveis contidas na Matriz de Correlação, são evidenciadas pelo teste de correlação de Pearson, contida na Figura 4.4.

	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v9	v10
v2	0,344								
	0,002								
v3	0,039	0,224							
	0,734	0,050							
v4	0,096	-0,038	0,612						
	0,408	0,741	0,000						
v5	-0,105	-0,179	-0,141	0,055					
	0,361	0,119	0,220	0,634					
v6	-0,105	-0,179	-0,141	0,055	1,000				
	0,361	0,119	0,220	0,634	*				
v7	-0,225	0,075	0,239	-0,093	-0,239	-0,239			
	0,050	0,514	0,036	0,420	0,036	0,036			
v9	0,335	0,793	-0,056	-0,170	-0,147	-0,147	0,004		
	0,003	0,000	0,626	0,139	0,203	0,203	0,975		
v10	-0,146	-0,535	-0,148	-0,026	0,516	0,516	-0,178	-0,580	
	0,204	0,000	0,200	0,824	0,000	0,000	0,121	0,000	
v11	-0,047	-0,239	-0,106	0,189	0,628	0,628	-0,314	-0,134	0,333
	0,685	0,036	0,359	0,100	0,000	0,000	0,005	0,244	0,003
v12	0,031	0,194	0,998	0,623	-0,106	-0,106	0,227	-0,084	-0,109
	0,792	0,091	0,000	0,000	0,359	0,359	0,047	0,468	0,345
v16	0,478	-0,272	-0,419	-0,178	0,372	0,372	-0,320	-0,229	0,736
	0,000	0,017	0,000	0,122	0,001	0,001	0,005	0,045	0,000
v24	-0,223	0,078	0,239	-0,094	-0,240	-0,240	1,000	0,007	-0,180
	0,051	0,500	0,036	0,418	0,036	0,036	0,000	0,953	0,116
v28	0,472	-0,278	-0,428	-0,180	0,380	0,380	-0,323	-0,231	0,738
	0,000	0,014	0,000	0,117	0,001	0,001	0,004	0,044	0,000
v29	-0,139	-0,123	0,017	-0,075	-0,188	-0,188	0,149	-0,046	-0,125
	0,227	0,286	0,886	0,517	0,101	0,101	0,197	0,693	0,277
v30	0,078	0,004	0,356	0,400	0,140	0,140	-0,067	-0,215	0,130
	0,500	0,974	0,002	0,000	0,224	0,224	0,562	0,061	0,259
v31	0,132	0,099	0,317	0,273	0,076	0,076	0,093	0,040	0,059
	0,254	0,390	0,005	0,016	0,513	0,513	0,423	0,733	0,609
v32	-0,070	-0,028	0,186	0,086	0,080	0,080	0,168	-0,068	0,048
	0,545	0,808	0,105	0,455	0,488	0,488	0,100	0,556	0,677
v33	-0,082	-0,092	0,055	0,031	-0,131	-0,131	0,067	-0,133	-0,159
	0,478	0,426	0,637	0,787	0,258	0,258	0,561	0,250	0,166
	v11	v12	v16	v24	v28	v29	v30	v31	v32
v12	-0,057								
	0,624								
v16	0,230	-0,395							
	0,044	0,000							
v24	-0,315	0,227	-0,321						
	0,005	0,047	0,004						
v28	0,244	-0,404	1,000	-0,324					
	0,032	0,000	0,000	0,004					
v29	-0,135	0,010	-0,182	0,148	-0,182				
	0,241	0,928	0,113	0,197	0,113				
v30	0,199	0,369	0,026	-0,068	0,025	-0,128			
	0,083	0,001	0,822	0,557	0,831	0,266			
v31	0,157	0,326	0,018	0,093	0,016	-0,108	-0,025		
	0,172	0,004	0,880	0,423	0,890	0,349	0,828		
v32	-0,064	0,186	-0,059	0,168	-0,061	0,061	-0,083	0,376	
	0,580	0,104	0,608	0,145	0,595	0,599	0,471	0,001	
v33	-0,023	0,053	-0,195	0,067	-0,194	0,198	0,193	-0,509	-0,164
	0,843	0,648	0,090	0,563	0,092	0,084	0,092	0,000	0,155

Figura 4.4 Teste de Correlação de Pearson para Coluna 14

Inicialmente, é interessante observar a coerência da análise estatística quanto às correlações das variáveis de efeito fenomenológico conhecido.

Quanto aos ruídos incluídos,  $v_{29}$ ,  $v_{30}$ ,  $v_{31}$  e  $v_{33}$  respectivamente título global, velocidade de fiação, tempo de limpeza e umidade absoluta não se evidenciou qualquer correlação que possibilite uma análise.

Quanto à variável  $v_{32}$ , concentração de acetona na água pobre, apesar de apresentar baixa ou quase nenhuma correlação com a maioria das variáveis, apresenta fraca correlação com  $v_7$ , concentração de acetona no topo, válida de ser explorada, por estar de acordo com o objetivo do estudo, qual seja, o de utilizar o observado na análise estatística para aumentar a abrangência das simulações fenomenológicas.

#### 4.2.2.1.4. DETERMINAÇÃO DO MELHOR SUBCONJUNTO

Com base na seleção das variáveis, iniciada via matriz de correlações e teste de correlação de Pearson, dá-se continuidade ao processo de seleção, eliminando as variáveis independentes excedentes, conforme o descrito no item 2.2.6.2, como etapa inicial para definir o modelo de regressão.

Esta etapa é iniciada pela definição para o Minitab das variáveis dependentes, o que, para o presente estudo, conforme já explicitado desde a Introdução, são as variáveis  $v_7$  e  $v_{10}$ , respectivamente as concentrações de acetona na corrente gasosa de ar lavado e a na corrente líquida de água rica.

Para a variável dependente  $v_7$ , como o número de variáveis independentes analisadas nas etapas anteriores era excessivo, e, para evitar uma longa descrição, detalha-se somente a etapa final do processo de seleção, inclusive por







Response is v10

Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows Cp	S	v v v v v v															
					v 1	v 2	v 3	v 3	v 3	v 3	v 3	v 3	v 3							
1	54,2	53,6	7830,4	0,066243																
1	2,5	1,2	16731,1	0,096592																X
2	86,3	86,0	2286,9	0,036426	X		X													
2	57,3	56,1	7292,9	0,064373		X	X													
3	99,6	99,6	4,8	0,0064873	X	X	X													
3	88,7	88,2	1880,3	0,033345	X		X													X
4	99,6	99,6	5,4	0,0064727	X	X	X													X
4	99,6	99,6	5,6	0,0064779	X	X	X													X
5	99,6	99,6	5,9	0,0064490	X	X	X					X	X							
5	99,6	99,6	6,3	0,0064668	X	X	X				X	X								
6	99,6	99,6	6,5	0,0064313	X	X	X				X	X	X							
6	99,6	99,6	6,6	0,0064363	X	X	X				X	X	X							
7	99,6	99,6	7,6	0,0064353	X	X	X				X	X	X	X						
7	99,6	99,6	7,8	0,0064425	X	X	X	X			X	X	X							
8	99,6	99,6	9,0	0,0064530	X	X	X	X	X		X	X	X	X						

**Figura 4.7** Saída do Minitab para seleção do melhor subconjunto de variáveis independentes para o estabelecimento do modelo final de regressão para v<sub>10</sub>.

O subconjunto assinalado, composto de 4 variáveis independentes, não é o que melhor se adequa aos critérios expostos no item 2.2.6.2, que indicaria o subconjunto com 3 variáveis independentes, todas de conhecido impacto fenomenológico, duas linhas acima do indicado, por resultar no menor c<sub>p</sub> de Mallows. Contudo, como o objetivo do presente estudo é justamente aumentar a abrangência das simulações fenomenológicas, avaliando outras variáveis de possível impacto, nesta seleção bastante participativas, optou-se pelo subconjunto assinalado, por ser muito representativo, já que corresponde a um coeficiente de determinação de 99,6%, com um “ruído”, velocidade de fiação, variável v<sub>30</sub>.

#### 4.2.2.1.5. AJUSTE DO MODELO DE REGRESSÃO

Conforme o descrito no item 2.2.6.3, definido o melhor subconjunto de variáveis independentes, ajusta-se o modelo de regressão múltipla, indicando-se, para a variável dependente v<sub>7</sub>, o modelo inicialmente ajustado na Figura 4.8.

### Regression Analysis: v7 versus v1; v2; v3; v6; v11; v12; v16; v32

The regression equation is

$$v7 = -19135 + 425 v1 + 446 v2 - 16591 v3 + 14,9 v6 - 411 v11 + 22905201 v12 - 0,578 v16 + 0,472 v32$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-19135	2021	-9,47	0,000
v1	425,15	49,58	8,58	0,000
v2	445,78	47,50	9,38	0,000
v3	-16591	1664	-9,97	0,000
v6	14,861	4,093	3,63	0,001
v11	-410,94	40,28	-10,20	0,000
v12	22905201	2295224	9,98	0,000
v16	-0,57835	0,05948	-9,72	0,000
v32	0,4724	0,2793	1,69	0,095

S = 40,0420    R-Sq = 68,3%    R-Sq(adj) = 64,6%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	8	235228	29404	18,34	0,000
Residual Error	68	109029	1603		
Total	76	344257			

Source	DF	Seq SS
v1	1	17368
v2	1	9093
v3	1	16255
v6	1	16659
v11	1	12165
v12	1	8022
v16	1	151082
v32	1	4585

**Figura 4.8** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_7$ , ajustado para os dados históricos tais quais, levantados para a Coluna 14.

Conforme o mencionado no item 4.2.2.1.4, de determinação do melhor subconjunto de regressão, o modelo inicial está bem ajustado, o que se pode observar pelo coeficiente de determinação ( $R^2_a$ ), assinalado em amarelo, bem como pelos baixos valores de  $p$ , conforme o indicado no item 2.2.6.3, assinalados em azul, para o “ruído”,  $v_{32}$ , inclusive.

Repetindo-se o processo para as variáveis consideradas mais adequadas para a variável dependente  $v_7$ , a Figura 4.9 apresenta o modelo inicial ajustado.

### Regression Analysis: v7 versus v1; v2; v3; v6; v11; v16; v32; v38

The regression equation is

$$v7 = 928589 + 484 v1 + 486 v2 + 593 v3 + 10,9 v6 - 462 v11 - 0,650 v16 + 0,436 v32 - 709707 v38$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	928589	76421	12,15	0,000
v1	484,27	45,67	10,60	0,000
v2	485,61	42,49	11,43	0,000
v3	593,03	47,99	12,36	0,000
v6	10,941	3,440	3,18	0,002
v11	-461,89	37,30	-12,38	0,000
v16	-0,65020	0,05483	-11,86	0,000
v32	0,4363	0,2463	1,77	0,081
v38	-709707	58439	-12,14	0,000

S = 35,3125    R-Sq = 75,4%    **R-Sq(adj) = 72,5%**

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	8	259463	32433	26,01	0,000
Residual Error	68	84794	1247		
Total	76	344257			

Source	DF	Seq SS
v1	1	17368
v2	1	9093
v3	1	16255
v6	1	16659
v11	1	12165
v16	1	67
v32	1	3942
v38	1	183914

**Figura 4.9** Saída do Minitab para o modelo adequado de regressão múltipla para  $v_7$ , ajustado para os dados históricos tais quais, levantados para a Coluna 14.

A análise feita para o outro modelo anteriormente apresentado é válida para este, ainda melhor em termos de ajuste, já que o coeficiente de determinação é 72,5%, assinalado em amarelo, bem como para os baixos valores de  $p$ , conforme o item 2.2.6.3, assinaladas em azul, inclusive para o “ruído” concentração de acetona residual na água pobre,  $v_{32}$ .

Conforme já mencionado, a variável  $v_{38}$  foi introduzida com o objetivo de obter um modelo de regressão provido de coeficientes mais adequadas. Esta variável é o resultado do quociente  $v_3$  por  $v_{12}$ , dividido por 1000, com o significado físico da

massa específica da corrente de alimentação, expressa em kg/m<sup>3</sup>, sendo v<sub>12</sub> expressa por:

$$v_{12} = \frac{v_3 \times v_5 \times v_{16}}{2,782252 \times 1000 \times v_{15} \times (v_4 + 273,16)} \quad (4.1)$$

Para a variável v<sub>10</sub>, definido o melhor subconjunto de variáveis independentes, ajusta-se o modelo de regressão múltipla, indica-se o modelo inicialmente ajustado na Figura 4.10.

#### Regression Analysis: v10 versus v1; v3; v16; v30

The regression equation is

$$v_{10} = -0,017 - 0,177 v_1 + 0,0550 v_3 + 0,000225 v_{16} + 0,000196 v_{30}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,0168	0,1022	-0,16	0,870
v1	-0,177371	0,002088	-84,94	0,000
v3	0,054982	0,001273	43,19	0,000
v16	0,00022517	0,00000180	125,01	0,000
v30	0,0001963	0,0001703	1,15	0,253

S = 0,00647269 R-Sq = 99,6% R-Sq(adj) = 99,6%

#### Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	0,71496	0,17874	4266,31	0,000
Residual Error	72	0,00302	0,00004		
Total	76	0,71798			

Source	DF	Seq SS
v1	1	0,01539
v3	1	0,01445
v16	1	0,68506
v30	1	0,00006

**Figura 4.10** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para v<sub>10</sub>, ajustado para os dados históricos tais quais, levantados para a Coluna 14.

Conforme o mencionado no item 4.2.2.1.4, de determinação do melhor subconjunto, o modelo está bem ajustado, o que se pode observar pelo elevado coeficiente de determinação de 99,6%, assinalado em amarelo, bem como pelos baixos valores de p, assinaladas em azul, conforme o item 2.2.6.3, exceção feita

para “ruído”, velocidade de fiação,  $v_{30}$ , de acordo com o comentário feito após a Figura 4.7, qual seja, a de aumentar a abrangência do modelo ajustado, não o restringindo somente às variáveis de conhecido impacto fenomenológico.

Para ambas variáveis dependentes avaliadas, as saídas do Minitab identificam para modelos inicialmente ajustados os pontos que estão fora do ajuste, em inglês *outliers*, conforme o detalhado em 2.2.6.3, podendo ou não ser eliminados, dependendo da necessidade de aumentar o coeficiente de determinação, requerendo, para tanto, nova análise. Para a Coluna 14, eles não foram retirados.

#### 4.2.2.1.6. CODIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Realizada conforme o detalhado em 2.2.5 para o conjunto de dados históricos para os quais foram ajustados os modelos de regressão, ou seja, no caso da Coluna 14, para os 77 conjuntos de dados históricos, ou o residual, caso se desejasse retirar os *outliers*.

#### 4.2.2.1.7. AJUSTE DO MODELO COM AS VARIÁVEIS CODIFICADAS

Conclui-se a análise estatística da Coluna 14, para ambas variáveis dependentes  $v_7$  e  $v_{10}$ , ajustando os modelos obtidos para as variáveis tais quais para as variáveis codificadas.

A Figura 4.11 contém a análise estatística final para  $v_7$ .

### Regression Analysis: v7 versus v1; v2; v3; v6; v11; v16; v32; v38

The regression equation is

$$v7 = -4,24 + 3,18 v1 + 2,86 v2 + 9,75 v3 + 0,341 v6 - 10,9 v11 - 6,33 v16 + 0,119 v32 - 17,0 v38$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-4,2399	0,3566	-11,89	0,000
v1	3,1838	0,3003	10,60	0,000
v2	2,8566	0,2500	11,43	0,000
v3	9,7470	0,7888	12,36	0,000
v6	0,3407	0,1071	3,18	0,002
v11	-10,8680	0,8776	-12,38	0,000
v16	-6,3273	0,5336	-11,86	0,000
v32	0,11851	0,06691	1,77	0,081
v38	-17,009	1,401	-12,14	0,000

S = 0,244377 R-Sq = 75,4% R-Sq(adj) = 72,5%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	8	12,4262	1,5533	26,01	0,000
Residual Error	68	4,0610	0,0597		
Total	76	16,4872			

Source	DF	Seq SS
v1	1	0,8318
v2	1	0,4355
v3	1	0,7785
v6	1	0,7979
v11	1	0,5826
v16	1	0,0032
v32	1	0,1888
v38	1	8,8081

**Figura 4.11** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_7$ , ajustado para os dados históricos codificados da Coluna 14.

O modelo ajustado para as variáveis codificadas, assinalado em púrpura, é constituído por uma expressão em que os valores dos parâmetros são coerentes, devendo-se somente considerar a constante nula, porque o sinal negativo não tem significado físico. O modelo final está bem ajustado, conforme observado pelo coeficiente de determinação de 72,5%, assinalado em amarelo, bem como pelos baixos valores de  $p$ , conforme o item 2.2.6.3, assinalados em azul.

