

## Capítulo 4

### Calibração Onshore do Medidor Ultra-Sônico em Laboratório.

Nesse capítulo chega-se ao ponto de partida para o pleno desenvolvimento desse trabalho, após um processo complicado de liberação do medidor que estava em operação pela plataforma, bem como uma logística de deslocamento do equipamento até dois laboratórios distintos que serviram de fundamento para obtenção dos dados (parâmetros) do equipamento. Assim foi possível a avaliação submetendo-o às condições variadas de fluxo, usando dois diferentes fluidos para melhor avaliação dos resultados. De início será abordado quais os parâmetros foram coletados e posteriormente os procedimentos, resultados da calibração (considerando erros relativos e repetitividade) e diagnósticos do medidor para os dois sistemas distintos de fluidos.

#### 4.1

#### Parâmetros Coletados e Método de Aquisição de Dados

De posse do guia de referência do Altosonic V [17], foi possível rastrear e direcionar a coleta de dados para o endereçamento da unidade de processamento do medidor (UFP). Num total de 27 variáveis coletadas, foi possível acompanhar toda a sua variação a cada segundo durante todo o processo de calibração do equipamento, tanto na primeira etapa no circuito usando fluido de escoamento água, quanto na segunda parte no uso do óleo mineral. O Quadro 2 traz todas as variáveis coletadas, algumas utilizadas para o estudo do medidor.

**Quadro 2: Variáveis coletadas do Medidor Altosonic V**

<a href="#">Vazão do Processo</a>	Temperatura do Processo	Densidade do Processo	Temperatura do corpo do medidor
Vazão Padrão	Vazão mássica	N ° de Reynolds	<a href="#">Número de Swirl</a>
<a href="#">Vazão canal 01</a>	<a href="#">Vazão canal 02</a>	<a href="#">Vazão canal 03</a>	<a href="#">Vazão canal 04</a>
<a href="#">Vazão canal 05</a>	Viscosidade	Fator A	Fator B
<a href="#">Velocidade do som canal 01</a>	<a href="#">Velocidade do som canal 02</a>	<a href="#">Velocidade do som canal 03</a>	<a href="#">Velocidade do som canal 04</a>
<a href="#">Velocidade do som canal 05</a>	Fator KR	Desvio padrão canal 01	Desvio padrão canal 02
Desvio padrão canal 03	Desvio padrão canal 04	Desvio padrão canal 05	<b>TOTAL DE 27 VARIÁVEIS</b>

A coleta de dados foi possível graças à interface de comunicação modbus disponível no UFP do equipamento. O processo de aquisição passa por 4 etapas básicas; a configuração da *gateway modbus* TCP – RTU; modificação do UFP para formato de dados em ponto flutuante invertido; conexão da *gateway* ao UFP e aquisição dos dados do medidor.

De início, foi ligado um *notebook* de coleta de dados e a *gateway*. A *gateway* foi configurada para operar em modo RS 485 (02 fios) e a taxa de transmissão foi de 9600 bps. A aquisição de dados é feita através do supervisor *Intouch* usando o *driver modbus* TCP (MBENET). Munido de um *script* (arranjo) montado no supervisor, os dados do