A Figura 4.12 contém a análise estatística final para  $v_{10}$ .

## Regression Analysis: v10 versus v1; v3; v16; v30

The regression equation is

$$v_{10} = -0,0718 - 0,729 v_1 + 0,565 v_3 + 1,37 v_{16} + 0,0146 v_{30}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,07182	0,01034	-6,95	0,000
v1	-0,729448	0,008588	-84,94	0,000
v3	0,56530	0,01309	43,19	0,000
v16	1,37067	0,01096	125,01	0,000
v30	0,01461	0,01267	1,15	0,253

S = 0,0280203 R-Sq = 99,6% R-Sq(adj) = 99,6%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	13,3986	3,3496	4266,31	0,000
Residual Error	72	0,0565	0,0008		
Total	76	13,4551			

Source	DF	Seq SS
v1	1	0,2885
v3	1	0,2708
v16	1	12,8382
v30	1	0,0010

**Figura 4.12** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_{10}$ , ajustado para os dados históricos codificados da Coluna 14.

O modelo ajustado para as variáveis codificadas, assinalado em verde, é constituído por uma expressão em que os valores dos parâmetros são coerentes, devendo-se também considerar a constante nula, porque o sinal negativo não tem significado físico. O modelo final está muito bem ajustado, conforme observado pelo coeficiente de determinação de 99,6%, assinalado em amarelo, bem como pelos baixos valores de  $p$ , conforme 2.2.6.3, assinalados em azul, exceção feita para “ruído”, velocidade de fiação,  $v_{30}$ , de acordo com o comentário feito para o modelo de regressão ajustado para os dados tais quais, contida na Figura 4.10.

### 4.2.2.2. COLUNA 15

#### 4.2.2.2.1. MATRIZ DE CORRELAÇÕES

Apesar desta etapa ter sido feita para esta coluna, seguindo o mesmo



procedimento do executado para a Coluna 14, isto é, estabelecida considerando as variáveis de efeito fenomenológico conhecido e todas as variáveis designadas como ruídos, conforme pode ser visualizado na Figura 4.2, e também por ser muito semelhante a ela, como ainda de pouca definição na cópia, evitamos repeti-la, visando a fluência da leitura do texto. A conclusão foi igualmente idêntica, qual seja, a de ver que as variáveis analisadas possuem alguns dados muito dispersos, que podem prejudicar a análise como um todo.

#### 4.2.2.2.2. CARTAS DE CONTROLE

Seguindo o mesmo procedimento utilizado para a Coluna 14, a análise das cartas de controle possibilitou analisar a razão da dispersão dos pontos assim detectados na matriz de correlações, eliminando os conjuntos correspondentes, caso necessário. Conforme explicitado na análise estatística da Coluna 14, as cartas de controle desta e demais colunas analisadas estão no Apêndice A.

Através da análise das cartas de controle foram eliminados 3 conjuntos de dados. Nova análise via matriz de correlações (não incluída no texto, conforme anteriormente justificado), de acordo com o exposto no item 2.2.3, evidenciou uma melhor visualização entre as diversas variáveis, permitindo, portanto, a evolução da análise estatística, para o caso presente, com 80 conjuntos de dados.

#### 4.2.2.2.3. TESTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Esta etapa foi realizada e apresentou um resultado idêntico ao observado para a Coluna 14, sendo, portanto muito semelhante à Figura 4.4, com conclusões também idênticas, razão pela qual, para facilitar a leitura do texto, não será repetida.

#### 4.2.2.2.4. DETERMINAÇÃO DO MELHOR SUBCONJUNTO

Da mesma forma que o realizado para a Coluna 14, bem como pelo exposto no item 2.2.6.2, esta é a etapa final para a seleção de variáveis independentes, para definir o modelo de regressão para as variáveis dependentes  $v_7$  e  $v_{10}$ , respectivamente as concentrações de acetona na corrente gasosa de ar lavado e a na corrente líquida de água rica.

Para a variável dependente  $v_7$ , evita-se a discussão sobre a relação entre as variáveis  $v_3$  e  $v_{12}$ , idêntica à exposta para a Coluna 14, visando facilitar a leitura, apresentando-se somente a análise final e conclusiva, importante para a presente análise, conforme o exposto na Figura 4.13.

#### Best Subsets Regression: v7 versus v1; v2; ...

Response is v7

Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows		v v v v v v v v												
			Cp	S	1	2	3	6	1	6	0	1	2	8			
1	17,5	16,4	38,6	20,917					X								
1	10,6	9,4	48,2	21,771													X
2	26,8	24,9	27,7	19,827	X				X								
2	26,6	24,7	28,0	19,855					X	X							
3	36,4	33,9	16,3	18,602					X	X	X						
3	33,1	30,4	21,0	19,081	X				X								X
4	44,0	41,0	7,7	17,566	X	X	X	X									
4	41,2	38,1	11,6	17,999					X	X	X						X
5	49,2	45,8	2,6	16,847	X	X	X	X	X	X							X
5	44,8	41,1	8,7	17,561	X	X	X	X	X								
6	49,8	45,7	3,7	16,861	X	X	X	X	X	X							X
6	49,5	45,3	4,2	16,914		X	X	X	X								X X
7	50,2	45,3	5,2	16,916	X	X	X	X	X	X							X X
7	49,9	45,1	5,6	16,958	X	X	X	X	X	X	X						X
8	50,3	44,7	7,1	17,018	X	X	X	X	X	X	X	X					X X
8	50,2	44,6	7,2	17,029	X	X	X	X	X	X							X X X
9	50,3	43,9	9,0	17,134	X	X	X	X	X	X	X	X					X X X
9	50,3	43,9	9,1	17,137	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X X
10	50,3	43,1	11,0	17,253	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X X

**Figura 4.13** Saída do Minitab para seleção do melhor subconjunto de variáveis independentes para o estabelecimento de um modelo de regressão para  $v_7$

O subconjunto assinalado, composto de 8 variáveis independentes, é o que melhor atende aos critérios expostos no item da Revisão Bibliográfica citado,

sendo razoavelmente representativo, já que corresponde a um coeficiente de determinação de 44,7%, incluindo o “ruído”,  $v_{32}$ , concentração residual de acetona na água pobre.

Da mesma forma que o ocorrido para a Coluna 14, para a variável  $v_{10}$ , para a presente coluna, o processo de seleção do melhor subconjunto, foi bastante simples, visto que o ajuste era mais adequado, conforme pode ser ilustrado na Figura 4.14.

#### Best Subsets Regression: v10 versus v1; v3; ...

Response is v10

Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows	Cp	S															
						v 1	v 3	v 6	v 9	v 10	v 12	v 13	v 15	v 16	v 18					
1	44,5	43,8	5426,4	0,093238																
1	26,8	25,9	7176,5	0,10704		X														
2	58,5	57,4	4041,0	0,081153		X	X													
2	49,4	48,1	4938,1	0,089563		X		X												
3	99,3	99,2	2,2	0,010967		X	X	X												
3	60,6	59,1	3830,6	0,079549		X	X	X												
4	99,3	99,2	1,1	0,010807		X	X	X	X											
4	99,3	99,2	3,9	0,011021		X	X	X	X											
5	99,3	99,2	2,5	0,010832		X	X	X	X	X										
5	99,3	99,2	2,6	0,010844		X	X	X	X											X
6	99,3	99,2	4,2	0,010885		X	X	X	X	X										X
6	99,3	99,2	4,3	0,010896		X	X	X	X	X										X
7	99,3	99,2	6,1	0,010954		X	X	X	X	X										X
7	99,3	99,2	6,1	0,010956		X	X	X	X	X										X
8	99,3	99,2	8,0	0,011023		X	X	X	X	X										X
8	99,3	99,2	8,1	0,011028		X	X	X	X	X	X									X
9	99,3	99,2	10,0	0,011101		X	X	X	X	X	X	X								X

Figura 4.14 Saída do Minitab para seleção do melhor subconjunto de variáveis independentes para o estabelecimento do modelo final de regressão para  $v_{10}$ .

Da mesma forma que o comentado para a Coluna 14, para a Coluna 15 se evidenciou o mesmo, evitando-se a repetição de toda a discussão, assinalando somente o fato do conjunto selecionado ser muito representativo, já que corresponde a um coeficiente de determinação de 99,2%, sendo também provido do “ruído”, velocidade de fiação, variável  $v_{30}$ .

#### 4.2.2.2.5. AJUSTE DO MODELO DE REGRESSÃO

Seguindo tanto o descrito no item 2.2.6.3, como o executado anteriormente para a conclusão da análise da Coluna 14, definido o melhor subconjunto de variáveis independentes, ajusta-se o modelo de regressão múltipla, indicando-se, para a variável dependente  $v_7$ , o modelo ajustado na Figura 4.15.

#### Regression Analysis: v7 versus v1; v2; v3; v6; v11; v16; v32; v38

The regression equation is

$$v_7 = 1600 + 4,83 v_1 - 19,1 v_2 + 5,37 v_3 - 5,24 v_6 - 6,61 v_{11} - 0,00181 v_{16} - 0,300 v_{32} - 814 v_{38}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1600	1525	1,05	0,298
v1	4,829	5,289	0,91	0,364
v2	-19,100	6,508	-2,93	0,004
v3	5,373	1,684	3,19	0,002
v6	-5,2410	0,9648	-5,43	0,000
v11	-6,614	1,769	-3,74	0,000
v16	-0,001812	0,004811	-0,38	0,708
v32	-0,2996	0,1115	-2,69	0,009
v38	-814	1153	-0,71	0,482

S = 17,0175    R-Sq = 50,3%    R-Sq(adj) = 44,7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	8	20785,9	2598,2	8,97	0,000
Residual Error	71	20561,3	289,6		
Total	79	41347,2			

Source	DF	Seq SS
v1	1	4074,1
v2	1	648,2
v3	1	46,7
v6	1	9255,2
v11	1	4502,1
v16	1	64,2
v32	1	2050,9
v38	1	144,6

**Figura 4.15** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_7$ , ajustado para os dados históricos tais quais, levantados para a Coluna 15.

Apesar do modelo de regressão obtido não estar estatisticamente tão adequado, quanto ao verificado para a Coluna 14, devido ao coeficiente de determinação de 44,7%, assinalado em amarelo, a análise estatística é satisfatória para o presente estudo, por trabalhar com um modelo muito próximo ao obtido para a coluna

anterior, como também por apresentar baixos valores de  $p$ , conforme o estabelecido no item 2.2.6.3, assinalados em azul, principalmente para a variável  $v_{32}$ , inferior inclusive às outras variáveis de conhecido impacto fenomenológico, o que é coerente com os objetivos do presente estudo, porque esta variável é um “ruído”.

Para a variável  $v_{10}$ , definido o melhor subconjunto de variáveis independentes, ajusta-se o modelo de regressão múltipla, indica-se o modelo inicialmente ajustado na Figura 4.16.

#### Regression Analysis: v10 versus v1; v3; v16; v30

The regression equation is

$$v_{10} = -0,021 - 0,214 v_1 + 0,0628 v_3 + 0,000246 v_{16} + 0,000055 v_{30}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,0205	0,1731	-0,12	0,906
v1	-0,213565	0,003432	-62,24	0,000
v3	0,0627504	0,0008924	70,31	0,000
v16	0,00024604	0,00000292	84,40	0,000
v30	0,0000547	0,0002727	0,20	0,842

S = 0,0110366    R-Sq = 99,3%    R-Sq(adj) = 99,2%

#### Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	1,21250	0,30313	2488,59	0,000
Residual Error	75	0,00914	0,00012		
Total	79	1,22164			

Source	DF	Seq SS
v1	1	0,15443
v3	1	0,17696
v16	1	0,88110
v30	1	0,00000

**Figura 4.16** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_{10}$ , ajustado para os dados históricos tais quais, levantados para a Coluna 15.

Os comentários a respeito deste modelo são idênticos aos feitos para a análise da Coluna 14, cabendo assinalar, o fato do modelo estar bem ajustado, observado pelo coeficiente de determinação de 99,2%, assinalado em amarelo, bem como pelos baixos de  $p$ , conforme item 2.2.6.3, assinaladas em azul, exceção feita para “ruído”, velocidade de fiação,  $v_{30}$ , que igualmente à análise citada, foi mantido

visando aumentar a abrangência do modelo ajustado, não o restringindo somente às variáveis de conhecido impacto fenomenológico.

Da mesma forma da análise anterior, para ambas variáveis dependentes avaliadas, as saídas do Minitab identificam para modelos inicialmente ajustados os pontos que estão fora do ajuste, em inglês *outliers*, conforme o detalhado em 2.2.6.3, que também não foram retirados para a Coluna 15.

#### 4.2.2.2.6. CODIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Idêntica à da Coluna 14, exceção feita ao número de conjuntos de dados históricos, 80, visto que não foram retirados os *outliers*.

#### 4.2.2.2.7. AJUSTE DO MODELO COM AS VARIÁVEIS CODIFICADAS

Conclui-se a análise estatística da Coluna 15, para ambas variáveis dependentes  $v_7$  e  $v_{10}$ , ajustando os modelos obtidos para as variáveis tais quais para as variáveis codificadas.

A Figura 4.17 contém a análise estatística final para  $v_7$ .

### Regression Analysis: v7 versus v1; v2; v3; v6; v11; v16; v32; v38

The regression equation is

$$v7 = -0,550 + 0,165 v1 - 0,357 v2 + 0,517 v3 - 0,673 v6 - 0,538 v11 - 0,049 v16 - 0,258 v32 - 0,151 v38$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,5503	0,1483	-3,71	0,000
v1	0,1650	0,1807	0,91	0,364
v2	-0,3568	0,1216	-2,93	0,004
v3	0,5166	0,1619	3,19	0,002
v6	-0,6733	0,1239	-5,43	0,000
v11	-0,5378	0,1439	-3,74	0,000
v16	-0,0486	0,1290	-0,38	0,708
v32	-0,25845	0,09622	-2,69	0,009
v38	-0,1510	0,2136	-0,71	0,482

S = 0,374012    R-Sq = 50,3%    R-Sq(adj) = 44,7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	8	10,0403	1,2550	8,97	0,000
Residual Error	71	9,9318	0,1399		
Total	79	19,9721			

Source	DF	Seq SS
v1	1	1,9679
v2	1	0,3131
v3	1	0,0226
v6	1	4,4706
v11	1	2,1746
v16	1	0,0310
v32	1	0,9907
v38	1	0,0698

**Figura 4.17** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_7$ , ajustado para os dados históricos codificados da Coluna 15.

O modelo ajustado para as variáveis codificadas, assinalado em púrpura, é constituído por uma expressão em que os valores dos parâmetros são coerentes, devendo-se somente considerar a constante nula, porque o sinal negativo não tem significado físico. O modelo final está razoavelmente ajustado, conforme já observado, devido ao mediano valor do coeficiente de determinação de 44,7%, assinalado em amarelo, bem como pelos baixos valores de  $p$  do “ruído”, assinalado em azul, bem como as demais. Há que assinalar, contudo, a inconsistência fenomenológica do sinal negativo atribuído à  $v_{32}$ , concentração residual de acetona na água pobre, o que requer uma verificação complementar.

A Figura 4.18 contém a análise estatística final para  $v_{10}$ .

### Regression Analysis: v10 versus v1; v3; v16; v30

The regression equation is

$$v_{10} = -0,244 - 1,40 v_1 + 1,15 v_3 + 1,26 v_{16} + 0,0042 v_{30}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,24412	0,01763	-13,85	0,000
v1	-1,39535	0,02242	-62,24	0,000
v3	1,15350	0,01640	70,31	0,000
v16	1,26104	0,01494	84,40	0,000
v30	0,00416	0,02077	0,20	0,842

S = 0,0463722    R-Sq = 99,3%    R-Sq(adj) = 99,2%

#### Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	21,4057	5,3514	2488,59	0,000
Residual Error	75	0,1613	0,0022		
Total	79	21,5669			

Source	DF	Seq SS
v1	1	2,7263
v3	1	3,1242
v16	1	15,5551
v30	1	0,0001

**Figura 4.18** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_{10}$ , ajustado para os dados históricos codificados da Coluna 15.

O modelo ajustado para as variáveis codificadas, assinalado em verde, é constituído por uma expressão em que os valores dos parâmetros são coerentes, devendo-se também considerar a constante nula, porque o sinal negativo não tem significado físico. O modelo final está muito bem ajustado, conforme observado pelo coeficiente de determinação de 99,2%, assinalado em amarelo, bem como pelos baixos valores de  $p$ , conforme 2.2.6.3, assinalados em azul, exceção feita para o “ruído”, velocidade de fiação,  $v_{30}$ , coerente aos comentários anteriores.



#### 4.2.2.3. COLUNA 16

##### 4.2.2.3.1. MATRIZ DE CORRELAÇÕES

Conforme descrito para as colunas anteriormente analisadas, apesar desta etapa ter sido feita para esta coluna, seguindo o mesmo procedimento do executado para ambas, isto é, estabelecida considerando as variáveis de efeito fenomenológico conhecido e todas as variáveis designadas como ruídos, conforme pode ser visualizado na Figura 4.2, e também por ser muito semelhante a ela, como ainda de pouca definição na cópia, também evitamos repeti-la, visando a fluência da leitura do texto. A conclusão também foi igualmente idêntica, qual seja, a de ver que as variáveis analisadas possuem alguns dados muitos dispersos, que podem prejudicar a análise como um todo.

##### 4.2.2.3.2. CARTAS DE CONTROLE

Seguindo o mesmo procedimento utilizado nas colunas anteriormente descritas, a análise das cartas de controle da Coluna 16 possibilitou analisar as causas da dispersão dos pontos detectados, eliminando os conjuntos correspondentes. Conforme explicitado anteriormente, as cartas de controle desta e demais colunas analisadas estão no Apêndice A.

Através da análise das cartas de controle foram eliminados 7 conjuntos de dados. Nova análise via matriz de correlações (não incluída no texto, conforme anteriormente justificado) de acordo exposto no item 2.2.3, evidenciou uma melhor visualização entre as diversas variáveis, permitindo, portanto, a evolução da análise estatística, para o caso presente, com 76 conjuntos de dados.

#### 4.2.2.3.3. TESTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Esta etapa foi realizada e apresentou um resultado idêntico ao observado para as colunas anteriormente analisadas, sendo, portanto muito semelhante à Figura 4.4, com conclusões também idênticas, razão pela qual, para facilitar a leitura do texto, não será repetida.

#### 4.2.2.3.4. DETERMINAÇÃO DO MELHOR SUBCONJUNTO

Da mesma forma que o realizado para as colunas anteriores, bem como pelo exposto no item 2.2.6.2, esta é a etapa final para a seleção de variáveis independentes, para definir o modelo de regressão para as variáveis dependentes  $v_7$  e  $v_{10}$ , respectivamente as concentrações de acetona na corrente gasosa de ar lavado e a na corrente líquida de água rica.

Da mesma forma que o mencionado para a Coluna 15, para este caso, na análise da variável dependente  $v_7$ , evita-se a discussão sobre a relação entre as variáveis  $v_3$  e  $v_{12}$ , por ser também idêntica à exposta para a Coluna 14, visando facilitar a leitura, apresentando-se somente a análise final e conclusiva, importante para a presente análise, conforme o exposto na Figura 4.19.

### Best Subsets Regression: v7 versus v1; v2; v3; v6; v11; v16; v32; v38

Response is v7

Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows		v v v v v v v v									
			Cp	S	1	2	3	6	1	6	2	8		
1	21,3	20,3	254,3	38,212					X					
1	12,8	11,6	289,8	40,234									X	
2	30,9	29,0	216,8	36,069	X				X					
2	29,4	27,5	222,8	36,442					X		X			
3	33,4	30,7	208,1	35,633	X				X	X				
3	32,8	30,0	210,6	35,796	X	X			X					
4	37,4	33,9	193,7	34,798	X	X			X	X				
4	34,5	30,8	205,8	35,599	X				X	X				X
5	38,0	33,6	193,2	34,882	X	X			X	X				X
5	37,9	33,5	193,6	34,908	X	X			X	X	X			
6	80,4	78,7	19,3	19,749	X	X	X		X	X				X
6	47,8	43,3	154,4	32,221	X		X	X	X	X	X			X
7	83,7	82,1	7,4	18,118	X	X	X	X	X	X	X			X
7	80,7	78,7	20,2	19,758	X	X	X		X	X	X	X		X
8	83,8	81,9	9,0	18,196	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

**Figura 4.19** Saída do Minitab para seleção do melhor subconjunto de variáveis independentes para o estabelecimento de um modelo de regressão para v<sub>7</sub>

O subconjunto assinalado, composto de 8 variáveis independentes, é o que melhor atende aos critérios expostos no item da Revisão Bibliográfica citado, sendo muito representativo, já que o coeficiente de determinação é 81,9%, sendo interessante observar que contém um “ruído”, v<sub>32</sub>, concentração residual de acetona na água pobre.

Da mesma forma que o ocorrido para nas análises anteriores, a variável v<sub>10</sub>, para a presente coluna, o processo de seleção do melhor subconjunto, foi bastante simples, visto que o ajuste era mais adequado, conforme pode ser ilustrado na Figura 4.20.

### Best Subsets Regression: v10 versus v1; v3; ...

Response is v10

Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows Cp	S															
					v 1	v 3	v 6	v 9	v 10	v 12	v 13	v 15	v 18						
1	24,8	23,8	17781,7	0,088974															
1	12,0	10,8	20834,1	0,096280															
2	81,6	81,1	4292,7	0,044283	X														
2	32,0	30,1	16093,4	0,085236															
3	99,6	99,6	16,1	0,0061908	X	X													
3	84,7	84,0	3574,5	0,040743	X														
4	99,7	99,7	3,4	0,0056645	X	X													
4	99,7	99,7	12,7	0,0060299	X	X	X												
5	99,7	99,7	2,9	0,0055989	X	X	X												
5	99,7	99,7	5,0	0,0056859	X	X													
6	99,7	99,7	4,6	0,0056264	X	X	X												
6	99,7	99,7	4,7	0,0056310	X	X	X												
7	99,7	99,7	6,2	0,0056519	X	X	X	X											
7	99,7	99,7	6,3	0,0056559	X	X	X	X											
8	99,7	99,7	8,0	0,0056854	X	X	X	X											
8	99,7	99,7	8,2	0,0056939	X	X	X	X	X										
9	99,7	99,7	10,0	0,0057282	X	X	X	X	X	X									

**Figura 4.20** Saída do Minitab para seleção do melhor subconjunto de variáveis independentes para o estabelecimento do modelo final de regressão para v10.

O comentado para as colunas já analisadas é o mesmo do observado na presente, evitando-se a repetição de toda a discussão, assinalando-se somente o fato do conjunto selecionado ser muito representativo, já que corresponde a um coeficiente de determinação 99,7%, sendo também provido do “ruído” de produção velocidade de fiação, variável v30, que foi o que melhor se ajustou.

#### 4.2.2.3.5. AJUSTE DO MODELO DE REGRESSÃO

Seguindo tanto o descrito no item 2.2.6.3, como o executado para as análises já efetuadas, definido o melhor subconjunto de variáveis independentes, ajusta-se o modelo de regressão múltipla, indicando-se, para a variável dependente v7, o modelo ajustado na Figura 4.21.

### Regression Analysis: v7 versus v1; v2; v3; v6; v11; v16; v32; v38

The regression equation is

$$v7 = 886808 + 394 v1 + 318 v2 + 573 v3 - 3,20 v6 - 437 v11 - 0,476 v16 + 0,081 v32 - 677013 v38$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	886808	64542	13,74	0,000
v1	394,28	27,58	14,29	0,000
v2	318,29	26,16	12,17	0,000
v3	572,67	41,83	13,69	0,000
v6	-3,1985	0,8812	-3,63	0,001
v11	-437,22	31,23	-14,00	0,000
v16	-0,47618	0,03459	-13,77	0,000
v32	0,0813	0,1264	0,64	0,522
v38	-677013	49330	-13,72	0,000

S = 18,1961 R-Sq = 83,8% R-Sq(adj) = 81,9%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	8	115174	14397	43,48	0,000
Residual Error	67	22184	331		
Total	75	137357			

Source	DF	Seq SS
v1	1	9239
v2	1	451
v3	1	1889
v6	1	33749
v11	1	6063
v16	1	681
v32	1	738
v38	1	62364

**Figura 4.21** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_7$ , ajustado para os dados históricos tais quais, levantados para a Coluna 16.

Apesar do modelo de regressão obtido estar estatisticamente satisfatório, devido ao coeficiente de determinação de 81,9%, assinalado em amarelo, como também por trabalhar com um modelo muito próximo ao obtido para as demais colunas da Torre II, como ainda também por apresentar baixos valores de  $p$ , assinaladas em azul, incluindo a variável concentração de acetona residual na água pobre,  $v_{32}$ , que, contudo, apresenta uma significativa probabilidade de erro, a ser tolerada, com o objetivo de uniformizar os modelos empíricos obtidos.

Para a variável  $v_{10}$ , definido o melhor subconjunto de variáveis independentes, ajusta-se o modelo de regressão múltipla, ver o modelo ajustado na Figura 4.22.

### Regression Analysis: v10 versus v1; v3; v16; v30

The regression equation is

$$v10 = -0,320 - 0,176 v1 + 0,0594 v3 + 0,000212 v16 + 0,000584 v30$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,31969	0,09163	-3,49	0,001
v1	-0,175828	0,001351	-130,19	0,000
v3	0,0594498	0,0009835	60,45	0,000
v16	0,00021185	0,00000143	148,15	0,000
v30	0,0005837	0,0001507	3,87	0,000

S = 0,00566453 R-Sq = 99,7% R-Sq(adj) = 99,7%

#### Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	0,77722	0,19430	6055,57	0,000
Residual Error	71	0,00228	0,00003		
Total	75	0,77950			

Source	DF	Seq SS
v1	1	0,00120
v3	1	0,05075
v16	1	0,72479
v30	1	0,00048

**Figura 4.22** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_{10}$ , ajustado para os dados históricos tais quais, levantados para a Coluna 16.

Os comentários a respeito deste modelo são idênticos aos feitos para as análises anteriores, cabendo assinalar, o fato do modelo estar muito bem ajustado, observado pelo coeficiente de determinação 99,7%, assinalado em amarelo, bem como pelos baixos valores de  $p$ , assinalados em azul, inclusive para o “ruído”, velocidade de fiação,  $v_{30}$ , atendendo plenamente ao propósito do presente estudo de aumentar a abrangência do modelo ajustado, não o restringindo somente às variáveis de conhecido impacto fenomenológico.

Da mesma forma das análises anteriores, para ambas variáveis dependentes avaliadas, as saídas do Minitab identificam para modelos inicialmente ajustados os pontos que estão fora do ajuste, em inglês *outliers*, conforme o detalhado em 2.2.6.3, que também não foram retirados para a Coluna 16.

#### 4.2.2.3.6. CODIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Idêntica ao realizado nas análises anteriores, exceção feita ao número de conjuntos de dados históricos, neste caso 76, visto que não foram retirados os *outliers*.

#### 4.2.2.3.7. AJUSTE DO MODELO COM AS VARIÁVEIS CODIFICADAS

Conclui-se a análise estatística da Coluna 16, para ambas variáveis dependentes  $v_7$  e  $v_{10}$ , ajustando os modelos obtidos para as variáveis tais quais para as variáveis codificadas.

A Figura 4.23 contém a análise estatística final para  $v_7$ .

### Regression Analysis: v7 versus v1; v2; v3; v6; v11; v16; v32; v38

The regression equation is

$$v7 = -0,411 + 11,4 v1 + 2,91 v2 + 14,6 v3 - 0,233 v6 - 16,9 v11 - 11,1 v16 + 0,0343 v32 - 17,1 v38$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,41113	0,08360	-4,92	0,000
v1	11,4196	0,7989	14,29	0,000
v2	2,9075	0,2389	12,17	0,000
v3	14,617	1,068	13,69	0,000
v6	-0,23272	0,06411	-3,63	0,001
v11	-16,916	1,208	-14,00	0,000
v16	-11,0766	0,8045	-13,77	0,000
v32	0,03431	0,05333	0,64	0,522
v38	-17,134	1,248	-13,72	0,000

S = 0,195552 R-Sq = 83,8% R-Sq(adj) = 81,9%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	8	13,3021	1,6628	43,48	0,000
Residual Error	67	2,5621	0,0382		
Total	75	15,8642			

Source	DF	Seq SS
v1	1	1,0671
v2	1	0,0520
v3	1	0,2182
v6	1	3,8979
v11	1	0,7002
v16	1	0,0787
v32	1	0,0852
v38	1	7,2028

**Figura 4.23** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_7$ , ajustado para os dados históricos codificados da Coluna 16.

O modelo ajustado para as variáveis codificadas, assinalado em púrpura, é constituído por uma expressão em que os valores dos parâmetros são coerentes, devendo-se somente considerar a constante nula, porque o sinal negativo não tem significado físico. O modelo final está satisfatoriamente ajustado, conforme já observado, devido ao coeficiente de determinação de 81,9%, assinalado em amarelo, bem como pelos baixos valores de  $p$ , conforme 2.2.6.3, assinalados em azul, indicando ainda a coerência fenomenológica do sinal positivo atribuído à  $v_{32}$ , concentração residual de acetona na água pobre, que, contudo, continua a requerer uma verificação complementar.



A Figura 4.24 contém a análise estatística final para  $v_{10}$ .

### Regression Analysis: $v_{10}$ versus $v_1$ ; $v_3$ ; $v_{16}$ ; $v_{30}$

The regression equation is

$$v_{10} = -0,226 - 1,81 v_1 + 0,539 v_3 + 1,75 v_{16} + 0,0383 v_{30}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,226365	0,008329	-27,18	0,000
$v_1$	-1,80861	0,01389	-130,19	0,000
$v_3$	0,538905	0,008915	60,45	0,000
$v_{16}$	1,75017	0,01181	148,15	0,000
$v_{30}$	0,038291	0,009887	3,87	0,000

S = 0,0216203    R-Sq = 99,7%    R-Sq(adj) = 99,7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	11,3224	2,8306	6055,57	0,000
Residual Error	71	0,0332	0,0005		
Total	75	11,3556			

Source	DF	Seq SS
$v_1$	1	0,0175
$v_3$	1	0,7393
$v_{16}$	1	10,5586
$v_{30}$	1	0,0070

**Figura 4.24** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_{10}$ , ajustado para os dados históricos codificados da Coluna 16.

O modelo ajustado para as variáveis codificadas, assinalado em verde, é constituído por uma expressão em que os valores dos parâmetros são coerentes, devendo-se também considerar a constante nula, porque o sinal negativo não tem significado físico. O modelo final está muito bem ajustado, conforme observado pelo coeficiente de determinação de 99,7%, assinalado em amarelo, bem como pelos baixos valores de  $p$ , conforme 2.2.6.3, assinalados em azul, inclusive para o “ruído”, velocidade de fiação,  $v_{30}$ .

#### 4.2.2.4. COLUNA NAT 1

##### 4.2.2.4.1. MATRIZ DE CORRELAÇÕES

Conforme o descrito no item 2.2.2, bem como nas análises realizadas para as colunas providas de pratos, esta matriz, também designada pelo Minitab de Matrix Plot, é utilizada para iniciar a análise estatística, indicando visualmente a potencial relação entre as variáveis avaliadas. Devido à diferença dos internos, bem ao número de conjuntos analisados, ela será indicada.

Foi estabelecida da forma das precedentes, ou seja, considerando as variáveis de efeito fenomenológico conhecido e todas as variáveis designadas como ruídos, conforme pode ser visualizado na Figura 4.25, sendo também possível ver que as variáveis analisadas possuem alguns dados muito dispersos, que podem prejudicar a análise como um todo.

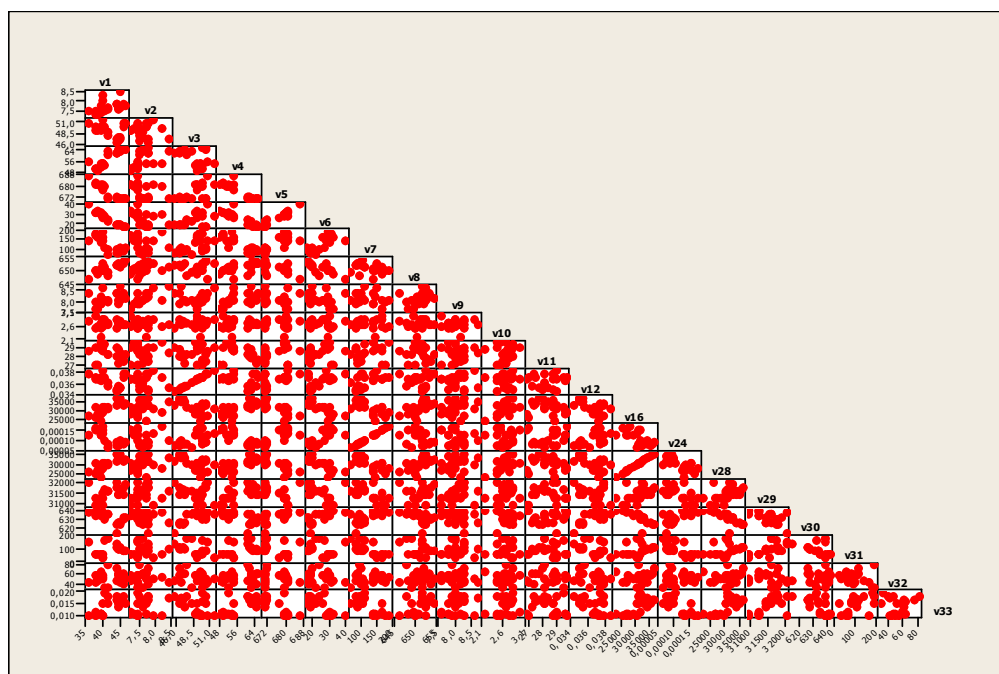


Figura 4.25 Matriz de correlações inicial da Coluna NAT 1.

#### 4.2.2.4.2. CARTAS DE CONTROLE

Através das cartas de controle das variáveis analisadas que apresentaram pontos dispersos, é possível diagnosticar o quanto estes pontos estão dispersos, bem como a causa desta dispersão, eliminando os conjuntos correspondentes, caso necessário.

Conforme é possível observar na Figura 4.25, para as variáveis  $v_2$  e  $v_4$ , respectivamente temperatura de água gelada e temperatura da corrente de ar acetinado, apesar de uma razoável dispersão de pontos ter sido detectada, como os limites determinados de acordo com o exposto no item 2.2.3 são menores que as variações reais, de acordo com o observado nas análises das cartas de controle realizadas para as outras colunas, as cartas de controle destas variáveis para esta coluna não serão avaliadas.

Ao contrário, para as variáveis  $v_6$  e  $v_{10}$ , respectivamente perda de carga no leito recheios e concentração de acetona na água rica, cuja dispersão também foi detectada através da matriz de correlações, como também é possível observar na Figura 4.25, as cartas de controle serão analisadas, indicando, contudo, que, como para as demais colunas já analisadas, as cartas de controle estão no Apêndice A.

Pelo descrito na análise das cartas de controle, nenhum conjunto de dados de dados foi eliminado, mantendo, como válida a matriz de correlações contida na Figura 4.25. A evolução da análise estatística, para o caso presente, segue, portanto, com os 22 conjuntos de dados iniciais.

#### 4.2.2.4.3. TESTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Conforme o exposto no item 2.2.4, as correlações entre as variáveis contidas na Matriz de Correlação, são evidenciadas pelo teste de correlação de Pearson, contida na Figura 4.26.

	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9
v2	0,454								
	0,034								
v3	-0,409	-0,127							
	0,059	0,573							
v4	0,906	0,430	-0,412						
	0,000	0,046	0,057						
v5	-0,921	-0,349	0,606	-0,898					
	0,000	0,111	0,003	0,000					
v6	-0,972	-0,388	0,483	-0,879	0,967				
	0,000	0,075	0,023	0,000	0,000				
v7	-0,760	-0,135	0,521	-0,855	0,830	0,775			
	0,000	0,550	0,013	0,000	0,000	0,000			
v8	0,791	0,362	-0,022	0,556	-0,580	-0,769	-0,393		
	0,000	0,097	0,923	0,007	0,005	0,000	0,071		
v9	0,356	0,758	0,047	0,439	-0,220	-0,280	-0,262	0,341	
	0,104	0,000	0,837	0,041	0,324	0,207	0,239	0,121	
v10	0,042	-0,165	0,007	0,061	-0,032	-0,070	-0,079	0,144	-0,026
	0,852	0,463	0,976	0,789	0,889	0,757	0,725	0,523	0,908
v11	-0,340	0,099	0,081	-0,375	0,368	0,338	0,252	-0,155	0,012
	0,121	0,662	0,719	0,086	0,092	0,124	0,257	0,492	0,959
v12	-0,410	-0,128	1,000	-0,413	0,607	0,484	0,522	-0,023	0,045
	0,058	0,571	0,000	0,056	0,003	0,023	0,013	0,920	0,841
v16	0,791	0,243	-0,539	0,739	-0,783	-0,806	-0,681	0,611	0,211
	0,000	0,276	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,347
v24	-0,764	-0,135	0,520	-0,856	0,833	0,779	1,000	-0,400	-0,261
	0,000	0,548	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,065	0,241
v28	0,792	0,245	-0,546	0,740	-0,786	-0,808	-0,683	0,609	0,210
	0,000	0,273	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,348
v29	0,463	0,147	-0,306	0,595	-0,455	-0,410	-0,612	0,170	0,345
	0,030	0,515	0,167	0,003	0,033	0,058	0,002	0,449	0,116
v30	-0,685	-0,291	0,669	-0,602	0,661	0,687	0,627	-0,536	-0,308
	0,000	0,190	0,001	0,003	0,001	0,000	0,002	0,010	0,163
v31	0,161	-0,067	-0,380	0,380	-0,336	-0,179	-0,652	-0,270	0,067
	0,475	0,765	0,081	0,082	0,126	0,425	0,001	0,225	0,766
v32	0,145	-0,052	-0,326	0,190	-0,221	-0,171	-0,080	-0,008	-0,110
	0,519	0,818	0,138	0,398	0,323	0,447	0,724	0,971	0,626
v33	0,698	0,196	-0,451	0,659	-0,760	-0,734	-0,741	0,438	0,262
	0,000	0,381	0,035	0,001	0,000	0,000	0,000	0,041	0,238

Figura 4.26 Teste de Correlação de Pearson para Coluna NAT 1 (1ª. parte)

	v10	v11	v12	v16	v24	v28	v29	v30	v31
v11	0,077								
	0,734								
v12	0,007	0,082							
	0,975	0,718							
v16	0,589	-0,211	-0,540						
	0,004	0,346	0,010						
v24	-0,081	0,253	0,521	-0,684					
	0,720	0,257	0,013	0,000					
v28	0,584	-0,212	-0,547	1,000	-0,687				
	0,004	0,345	0,008	0,000	0,000				
v29	0,184	0,024	-0,306	0,480	-0,610	0,481			
	0,412	0,916	0,166	0,024	0,003	0,023			
v30	-0,199	0,067	0,670	-0,739	0,629	-0,742	-0,576		
	0,375	0,767	0,001	0,000	0,002	0,000	0,005		
v31	0,120	-0,077	-0,381	0,268	-0,647	0,270	0,637	-0,309	
	0,594	0,735	0,080	0,229	0,001	0,225	0,001	0,162	
v32	0,044	-0,040	-0,326	0,223	-0,080	0,225	-0,051	-0,021	-0,130
	0,844	0,861	0,138	0,318	0,724	0,313	0,823	0,926	0,565
v33	0,214	-0,170	-0,452	0,692	-0,742	0,693	0,677	-0,642	0,569
	0,338	0,451	0,035	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,006
	<b>v32</b>								
v33	-0,003								
	0,989								

**Figura 4.26** Teste de Correlação de Pearson para Coluna NAT 1 (2ª. parte)

Da mesma forma que o observado para as colunas providas de pratos, é interessante observar a confirmação e a precisão com que análise estatística faz das correlações das variáveis de efeito fenomenológico conhecido.

Não se evidenciou qualquer correlação que possibilite uma análise quanto aos ruídos relativos à fiação  $v_{29}$ ,  $v_{32}$  e  $v_{33}$ , respectivamente título global, concentração residual de acetona na água pobre e umidade absoluta.

Quanto às variáveis  $v_{30}$  e  $v_{31}$ , respectivamente velocidade de fiação e tempo de limpeza, concentração de acetona na água pobre, apresenta certa correlação com  $v_7$  e  $v_{10}$ , respectivamente concentração de acetona no topo e concentração de acetona na água rica.

#### 4.2.2.4.4. DETERMINAÇÃO DO MELHOR SUBCONJUNTO

Com base na seleção das variáveis, iniciada via matriz de correlações e teste de correlação de Pearson, dá-se continuidade ao processo de seleção, eliminando as variáveis independentes excedentes, conforme o descrito no item 2.2.6.2, bem como foi realizado nas colunas providas de pratos, constituindo a etapa inicial para definir o modelo de regressão.

Para a variável dependente  $v_7$ , a seleção dos melhores subconjuntos é ilustrada na Figura 4.27.

#### Best Subsets Regression: $v_7$ versus $v_2$ ; $v_3$ ; $v_4$ ; $v_6$ ; $v_{11}$ ; $v_{16}$ ; $v_{30}$ ; $v_{31}$

Response is  $v_7$

Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows		v v v v v v v v									
			Cp	S	2	3	4	6	1	1	3	3		
1	73,1	71,7	31,3	19,921										
1	60,0	58,0	55,2	24,276					X					
2	87,2	85,9	7,3	14,069						X				X
2	85,6	84,1	10,3	14,933					X					X
3	89,0	87,2	6,1	13,403					X	X				X
3	88,4	86,5	7,2	13,786	X				X					X
4	91,3	89,3	3,9	12,256	X	X			X	X				X
4	89,8	87,4	6,7	13,324	X				X					X X
5	92,4	90,1	3,9	11,816	X	X	X		X					X
5	91,5	88,8	5,6	12,534	X	X	X		X					X X
6	92,7	89,8	5,4	11,992	X	X	X	X	X	X				X
6	92,5	89,5	5,8	12,161	X	X	X	X	X	X				X
7	92,8	89,3	7,1	12,273	X	X	X	X	X	X	X			X X
7	92,8	89,2	7,1	12,296	X	X	X	X	X	X	X			X
8	92,9	88,5	9,0	12,692	X	X	X	X	X	X	X	X		X X

**Figura 4.27** Saída do Minitab para seleção do melhor subconjunto de variáveis independentes para o estabelecimento de um modelo de regressão para  $v_7$

O subconjunto assinalado, composto de 8 variáveis independentes, não é o que melhor atende tanto aos critérios expostos no item citado, da Revisão Bibliográfica, pois não é o de menor  $c_p$ , nem tampouco o de melhor coeficiente de determinação, apesar de ser muito representativo, por ser 88,5%, incluindo os “ruídos”  $v_{30}$  e  $v_{31}$ , respectivamente velocidade de fiação e tempo de limpeza das colunas. Contudo, este modelo é idêntico ao modelo estabelecido para a outra

coluna provida de recheios, analisada simultaneamente a esta, na tentativa de uniformizá-los, tendo em mente a sua melhor aceitação pelo usuário, considerando que as colunas operam lado a lado.

A Figura 4.28 ilustra o processo de seleção do melhor subconjunto para a variável  $v_{10}$ .

#### Best Subsets Regression: v10 versus v1; v2; v3; v6; v16; v31

Response is v10

Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows Cp	S	v v v v v v						
					1	2	3	6	6	1	
1	34,7	31,5	1814,8	0,15214							X
1	2,7	0,0	2713,4	0,18573		X					
2	82,7	80,9	469,9	0,080372	X						X
2	81,6	79,7	499,9	0,082813				X	X		
3	99,4	99,3	3,0	0,015430	X	X					X
3	91,9	90,6	212,8	0,056419		X	X	X			
4	99,4	99,3	3,9	0,015355	X	X		X	X		X
4	99,4	99,3	4,2	0,015533	X	X	X	X			
5	99,5	99,3	5,0	0,015401	X	X	X	X	X		X
5	99,4	99,3	5,7	0,015758	X	X	X		X	X	
6	99,5	99,3	7,0	0,015893	X	X	X	X	X	X	

**Figura 4.28** Saída do Minitab para seleção do melhor subconjunto de variáveis independentes para o estabelecimento do modelo final de regressão para  $v_{10}$ .

O subconjunto assinalado, composto de 5 variáveis independentes, se adequa satisfatoriamente aos critérios expostos no item 2.2.6.2, por ser muito representativo, já que corresponde a um coeficiente de determinação de 99,3%, sendo provido de um “ruído”, tempo de limpeza, variável  $v_{31}$ .

#### 4.2.2.4.5. AJUSTE DO MODELO DE REGRESSÃO

Como realizado para as colunas já analisadas, e, conforme o descrito no item 2.2.6.3, definido o melhor subconjunto de variáveis independentes, ajusta-se o

modelo de regressão múltipla, indicando-se, para a variável dependente  $v_7$ , o modelo inicialmente ajustado na Figura 4.29.

### Regression Analysis: $v_7$ versus $v_2$ ; $v_3$ ; $v_4$ ; $v_6$ ; $v_{11}$ ; $v_{30}$ ; $v_{31}$

The regression equation is

$$v_7 = 174 + 25,5 v_2 + 0,60 v_3 - 3,26 v_4 + 1,97 v_6 - 5,02 v_{11} + 0,053 v_{30} - 0,287 v_{31}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	173,8	392,8	0,44	0,665
$v_2$	25,49	10,42	2,45	0,028
$v_3$	0,599	2,499	0,24	0,814
$v_4$	-3,258	1,205	-2,70	0,017
$v_6$	1,970	1,097	1,80	0,094
$v_{11}$	-5,024	3,704	-1,36	0,196
$v_{30}$	0,0533	0,6292	0,08	0,934
$v_{31}$	-0,28652	0,07599	-3,77	0,002

S = 12,5843    R-Sq = 92,5%    R-Sq(adj) = 88,7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	27273,2	3896,2	24,60	0,000
Residual Error	14	2217,1	158,4		
Total	21	29490,4			

Source	DF	Seq SS
$v_2$	1	534,1
$v_3$	1	7616,3
$v_4$	1	16216,2
$v_6$	1	1,6
$v_{11}$	1	612,2
$v_{30}$	1	41,4
$v_{31}$	1	2251,4

**Figura 4.29** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_7$ , ajustado para os dados históricos tais quais, levantados para a Coluna NAT 1.

Conforme os comentários da Figura 4.27, de determinação do melhor subconjunto, o modelo inicial está bem ajustado, o que se pode observar pelo coeficiente de determinação 88,7%, assinalado em amarelo, ainda melhor na regressão, bem como pelos valores de  $p$ , assinalados em azul, que, mesmo não sendo baixos para todas as variáveis, atendem à idéia de uniformização dos modelos, conforme o exposto em 4.2.2.4.4.



Para a variável  $v_{10}$ , definido o melhor subconjunto de variáveis independentes, ajusta-se o modelo de regressão múltipla, conforme indicado na Figura 4.30.

### Regression Analysis: v10 versus v1; v3; v6; v16; v31

The regression equation is

$$v_{10} = -0,050 - 0,0676 v_1 + 0,0591 v_3 - 0,00224 v_6 + 0,000086 v_{16} + 0,000086 v_{31}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,0499	0,2488	-0,20	0,844
v1	-0,067563	0,004504	-15,00	0,000
v3	0,059073	0,002841	20,79	0,000
v6	-0,002239	0,002364	-0,95	0,358
v16	0,00008617	0,00000162	53,35	0,000
v31	0,00008621	0,00007586	1,14	0,273

S = 0,0154013    R-Sq = 99,5%    R-Sq(adj) = 99,3%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	0,70537	0,14107	594,75	0,000
Residual Error	16	0,00380	0,00024		
Total	21	0,70916			

Source	DF	Seq SS
v1	1	0,00126
v3	1	0,00050
v6	1	0,01486
v16	1	0,68845
v31	1	0,00031

**Figura 4.30** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_{10}$ , ajustado para os dados históricos tais quais, levantados para a Coluna NAT 1.

Conforme o mencionado no item 4.2.2.4.4, de determinação do melhor subconjunto, o modelo está bem ajustado, o que se pode observar pelo coeficiente de determinação de 99,3%, assinalado em amarelo, bem como pelos valores de  $p$ , conforme o item 2.2.6.3, assinalados em azul, que, se não são todos baixos, conforme o recomendado, atendem ao exposto sobre a uniformização dos modelos.

Para ambas variáveis dependentes avaliadas, as saídas do Minitab identificam para modelos ajustados os pontos que estão fora do ajuste, em inglês *outliers*, conforme o detalhado em 2.2.6.3, podendo ou não ser eliminados, dependendo da necessidade de aumentar o coeficiente de determinação, requerendo, para tanto,

nova análise. Para a Coluna NAT 1 os *outliers* não foram retirados.

#### 4.2.2.4.6. CODIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Realizada conforme o detalhado em 2.2.5 para o conjunto de dados históricos para os quais foram ajustados os modelos de regressão, ou seja, no caso da Coluna NAT 1, para os 22 conjuntos de dados históricos, ou o residual, caso se desejasse retirar os *outliers*.

#### 4.2.2.4.7. AJUSTE DO MODELO COM AS VARIÁVEIS CODIFICADAS

Conclui-se a análise estatística da Coluna NAT 1, para ambas variáveis dependentes  $v_7$  e  $v_{10}$ , ajustando os modelos obtidos para as variáveis tais quais para as variáveis codificadas.

A Figura 4.31 contém a análise estatística final para  $v_7$ .

### Regression Analysis: v7 versus v2; v3; v4; v6; v11; v30; v31

The regression equation is

$$v7 = 0,131 + 0,112 v2 + 0,060 v3 - 0,481 v4 + 0,396 v6 - 0,160 v11 - 0,060 v30 - 0,405 v31$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,1306	0,1021	1,28	0,223
v2	0,1120	0,1144	0,98	0,345
v3	0,0598	0,1016	0,59	0,566
v4	-0,4809	0,1558	-3,09	0,009
v6	0,3962	0,1854	2,14	0,052
v11	-0,15980	0,07243	-2,21	0,046
v30	-0,0600	0,1344	-0,45	0,663
v31	-0,40532	0,08706	-4,66	0,000

S = 0,179080 R-Sq = 94,6% R-Sq(adj) = 91,7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	7,2711	1,0387	32,39	0,000
Residual Error	13	0,4169	0,0321		
Total	20	7,6880			

Source	DF	Seq SS
v2	1	1,2305
v3	1	1,6011
v4	1	3,4789
v6	1	0,0008
v11	1	0,2644
v30	1	0,0001
v31	1	0,6952

**Figura 4.31** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_7$ , ajustado para os dados históricos codificados da Coluna NAT 1.

O modelo ajustado para as variáveis codificadas, assinalado em púrpura, é constituído por uma expressão em que os valores dos parâmetros são coerentes. O modelo final está bem ajustado, conforme observado pelo coeficiente de determinação 91,7%, que melhorou ainda mais com a codificação das variáveis, conforme pode ser observado no assinalado em amarelo, se comparado ao modelo ajustado com as variáveis tais quais, contido na Figura 4.29. Quanto aos valores de  $p$ , assinalados em azul, se não são todos baixos, conforme o recomendado em 2.2.6.3, atendem ao exposto sobre a uniformização dos modelos.

A Figura 4.32 contém a análise estatística final para  $v_{10}$ .

## Regression Analysis: v10 versus v1; v3; v6; v16; v31

The regression equation is

$$v_{10} = 0,0269 - 0,859 v_1 + 0,390 v_3 - 0,0618 v_6 + 1,41 v_{16} + 0,0161 v_{31}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,02686	0,01732	1,55	0,140
v1	-0,85946	0,05730	-15,00	0,000
v3	0,39050	0,01878	20,79	0,000
v6	-0,06182	0,06527	-0,95	0,358
v16	1,40807	0,02639	53,35	0,000
v31	0,01614	0,01420	1,14	0,273

S = 0,0358170 R-Sq = 99,5% R-Sq(adj) = 99,3%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	3,81487	0,76297	594,75	0,000
Residual Error	16	0,02053	0,00128		
Total	21	3,83539			

Source	DF	Seq SS
v1	1	0,00680
v3	1	0,00269
v6	1	0,08038
v16	1	3,72334
v31	1	0,00166

**Figura 4.32** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_{10}$ , ajustado para os dados históricos codificados da Coluna NAT 1.

O modelo ajustado para as variáveis codificadas, assinalado em verde, é constituído por uma expressão em que os valores dos parâmetros são coerentes. O modelo final está muito bem ajustado, conforme observado pelo coeficiente de determinação 99,3%, assinalado em amarelo, bem como pelos valores de  $p$ , assinalados em azul, que, se não são todos baixos, conforme o recomendado em 2.2.6.3, atendem ao exposto sobre a uniformização dos modelos.

### 4.2.2.5. COLUNA NAT 2

#### 4.2.2.5.1. MATRIZ DE CORRELAÇÕES

Conforme descrito para as colunas anteriormente analisadas, apesar desta etapa ter sido feita para esta coluna, seguindo o mesmo procedimento do

executado para todas as precedentes, isto é, estabelecida considerando as variáveis de efeito fenomenológico conhecido e todas as variáveis designadas como ruídos, conforme pode ser visualizado na Figura 4.25, e também por ser muito semelhante a ela, como ainda de pouca definição na cópia, também evitamos repeti-la, visando a fluência da leitura do texto, conforme o anteriormente realizado para as colunas providas de pratos. A conclusão também foi idêntica, qual seja, a de ver que as variáveis analisadas possuem alguns dados muito dispersos, que podem prejudicar a análise como um todo.

#### 4.2.2.5.2. CARTAS DE CONTROLE

Através das cartas de controle das variáveis analisadas que apresentaram pontos dispersos, é possível diagnosticar o quanto estes pontos estão dispersos, bem como a causa desta dispersão, eliminando os conjuntos correspondentes, caso necessário.

Da mesma forma que o observado na matriz de correlações da Coluna NAT 1, contida na Figura 4.25, para a matriz de correlações da Coluna NAT 2 em análise também é possível observar que para as variáveis  $v_2$  e  $v_4$ , respectivamente temperatura de água gelada e temperatura da corrente de ar acetinado, foi detectada uma razoável dispersão de pontos, de acordo com os limites determinados de acordo com o exposto no item 2.2.3, que são igualmente menores que as variações reais, conforme o exposto e justificado para a Coluna NAT 1, sendo, em conseqüência, mantidos.

Ao contrário, para as variáveis  $v_1$ ,  $v_3$ ,  $v_5$ ,  $v_6$ ,  $v_7$ ,  $v_{10}$ ,  $v_{12}$  e  $v_{16}$ , respectivamente vazão de água gelada, concentração de acetona na corrente de ar acetinado, pressão de alimentação, perda de carga no leito de recheios, concentração de acetona na corrente de ar lavado, concentração de acetona na água rica, fração

mássica de acetona na corrente de ar acetinado e vazão mássica de ar acetinado, cuja dispersão também foi detectada através da matriz de correlações, as cartas de controle serão analisadas, estando contidas, pelas razões anteriormente expostas, no Apêndice A.

Pelo descrito, foi eliminado um conjunto de dados. Conforme exposto no item 2.2.3, a eliminação dos conjuntos de dados contendo os pontos dispersos, melhora a qualidade da matriz de correlações, proporcionando uma melhor visualização das correlações entre as diversas variáveis, como de fato ocorreu no presente estudo, mas que, devido à qualidade da cópia, bem como para evitar a repetição, não será incluída no texto. A evolução da análise estatística, para o caso presente, segue, portanto, com os 21 conjuntos de dados iniciais.

#### 4.2.2.5.3. TESTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Esta etapa foi realizada e apresentou um resultado muito próximo ao observado para a Coluna NAT 1, sendo, portanto muito semelhante à Figura 4.26, chegando às mesmas conclusões, razão pela qual, para facilitar a leitura do texto, não será repetida.

#### 4.2.2.5.4. DETERMINAÇÃO DO MELHOR SUBCONJUNTO

Com base na seleção das variáveis, iniciada via matriz de correlações e teste de correlação de Pearson, dá-se continuidade ao processo de seleção, eliminando as variáveis independentes excedentes, conforme o descrito no item 2.2.6.2, bem como foi realizado em todas as colunas anteriormente analisadas, constituindo a etapa inicial para definir o modelo de regressão.

Para a variável dependente  $v_7$ , a seleção dos melhores subconjuntos é ilustrada na Figura 4.33.

### Best Subsets Regression: v7 versus v2; v3; v4; v6; v11; v16; v30; v31

Response is v7

Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows		v v v v v v v v								
			Cp	S	v 2	v 3	v 4	v 6	v 11	v 16	v 30	v 31	
1	63,0	61,1	62,2	67,053									X
1	53,3	50,9	83,0	75,314		X							
2	75,7	73,0	37,1	55,843		X							X
2	70,4	67,1	48,4	61,609						X			X
3	81,0	77,6	27,8	50,879		X		X					X
3	78,7	75,0	32,6	53,781		X	X						X
4	86,3	82,9	18,3	44,407		X	X	X					X
4	81,6	77,0	28,4	51,514		X		X		X		X	X
5	89,4	85,9	13,6	40,329		X	X	X	X				X
5	87,2	83,0	18,4	44,368		X	X	X	X	X			X
6	91,9	88,4	10,4	36,614		X	X	X	X			X	X
6	90,8	86,8	12,8	39,021	X	X	X	X	X				X
7	93,5	90,0	8,9	33,995	X	X	X	X	X			X	X
7	92,0	87,6	12,2	37,800	X	X	X	X	X	X			X
8	94,4	90,7	9,0	32,833	X	X	X	X	X	X	X		X

**Figura 4.33** Saída do Minitab para seleção do melhor subconjunto de variáveis independentes para o estabelecimento de um modelo de regressão para  $v_7$

O subconjunto assinalado, composto de 7 variáveis independentes, é o que melhor atende tanto aos critérios expostos no item citado da Revisão Bibliográfica, menor  $c_p$ , como também é muito representativo, já que corresponde a coeficiente de determinação de 90%, incluindo os “ruídos”  $v_{30}$  e  $v_{31}$ , respectivamente velocidade de fiação e tempo de limpeza das colunas, ainda indicando que esta análise foi feita anteriormente à da Coluna NAT 1, para a qual este conjunto também foi testado, conforme o exposto em 4.2.2.4.4, na tentativa de uniformizá-los, tendo em mente a sua melhor aceitação pelo usuário, considerando que as colunas operam lado a lado.

A Figura 4.34 ilustra o processo de seleção do melhor subconjunto para a variável  $v_{10}$ .

### Best Subsets Regression: v10 versus v1; v3; ...

Response is v10

Vars	R-Sq	R-Sq(adj)	Mallows Cp	S										
					v1	v3	v6	v9	v10	v12	v13	v15	v18	
1	71,6	70,1	2008,7	0,10099	X									
1	60,3	58,2	2814,2	0,11940					X					
2	91,2	90,2	614,7	0,057852	X		X							
2	79,0	76,6	1484,3	0,089268	X			X						
3	99,6	99,5	18,2	0,013258	X	X		X						
3	93,6	92,5	443,8	0,050703	X		X	X						
4	99,8	99,7	6,6	0,010251	X	X		X			X			
4	99,6	99,5	14,9	0,012440	X	X	X	X						
5	99,8	99,8	4,2	0,0091844	X	X	X	X			X			
5	99,8	99,7	7,0	0,010115	X	X		X		X		X		
6	99,8	99,8	4,5	0,0088542	X	X	X	X		X		X		
6	99,8	99,7	6,2	0,0094965	X	X	X	X		X	X			
7	99,8	99,8	6,2	0,0090888	X	X	X	X		X	X	X		
7	99,8	99,8	6,3	0,0091009	X	X	X	X	X	X		X		
8	99,8	99,7	8,0	0,0093764	X	X	X	X	X	X	X	X		
8	99,8	99,7	8,2	0,0094592	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
9	99,8	99,7	10,0	0,0097811	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

**Figura 4.34** Saída do Minitab para seleção do melhor subconjunto de variáveis independentes para o estabelecimento do modelo final de regressão para v<sub>10</sub>.

O subconjunto assinalado, composto de 5 variáveis independentes, se adequa perfeitamente aos critérios expostos no item 2.2.6.2, por ser muito representativo, já que corresponde a um coeficiente de determinação de 99,8%, sendo provido de um “ruído”, tempo de limpeza, variável v<sub>31</sub>.

#### 4.2.2.5.5. AJUSTE DO MODELO DE REGRESSÃO

Como realizado para as colunas já analisadas, e, conforme o descrito no item 2.2.6.3, definido o melhor subconjunto de variáveis independentes, ajusta-se o modelo de regressão múltipla, indicando-se, para a variável dependente v<sub>7</sub>, o modelo ajustado na Figura 4.35.



### Regression Analysis: v7 versus v2; v3; v4; v6; v11; v30; v31

The regression equation is

$$v7 = 1657 - 51,8 v2 + 21,4 v3 - 19,7 v4 - 7,29 v6 + 49,6 v11 - 3,45 v30 - 0,440 v31$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1656,7	871,0	1,90	0,080
v2	-51,85	28,80	-1,80	0,095
v3	21,380	5,954	3,59	0,003
v4	-19,667	3,067	-6,41	0,000
v6	-7,290	1,603	-4,55	0,001
v11	49,58	10,81	4,58	0,001
v30	-3,449	1,478	-2,33	0,036
v31	-0,4397	0,1027	-4,28	0,001

S = 33,9949    R-Sq = 93,5%    R-Sq(adj) = 90,0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	215991	30856	26,70	0,000
Residual Error	13	15023	1156		
Total	20	231015			

Source	DF	Seq SS
v2	1	1992
v3	1	20100
v4	1	102440
v6	1	24797
v11	1	36652
v30	1	8834
v31	1	21176

**Figura 4.35** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_7$ , ajustado para os dados históricos tais quais, levantados para a Coluna NAT 2.

Conforme os comentários da Figura 4.33, de determinação do melhor subconjunto, o modelo está bem ajustado, o que se pode observar pelo coeficiente de determinação de 90%, assinalado em amarelo, bem como pelos baixos valores de  $p$ , conforme o item 2.2.6.3, assinalados em azul, justificando, para a variável  $v_7$ , que este modelo tenha servido de base para a uniformização descrita na análise da Coluna NAT 1, no item 4.2.2.4.5.

Para a variável  $v_{10}$ , definido o melhor subconjunto de variáveis independentes, ajusta-se o modelo de regressão múltipla, conforme indicado na Figura 4.36.

### Regression Analysis: v10 versus v1; v3; v6; v16; v31

The regression equation is

$$v_{10} = 0,622 - 0,0455 v_1 + 0,0405 v_3 + 0,000707 v_6 + 0,000063 v_{16} - 0,000123 v_{31}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,6222	0,1033	6,02	0,000
v1	-0,0454612	0,0007929	-57,34	0,000
v3	0,040550	0,001854	21,87	0,000
v6	0,0007074	0,0003185	2,22	0,042
v16	0,00006255	0,00000154	40,57	0,000
v31	-0,00012315	0,00003251	-3,79	0,002

S = 0,00918439 R-Sq = 99,8% R-Sq(adj) = 99,8%

#### Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	0,68033	0,13607	1613,06	0,000
Residual Error	15	0,00127	0,00008		
Total	20	0,68160			

Source	DF	Seq SS
v1	1	0,48780
v3	1	0,00092
v6	1	0,02216
v16	1	0,16823
v31	1	0,00121

**Figura 4.36** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_{10}$ , ajustado para os dados históricos tais quais, levantados para a Coluna NAT 2.

Conforme o comentado para a Figura 4.34, de determinação do melhor subconjunto, o modelo está muito bem ajustado, o que se pode observar pelo coeficiente de determinação de 99,8%, assinalado em amarelo, bem como pelos baixos valores de  $p$ , conforme o descrito em 2.2.6.3, assinalados em azul, também justificando, para a variável  $v_{10}$ , que este modelo tenha servido de base para a uniformização descrita na análise da Coluna NAT 1, no item 4.2.2.4.5.

Para ambas variáveis dependentes avaliadas, as saídas do Minitab identificam para modelos ajustados os pontos que estão fora do ajuste, em inglês *outliers*, conforme o detalhado em 2.2.7.3, podendo ou não ser eliminados, dependendo da necessidade de aumentar o coeficiente de determinação, requerendo, para tanto, nova análise. Para a Coluna NAT 2 não foram retirados os *outliers*.

#### 4.2.2.5.6. CODIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Realizada conforme o detalhado em 2.2.5 para o conjunto de dados históricos para os quais foram ajustados os modelos de regressão, ou seja, no caso da Coluna NAT 2, para os 21 conjuntos de dados históricos, ou o residual, caso se desejasse retirar os *outliers*.

#### 4.2.2.5.7. AJUSTE DO MODELO COM AS VARIÁVEIS CODIFICADAS

Conclui-se a análise estatística da Coluna NAT 2, para ambas variáveis dependentes  $v_7$  e  $v_{10}$ , ajustando os modelos obtidos para as variáveis tais quais para as variáveis codificadas.

A Figura 4.37 contém a análise estatística final para  $v_7$ .

### Regression Analysis: v7 versus v2; v3; v4; v6; v11; v30; v31

The regression equation is

$$v7 = -0,075 - 0,202 v2 + 0,481 v3 - 1,11 v4 - 0,645 v6 + 0,490 v11 - 0,305 v30 - 0,332 v31$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,0750	0,1010	-0,74	0,471
v2	-0,2018	0,1121	-1,80	0,095
v3	0,4810	0,1340	3,59	0,003
v4	-1,1129	0,1735	-6,41	0,000
v6	-0,6450	0,1418	-4,55	0,001
v11	0,4898	0,1068	4,58	0,001
v30	-0,3046	0,1305	-2,33	0,036
v31	-0,33179	0,07751	-4,28	0,001

S = 0,203562 R-Sq = 93,5% R-Sq(adj) = 90,0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	7	7,7447	1,1064	26,70	0,000
Residual Error	13	0,5387	0,0414		
Total	20	8,2834			

Source	DF	Seq SS
v2	1	0,0714
v3	1	0,7207
v4	1	3,6731
v6	1	0,8891
v11	1	1,3142
v30	1	0,3167
v31	1	0,7593

**Figura 4.37** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_7$ , ajustado para os dados históricos codificados da Coluna NAT 2.

O modelo ajustado para as variáveis codificadas, assinalado em púrpura, é constituído por uma expressão em que os valores dos parâmetros são coerentes, devendo-se somente considerar a constante nula, porque o sinal negativo não tem significado físico. O modelo final está bem ajustado, conforme observado pelo coeficiente de determinação de 90%, assinalado em amarelo, bem como pelos baixos valores de  $p$ , conforme 2.2.6.3, assinalados em azul, mais uma vez justificando, para a variável  $v_7$ , que este modelo tenha servido de base para a uniformização descrita na análise da Coluna NAT 1.

A Figura 4.38 contém a análise estatística final para  $v_{10}$ .

### Regression Analysis: v10 versus v1; v3; v6; v16; v31

The regression equation is

$$v_{10} = 0,152 - 1,58 v_1 + 0,528 v_3 + 0,0362 v_6 + 1,26 v_{16} - 0,0538 v_{31}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,151583	0,009304	16,29	0,000
v1	-1,58050	0,02757	-57,34	0,000
v3	0,52813	0,02415	21,87	0,000
v6	0,03623	0,01631	2,22	0,042
v16	1,25929	0,03104	40,57	0,000
v31	-0,05379	0,01420	-3,79	0,002

S = 0,0318350 R-Sq = 99,8% R-Sq(adj) = 99,8%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	8,1739	1,6348	1613,06	0,000
Residual Error	15	0,0152	0,0010		
Total	20	8,1891			

Source	DF	Seq SS
v1	1	5,8607
v3	1	0,0111
v6	1	0,2663
v16	1	2,0212
v31	1	0,0145

**Figura 4.38** Saída do Minitab para o modelo de regressão múltipla para  $v_{10}$ , ajustado para os dados históricos codificados da Coluna NAT 2.

O modelo ajustado para as variáveis codificadas, assinalado em verde, é constituído por uma expressão em que os valores dos parâmetros são coerentes. O modelo final está muito bem ajustado, conforme observado pelo coeficiente de determinação de 99,8%, assinalado em amarelo, bem como pelos baixos valores de  $p$ , conforme 2.2.6.3, assinalados em azul, mais uma vez justificando, para a variável  $v_{10}$ , que este modelo tenha servido de base para a uniformização descrita na análise da Coluna NAT 1.

#### 4.2.2.6. TORRE II

##### 4.2.2.6.1. ANÁLISE DO CONJUNTO COMPLETO

A análise estatística do universo de dados históricos do conjunto completo de colunas de absorção providas de pratos, designada de Torre II, constituída das Colunas 14, 15 e 16, conforme descrito no item 3.2, foi executada à semelhança do que foi anteriormente efetuado para o estudo da etapa de fiação, analisando os dados históricos de cada máquina, bem como o universo de todo o conjunto, tendo sido muito útil, visto que as análises assim realizadas explicavam umas as outras, possibilitando chegar a observações conclusivas (Nasser, 2005).

Por esta razão, no presente estudo, efetuou-se esta tentativa, com o objetivo de aumentar a quantidade de conjuntos de dados históricos, bem como para melhorar a qualidade dos modelos ajustados a este universo bem maior.

A seqüência exposta da análise estatística realizada individualmente para todas as colunas, conforme o descrito desde o item 4.2.2.1 até o 4.2.2.5, também foi realizada para este conjunto, que, contudo, apresentou resultados negativos, tais como baixos coeficientes de determinação ( $R^2_a$ ), modelos com significativos erros atribuídos às variáveis, e a necessidade de retirar quantidade apreciável de conjuntos de *outliers*, na tentativa de ajustar os modelos. Por esta razão e para facilitar a leitura do texto, esta análise não será detalhada.

#### 4.2.2.6.2. ANÁLISE PARCIAL DA TORRE II

Pela mesma razão exposta no item anterior, a análise estatística do universo de dados históricos do conjunto parcial de colunas de absorção providas de pratos, geometricamente idênticas, que são somente as Colunas 14 e 15.

Também para este conjunto, a seqüência exposta da análise estatística realizada individualmente para todas as colunas, conforme o descrito desde o item 4.2.2.1 até o 4.2.2.5, foi realizada para este conjunto, apresentando os mesmos resultados negativos, em termos estatísticos, razão pela qual esta análise não será detalhada.

#### 4.2.3. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA

O produto principal da análise estatística realizada individualmente para todas as colunas de absorção, seguindo a seqüência descrita desde o item 4.2.2.1 até o 4.2.2.5, foram os modelos de regressão ajustados para os respectivos conjuntos de dados históricos contidos nas Figuras 4.11 e 4.12, para a Coluna 14, Figuras 4.17 e 4.18, para a Coluna 15, Figuras 4.23 e 4.24, para a Coluna 16, Figuras 4.31 e 4.32, para a Coluna NAT 1, e Figuras 4.33 e 4.38, para a Coluna NAT 2, transcritos e adequados (eliminação de eventuais constantes negativas, sem significado físico) na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7** Quadro Resumo dos Modelos de Regressão Ajustados para as Colunas de Absorção

Universo de Dados	Quantidade de Conjuntos	Parâmetros Dependentes	Modelo de Regressão Ajustado	$R_a^2$ %
Coluna 14	83	[Ac] <sub>topo</sub>	$v_7 = 3,18v_1 + 2,86v_2 + 9,75v_3 + 0,341v_6 - 10,9v_{11} - 6,33v_{16} + 0,119v_{32} - 17,0v_{38}$	72,5
		[Ac] <sub>água rica</sub>	$v_{10} = -0,729 v_1 + 0,565 v_3 + 1,37 v_{16} + 0,0146 v_{30}$	99,6
Coluna 15	83	[Ac] <sub>topo</sub>	$v_7 = 0,165 v_1 - 0,357 v_2 + 0,517 v_3 - 0,673 v_6 - 0,538 v_{11} - 0,049 v_{16} - 0,258 v_{32} - 0,151 v_{38}$	44,7
		[Ac] <sub>água rica</sub>	$v_{10} = -1,40 v_1 + 1,15 v_3 + 1,26 v_{16} + 0,0042 v_{30}$	99,2
Coluna 16	83	[Ac] <sub>topo</sub>	$v_7 = 11,4 v_1 + 2,91 v_2 + 14,6 v_3 - 0,233 v_6 - 16,9 v_{11} - 11,1 v_{16} + 0,0343 v_{32} - 17,1 v_{38}$	81,9
		[Ac] <sub>água rica</sub>	$v_{10} = -1,81 v_1 + 0,539 v_3 + 1,75 v_{16} + 0,0383 v_{30}$	99,7
NAT 1	22	[Ac] <sub>topo</sub>	$v_7 = 0,131 + 0,112v_2 + 0,060v_3 - 0,481v_4 + 0,396v_6 - 0,160v_{11} - 0,060v_{30} - 0,405v_{31}$	91,7
		[Ac] <sub>água rica</sub>	$v_{10} = 0,0269 - 0,859 v_1 + 0,390 v_3 - 0,0618 v_6 + 1,41 v_{16} + 0,0161 v_{31}$	99,3
NAT 2	22	[Ac] <sub>topo</sub>	$v_7 = -0,202v_2 + 0,481v_3 - 1,11v_4 - 0,645v_6 + 0,490v_{11} - 0,305v_{30} - 0,332v_{31}$	90,0
		[Ac] <sub>água rica</sub>	$v_{10} = 0,152 - 1,58 v_1 + 0,528 v_3 + 0,0362 v_6 + 1,26 v_{16} - 0,0538 v_{31}$	99,8



Para facilitar a interpretação dos modelos ajustados para as diversas colunas, contidos na Tabela 4.7, resume-se a forma do impacto das diversas variáveis independentes envolvidas sobre a variável  $v_7$ , concentração de acetona na corrente de ar lavado, na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8** Impacto das variáveis independentes sobre a variável  $v_7$

$v_i$	Colunas					Comentários (1)
	14	15	16	NAT1	NAT2	
$v_1$	+	+	+	na	na	2
$v_2$	+	-	+	+	+	3
$v_3$	+	+	+	+	+	4
$v_4$	na	na	na	-	-	5
$v_6$	+	-	-	+	-	6
$v_{11}$	-	-	-	-	+	7
$v_{16}$	-	-	-	na	na	8
$v_{38}$	-	-	-	na	na	9
$v_{30}$	na	na	na	-	-	10
$v_{31}$	na	na	na	-	-	11
$v_{32}$	+	-	+	na	na	12

na – não aplicável

Seguem os comentários sobre a Tabela 4.8:

1. As descrições das variáveis independentes referenciadas encontram-se na Tabela 4.6, bem como serão referenciadas nos comentários.
2. Apesar de parecer fenomenologicamente incoerente, o fato de  $v_1$ , vazão de água gelada, não contribuir para a redução da concentração de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , significa que existem outras

variáveis que a corrigem ou compensam, como é caso de  $v_{11}$ , temperatura de água rica, que pelo maior valor do parâmetro ou coeficiente no modelo, bem como pelo sinal negativo, indica ser mais eficaz para o controle pretendido, conforme o comprovado no estudo realizado nas colunas da Torre II (Nasser, 1997) e na otimização feita das colunas antigas, existentes na Torre I (Nasser & Tutyia, 2005). No caso das colunas providas de pratos, é bastante provável que o sinal positivo, evidenciado pelos modelos ajustados, signifique que, com o aumento da vazão de água gelada, talvez devido ao significativo tempo de residência do líquido sobre os pratos, haja algum tipo de inundação, seja sobre ele mesmo, seja no vertedouro, impactando negativamente na hidrodinâmica do prato, reduzindo sua eficiência Murphree. É importante notar que, nos modelos de regressão ajustados para as colunas providas de recheios, em que não há sentido físico em falar de tempo de residência do líquido sobre o estágio de equilíbrio equivalente, ou melhor, de forma geral, para todo o leito, o tempo de residência do líquido sobre o recheio é mínimo, os modelos de regressão ajustados não detectaram qualquer influência desta variável.

3. Fenomenologicamente, o aumento da temperatura de alimentação da água gelada,  $v_2$ , resulta num aumento da concentração de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , sendo, portanto, coerente, o sinal positivo, conforme o observado para as Colunas 14, 16 e NAT 1, em que além disto é verificado que o parâmetro desta variável, no modelo ajustado é significativo, ao passo que, para a Coluna 15, além do sinal ser negativo, o parâmetro do modelo ajustado é pouco significativo, não havendo uma justificativa fenomenológica, tendendo a explicar o verificado pelo baixo coeficiente de determinação do modelo. Na Coluna NAT 2, além do sinal negativo, o parâmetro do modelo ajustado é significativo, interpretando o fato devido ao notório superdimensionamento da coluna, que, tem uma

área de escoamento 54% maior do que a Coluna NAT 1, mas opera com as mesmas vazões de ar acetinado, possivelmente significando que, com o aumento da temperatura da água gelada no topo da coluna, haja um aumento da turbulência e uma melhoria do coeficiente de troca de massa, aumentando a eficiência da coluna, diminuindo  $v_7$ , explicando o sinal negativo.

4. O impacto positivo da variável  $v_3$ , concentração de acetona na corrente de ar acetona alimentada à coluna, sobre  $v_7$ , concentração de acetona na corrente de ar lavado, saindo da coluna, está coerente em todas as colunas. Nos modelos ajustados para as colunas providas de pratos, o parâmetro desta variável é muito significativo, sendo, contudo, corrigido pela variável  $v_{38}$ , resultado da relação de  $v_3$  e  $v_{12}$ , conforme o detalhado pela Equação 4.1, no item 4.2.2.1.5, à qual também foi ajustado um parâmetro muito significativo. No caso dos modelos ajustados para as colunas providas de recheios, a esta variável foi ajustado um parâmetro pouco significativo, para a Coluna NAT 1, ao passo que para a Coluna NAT 2 o parâmetro ajustado é muito superior, provavelmente devido ao seu superdimensionamento.
5. O sinal negativo da temperatura de alimentação de ar acetinado,  $v_4$ , dos modelos ajustados para as colunas providas de recheios, está coerente com a redução do teor de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , pois quanto maior a temperatura na alimentação, maior a turbulência da corrente gasosa através do leito de recheios, aumentando o coeficiente de troca de massa e a eficiência da coluna. Observar que, devido ao superdimensionamento mencionado da Coluna NAT 2, o parâmetro ajustado para  $v_4$  é mais do que o dobro do ajustado para a Coluna NAT 1, ou seja, sua eficiência melhora com auxílio desta variável, evidenciando a questão do dimensionamento.

6. A perda de carga ( $v_6$ ) ao longo da coluna de absorção provida de pratos pode ter um impacto fenomenológico tanto positivo, no caso do prato estar trabalhando com nível suficientemente alto para resultar numa boa troca de massa, quanto negativo, caso o prato esteja sujo, importando, contudo, analisar que o parâmetro ajustado é pouco significativo, sendo, portanto, coerente. Para o caso da coluna provida de recheios, o impacto positivo ajustado para Coluna NAT 1 pode significar uma consequência do fato de a coluna estar suja, ao passo que, para a Coluna NAT 2, o impacto negativo pode significar que o aumento de perda de carga, devido ao superdimensionamento da coluna, resulta numa melhoria de sua eficiência, diminuindo  $v_7$ .
7. Fenomenologicamente, o aumento da temperatura de saída da água rica,  $v_{11}$ , resulta numa diminuição da concentração de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , sendo, portanto, coerente o sinal negativo, conforme o observado para todas as colunas, exceção feita à Coluna NAT 2, mais uma vez atribuído ao seu superdimensionamento. Conforme já explicado no Comentário 2, a relevância dada pelos modelos obtidos para esta variável tem um significado extraordinário, implicando num novo modo de controle das colunas, explicando-se fenomenologicamente, pois, quanto maior for a temperatura da água rica,  $v_{11}$ , melhor a eficiência de troca de energia ao longo da coluna, e, em consequência, em troca de massa. Com base nesta constatação, sugere-se implementar um controle efetivo de concentração de acetona na corrente de ar lavado, instalando o sensor de temperatura à saída de água rica, atuando sobre o ponto de ajuste do controlador de vazão de água, semelhante ao proposto anteriormente (Nasser, 1997), alterando a posição do sensor de temperatura.
8. O sinal negativo da vazão mássica de alimentação de ar acetonado,  $v_{16}$ , dos modelos ajustados, para as colunas providas de pratos, está coerente

com a redução do teor de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , pois quanto maior a vazão na alimentação, maior a turbulência da corrente gasosa ao longo da coluna, aumentando o coeficiente de troca de massa e energia, e, conseqüentemente, a eficiência da coluna.

9. Fenomenologicamente, o aumento de  $v_{38}$ , resultado da relação de  $v_3$  e  $v_{12}$ , conforme o detalhado pela Equação 4.1, no item 4.2.2.1.5, onde é explicado que tem o significado de massa específica, ou seja, quanto maior o teor de acetona, maior o gradiente de troca, melhorando coeficiente de troca de massa, resultando numa diminuição da concentração de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , sendo, portanto, coerente o sinal negativo, conforme o observado para todas as colunas providas de pratos, podendo ainda ser compreendido como uma forma de correção de  $v_3$ , pela forma que é expressa em  $g/Nm^3$ , como uma forma de compensação para as condições reais de operação.
10. O sinal negativo da velocidade de fiação,  $v_{30}$ , nos modelos ajustados para as colunas de recheios é explicado pela maior vazão de vapor de acetona alimentado, aumentando a turbulência da corrente gasosa ao longo da coluna, aumentando o coeficiente de troca de massa e a eficiência da coluna, reduzindo o teor de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , sendo, portanto, fenomenologicamente coerente.
11. Fenomenologicamente, o aumento do tempo decorrido desde a última limpeza,  $v_{31}$ , resulta numa redução da eficiência de troca de massa e energia, aumentando a concentração de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , não sendo, portanto, coerente o sinal negativo, conforme o observado para as colunas providas de recheios. Contudo, ao examinar esta possibilidade para a Coluna NAT 2, devido à mencionada questão do superdimensionamento, bem como ao examinar a carta de controle da

perda de carga através do leito, contida Figura A.24, entende-se que, com o passar do tempo, devido à incrustação dos recheios, há um aumento da perda de carga no leito que favorece a turbulência, aumentando os coeficientes de troca de massa de massa energia, melhorando a eficiência da coluna, tornando coerente o sinal negativo, raciocínio que também explica o verificado na Coluna do NAT 1, principalmente se o modelo de regressão ajustado para a variável  $v_{10}$ , concentração de acetona na água rica, for analisado conjuntamente, o que se sugere. A seleção deste “ruído” no modelo ajustado para as colunas providas de recheios, segundo o critério exposto na Revisão Bibliográfica, no item 2.2.6.2, e empregado no item 4.2.2.4.4, para a Coluna NAT 1, e no item 4.2.2.5.4, para a Coluna NAT 2, evidencia a importância do citado no item 2.1.5.2, sobre a sensibilidade dos recheios em relação à qualidade da água de processos (Santos et alli, 2006, Santos et alli, 2008).

12. Fenomenologicamente, o aumento da concentração de acetona residual na água pobre,  $v_{32}$ , resulta num aumento da concentração de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , sendo, portanto, coerente o sinal positivo, conforme o observado para as Colunas 14 e 16, mas não para a Coluna 15, cabendo ainda assinalar que, para as colunas providas de recheio, o modelo ajustado não demonstrou impacto desta variável, provavelmente explicado pelo fato de que os pratos permitam o tempo de residência requerido pela corrente líquida para que se estabeleça o equilíbrio líquido vapor, o que não ocorre com as colunas providas de recheios. Apesar do pequeno impacto de  $v_{32}$  sobre  $v_7$ , ele existe e precisa ser considerado, sendo um resultado muito importante da análise estatística. Contudo, a diferença do sinal para o parâmetro ajustado para esta variável, no caso da Coluna 15, requer uma verificação fenomenológica complementar.

Adotando o mesmo procedimento de interpretação para a variável dependente  $v_{10}$ , concentração de acetona na corrente de água rica, resume-se, na Tabela 4.9, a forma do impacto das diversas variáveis independentes envolvidas sobre ela.

**Tabela 4.9** Impacto das variáveis independentes sobre a variável  $v_{10}$

$v_i$	Colunas					Comentários (13)
	14	15	16	NAT1	NAT2	
$v_1$	-	-	-	-	-	14
$v_3$	+	+	+	+	+	15
$v_6$	na	na	na	-	+	16
$v_{16}$	+	+	+	+	+	17
$v_{30}$	+	+	+	na	na	18
$v_{31}$	na	na	na	+	-	19

na – não aplicável

Seguem os comentários sobre a Tabela 4.9:

13. Idêntico ao Comentário 1.

14. Fenomenologicamente, o aumento da vazão de água gelada,  $v_1$ , contribui marcadamente para a redução da concentração de acetona na água rica,  $v_{10}$ , seja pelo sinal negativo, bem como pelos significativos parâmetros ajustados para todas as colunas. Esta constatação torna ainda mais importante a mudança descrita para o controle da concentração da acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , conforme o descrito no Comentário 2, qual seja, pelo controle da temperatura da água rica,  $v_{11}$ , o que foi também comprovado na otimização feita das antigas colunas, existentes na Torre I (Nasser & Tutyia, 2005), em que a tendência de fazer controle manual da concentração da acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , foi

evidenciado como negativo, em termos de consumo energético, ou seja, diluindo significativamente a corrente de água rica, requerendo muito mais energia para recuperar a acetona e condicionar a água pobre à absorção.

15. Fenomenologicamente, o aumento da variável  $v_3$ , concentração de acetona na corrente de ar acetonado alimentado à coluna, aumenta  $v_{10}$ , concentração de acetona na corrente de água rica, saindo pelo fundo da coluna. Portanto, o sinal positivo está coerente em todos os modelos ajustados às colunas, bem como os significativos parâmetros atribuídos a esta variável, que confirmam sua coerência com a fenomenologia.
16. Apesar de ser pouco significativa, se comparados os parâmetros ajustados a esta variável, com relação aos parâmetros das outras variáveis, fenomenologicamente o aumento da perda de carga ( $v_6$ ) ao longo da coluna de absorção provida de recheios tem um impacto fenomenológico negativo sobre a concentração de acetona na água rica, significando uma perda de energia, diminuindo a turbulência da corrente gasosa, com conseqüente diminuição do coeficiente de troca de massa e da eficiência da coluna, o que se verifica no modelo ajustado aos dados históricos da Coluna NAT1. Como já mencionado diversas vezes, devido ao seu superdimensionamento, o modelo ajustado aos dados históricos da Coluna NAT 2 evidencia um impacto positivo da perda de carga sobre o coeficiente de troca de massa e sua eficiência, provavelmente, devido ao aumento de volume da corrente gasosa, aumentando a turbulência.
17. Fenomenologicamente, o aumento da vazão mássica de alimentação de ar acetonado,  $v_{16}$ , contribui marcadamente para o aumento da concentração de acetona na água rica,  $v_{10}$ , pois, quanto maior a vazão na alimentação, maior a turbulência da corrente gasosa ao longo da coluna, aumentando o coeficiente de troca de massa e a eficiência da coluna.



18. Fenomenologicamente, quanto maior a velocidade de fiação,  $v_{30}$ , nos modelos ajustados para as colunas providas de pratos, apesar do parâmetro pouco significativo, maior vazão de vapor de acetona alimentada, aumentando a concentração de acetona na corrente de água rica,  $v_{10}$ .
19. Da mesma forma que o evidenciado no Comentário 11, e complementando-o, para a Coluna NAT 1, a explicação para o aumento da concentração de acetona na corrente de água rica,  $v_{10}$ , com o aumento do tempo decorrido desde a última limpeza,  $v_{31}$ , é a mesma, qual seja, devido à incrustação dos recheios, há um aumento da perda de carga no leito que favorece a turbulência, aumentando os coeficientes de troca de massa de massa energia, melhorando a eficiência da coluna, tornando coerente o sinal positivo do parâmetro pouco significativo ajustado ao modelo, portanto, fenomenologicamente coerente. Ao contrário, para a Coluna NAT 2, a explicação do sinal negativo e da pouca significância do parâmetro ajustado ao modelo, é a redução da eficiência, já comprometida pelo mencionado superdimensionamento. De qualquer forma, o observado no Comentário 11, quanto à seleção deste “ruído” para constar do modelo ajustado para as colunas providas de recheios, para ambas variáveis dependentes, torna ainda mais importante o citado no item 2.1.5.2, sobre a sensibilidade dos recheios em relação à qualidade da água de processos (Santos et alli, 2006, Santos et alli, 2008).

Por fim, quanto às análises estatísticas feitas para a Torre II, descritas no item 4.2.2.6, explica-se fenomenologicamente o resultado negativo, devido às diferenças geométricas ou de projeto construtivo das colunas providas de pratos, visto que a Coluna 16 difere das demais pelo maior espaçamento entre os pratos, no que se refere à análise de todo o conjunto, descrita no item 4.2.2.6.1. Ao

restringir a análise estatística às Colunas 14 e 15, idênticas, de acordo com o exposto em 4.2.2.6.2, o resultado também não foi positivo, desta feita devido à localização diversa, o que influenciou as condições operacionais. Somente para referência, a análise estatística que serviu de base para esta tentativa foi feita a partir de dados históricos obtidos de equipamentos muito semelhantes, operando em condições muito próximas (Nasser, 2005).

#### 4.2.4. CONFIRMAÇÃO FENOMENOLÓGICA DOS RUÍDOS

Com base no descrito no item 4.2.3, de interpretação dos resultados da análise estatística, uma avaliação fenomenológica foi feita, de forma satisfatória, para todos os ruídos, com exceção da concentração de acetona residual na água pobre,  $v_{32}$ , conforme o evidenciado no Comentário 12 do mesmo item, referente à Tabela 4.8.

Para tanto, para as 3 colunas providas de pratos, foi seguido o procedimento, descrito a seguir:

- tomando o conjunto de dados históricos após a avaliação individual dos dados, utilizando suas cartas de controle, conforme o descrito em 4.2.2.1.2, para a Coluna 14, 4.2.2.2.2, para a Coluna 15, e 4.2.2.3.2, para a Coluna 16, observar os valores médio, mínimo e máximo de concentração de acetona residual na água pobre,  $v_{32}$ ;
- escolher um conjunto de dados em que a concentração de acetona residual na água pobre,  $v_{32}$ , seja próxima ao valor médio;

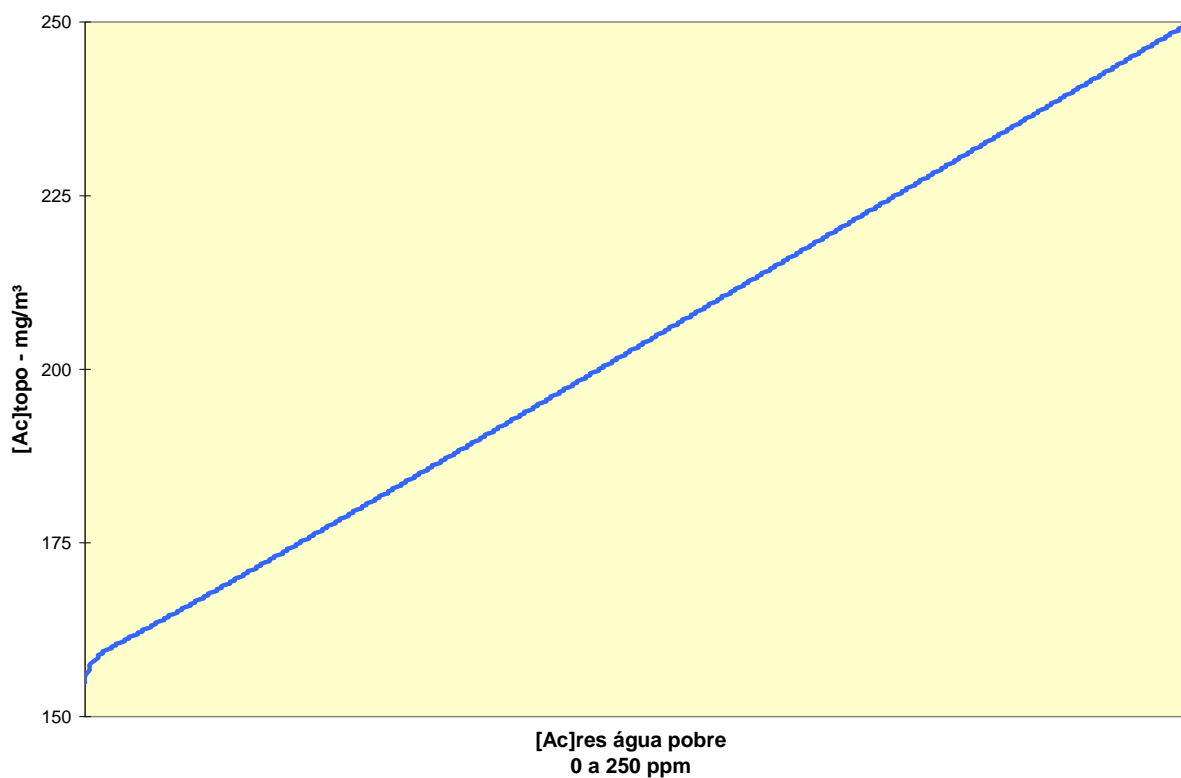
- fazer a simulação de base inicial para este conjunto, estabelecendo a sua *Fotografia*, conforme o descrito no item 3.4.2, fixando a concentração de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , e variando a eficiência Murphree, com o objetivo de determiná-la, para aquele conjunto de dados; a *Fotografia* estabelecida com este conjunto se constituirá no valor médio;
- com esta eficiência Murphree fixada, bem como para as mesmas condições de vazão e temperatura de ar acetinado alimentado, como também a vazão temperatura de água gelada, variando-se a concentração de acetona residual na corrente de água pobre gelada,  $v_{32}$ , para os valores mínimo e máximo, como ainda para água gelada isenta de acetona.

Os resultados da seqüência exposta evidenciaram que o impacto do aumento da concentração de acetona residual,  $v_{32}$ , sobre a concentração de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , é positivo, ou seja, para um aumento de  $v_{32}$  corresponde um aumento de  $v_7$ , o que se verificou para as 3 colunas de pratos, confirmando a tendência detectada pela análise estatística para as Colunas 14 e 16, o que não se verificou para a Coluna 15, provavelmente devido ao menor coeficiente de determinação do modelo ajustado.

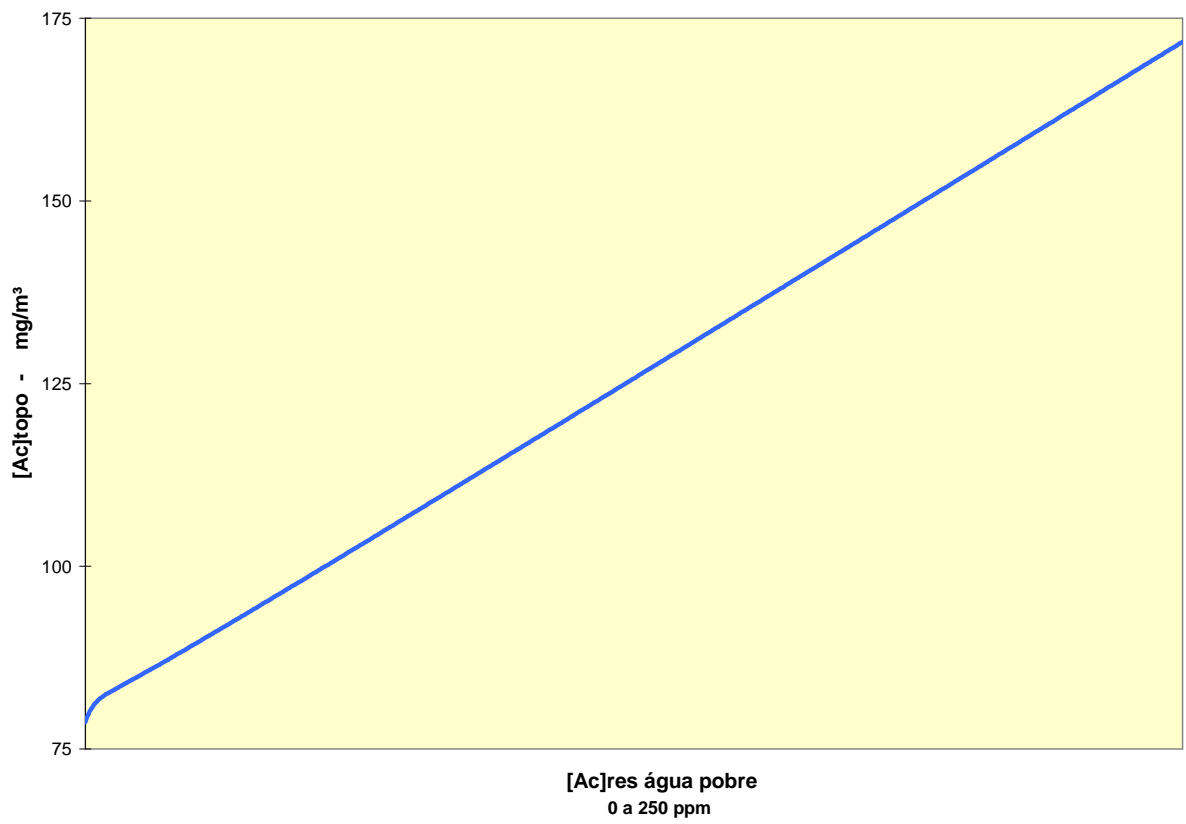
É também interessante assinalar que, para as 3 colunas testadas, de acordo com o descrito, não se detectou qualquer influência da concentração residual de acetona na corrente de água pobre gelada,  $v_{32}$ , sobre a concentração de acetona na corrente de água rica,  $v_{10}$ .

Com base nestes resultados, decidiu-se então fazer um estudo de sensibilidade à concentração de acetona residual na corrente de água pobre,  $v_{32}$ , sobre a concentração de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , mantendo constantes, conforme já exposto, todos os parâmetros operacionais, variando somente a

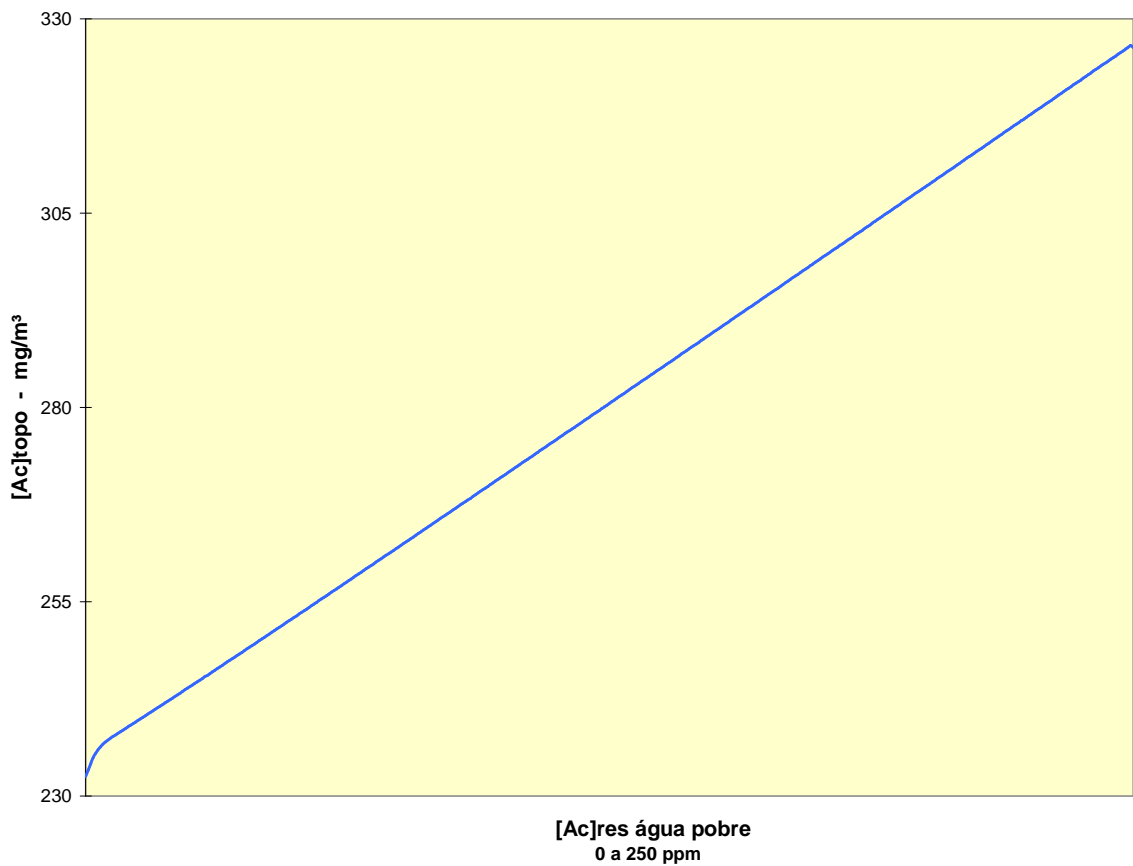
concentração de acetona na corrente de alimentação de água, o que se realizou, mantendo também constante a vazão de água fria alimentada à coluna, e variando somente a vazão molar de acetona nesta corrente, o que foi feito com incrementos de 0,00016667 kmol/h, gerando um conjunto de 422 dados (variando a concentração nesta corrente de 0 a 250 ppm), que, colocados num gráfico, deixam evidente a influência descrita, conforme mostram as Figuras 4.39, 4.40 e 4.41, respectivamente para as Colunas 14, 15 e 16.



**Figura 4.39** Confirmação fenomenológica, impacto de  $v_{32}$  sobre  $v_7$ , Coluna 14.

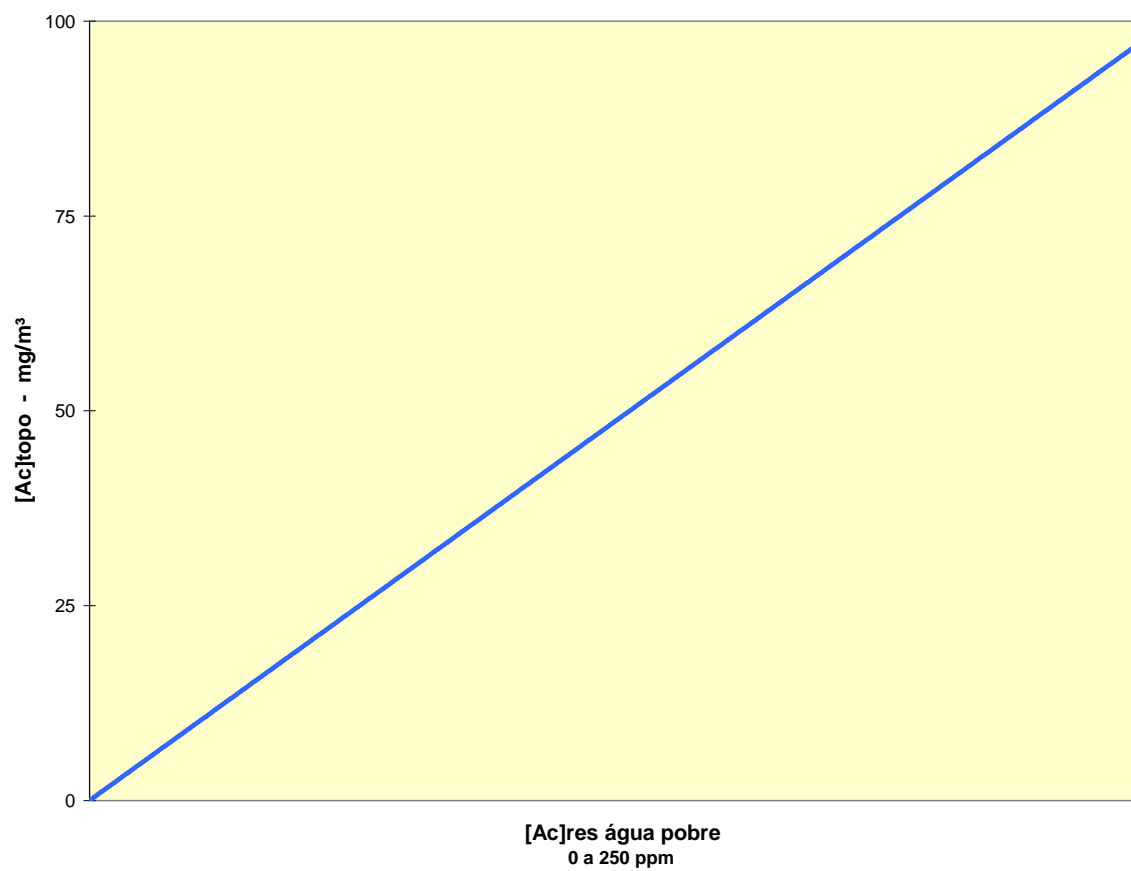


**Figura 4.40** Confirmação fenomenológica, impacto de  $v_{32}$  sobre  $v_7$ , Coluna 15.

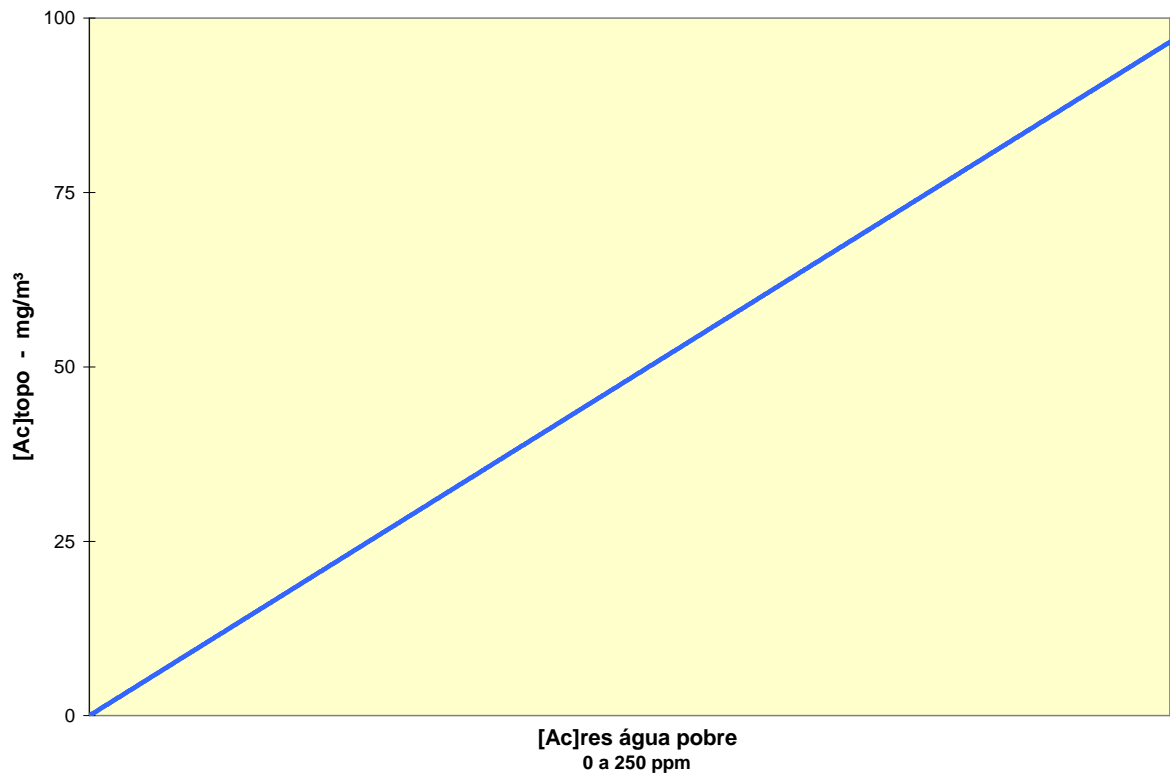


**Figura 4.41** Confirmação fenomenológica, impacto de  $v_{32}$  sobre  $v_7$ , Coluna 16.

Devido à influência da concentração de acetona residual na água pobre gelada,  $v_{32}$ , detectada através da análise estatística, e que foi confirmada fenomenologicamente para as colunas providas de pratos de forma ainda mais evidente, repetiu-se, seguindo o mesmo procedimento descrito para as colunas providas de recheios NAT 1 e NAT 2, também realizando o estudo de sensibilidade, conforme respectivamente mostram as Figuras 4.42 e 4.43.



**Figura 4.42** Confirmação fenomenológica, impacto de  $v_{32}$  sobre  $v_7$ , Coluna NAT 1.



**Figura 4.43** Confirmação fenomenológica, impacto de  $v_{32}$  sobre  $v_7$ , Coluna NAT 2.

Conclui-se este item, enfatizando o evidenciado pelas Figuras 4.39 a 4.43, qual seja, o impacto positivo de  $v_{32}$  sobre  $v_7$ , o que, por si só, se constitui resultado marcante da realização da análise estatística.

Ainda observando as figuras mencionadas, é evidente a diferença de valores da concentração de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , comparando as colunas providas de pratos com as providas de recheios, o que não se deve a maior eficiência destas últimas, mas ao excesso de água, com que está sendo realizada a operação, comprometendo o consumo energético do sistema.



#### 4.2.5. IMPACTOS SOBRE PROCESSO

A quantificação do exposto no item anterior sobre a redução da concentração de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , através da redução da concentração da acetona residual na corrente de água pobre,  $v_{32}$ , requereu as seguintes verificações, que se expõem a seguir:

- através de simulações das colunas de destilação foi verificado que a quantidade de vapor requerida para diminuir a concentração de acetona na água pobre,  $v_{32}$ , dos níveis reportados no levantamento de dados históricos (média 50 ppm), idêntico ao valor médio praticado pela Produção (Rhodia Acetow, 2009)<sup>A</sup>, a níveis desprezíveis (0,1 ppm) é da ordem de 800 kg/h, o que está disponível na unidade, como vapor de escape de turbinas que movem os ventiladores centrífugos, a uma pressão entre 1,0 a 1,2 kgf/cm<sup>2</sup> manométrica, ou seja, adequada à destilação, não envolvendo quaisquer custos;
- o esgotamento da acetona residual da água pobre na etapa de destilação significa uma redução da perda de acetona de 7,03 kg/h;
- a redução da perda de acetona na corrente de ar lavado, como consequência da diminuição da concentração,  $v_7$ , na etapa de absorção, significa uma redução da perda de acetona de 7,78 kg/h;
- com relação ao nível atual de produção, as reduções descritas são possíveis de serem atingidas, sem quaisquer custos adicionais, significando uma diminuição de 8,34 kg acetona / ton filter tow, ou seja, próximo a 15% da perda média verificada no ano de 2009, 56,5 kg acetona / ton filter tow (Rhodia Acetow, 2009)<sup>B</sup>, com significativo impacto ambiental.

Além do esgotamento da acetona na água pobre obtida na destilação, anteriormente exposto, segue-se detalhamento de possível otimização da unidade de recuperação:

- na etapa de absorção, foi feita uma simulação da otimização da operação, utilizando os modelos propostos, principalmente quanto à facilidade operacional de utilizar a variável temperatura da água rica,  $v_{11}$ , como um normalizador, evitando flutuações, que são observadas no modo manual de controle, atualmente utilizado, ineficaz quanto à estabilização operacional, de acordo com o observado nas cartas de controle dos dados históricos; por exemplo, como meio de tentar reduzir a concentração de acetona na corrente de ar lavado,  $v_7$ , aumenta-se excessivamente a vazão de água gelada,  $v_1$ , obtendo-se, em consequência, uma corrente de água rica em que a concentração de acetona é 2,7% em massa (resultados constantes dos dados históricos e também obtidos por simulações efetuadas a partir deles);
- impondo que a utilização dos modelos propostos, como base para a implantação de um sistema de controle, conforme já descrito nos Comentários 2 e 7, relativos à Tabela 4.8, item 4.2.3, da interpretação dos resultados da análise estatística, estabilize a operação, principalmente por adequar, nas simulações originais, a concentração de acetona na corrente de ar lavado a níveis aceitáveis, comuns para todas colunas, conhecidos e de possível manutenção (Nasser & Tutyia, 2005), ou seja, constantes, se observa a real possibilidade de elevar a concentração de acetona na água rica até 2,9% em massa;
- a elevação da concentração de acetona na corrente de água rica para 2,9% em massa resulta numa diminuição na vazão de alimentação à destilação em 6%, reduzindo proporcionalmente o consumo de vapor em 443 kg/h (3865 ton/ano) e o consumo de energia elétrica requerida nas máquinas frigoríficas,

para o resfriamento da água pobre de 29 até 7°C, em 191.000 kcal/h (ou anualmente 1933 MW), metas possíveis de serem atingidas sem quaisquer custos, também impactando positivamente no meio-ambiente;

- o superdimensionamento da Coluna NAT 2, diversas vezes referenciado no item 4.2.3, de interpretação fenomenológica da análise estatística, indica uma outra possibilidade de melhoria operacional desta coluna, através de sua saturação, tendo em vista estar trabalhando atualmente a uma vazão de aproximadamente 36.000 m<sup>3</sup>/h (valor médio dos dados históricos), sendo sua capacidade nominal 52.000 m<sup>3</sup>/h, ainda longe de sua máxima capacidade operacional (Nasser, 2006); esta capacidade poderia ser atingida através do aumento da produção em 2.000 ton/ano, o que, contudo, requereria custos relativos a modificações da fiação propriamente dita, bem como de periféricos da unidade de recuperação de acetona, tais como tubulações, ventiladores e obras civis.

#### 4.2.6. ECONOMIAS POTENCIAIS

Apesar do descrito em 4.2.5, com relação ao aumento de capacidade de produção de Filter Tow, através da saturação da Coluna NAT 2, ser considerável, principalmente por poder resultar numa potencial economia que supera 5 milhões de reais por ano, a necessidade da realização de investimentos torna sua realização distante dos objetos do presente estudo, não devendo, contudo, deixar de eventualmente considerada.

Contudo, os outros dados relatados no item 4.2.5 são possíveis e, em comum, conforme já mencionado, não requerem, para sua implementação, quaisquer

custos, sejam eles operacionais ou de investimento. Com base na média de custos atualmente praticados (Rhodia Acetow, 2009)<sup>C</sup>, calculam-se, então as economias potenciais a serem consideradas.

Com relação à redução da perda de acetona relatada, devido ao esgotamento da acetona da água pobre na destilação e conseqüente diminuição da concentração de acetona na corrente de ar lavado na absorção, a economia potencial é 222 kR\$/ano.

Com relação à otimização descrita na absorção, a partir da utilização dos modelos obtidos, resultando no aumento da concentração de acetona na água rica até 2,9% em massa, as economias potenciais quantificadas são, quanto à redução do consumo de vapor na destilação da acetona, 383 kR\$/ano, e, devido à redução do consumo de energia elétrica no resfriamento da água pobre, 344 kR\$/ano.

Apesar de não poder ser quantificada economicamente, enfatiza-se a redução do impacto ambiental como ganho maior da implementação das modificações descritas.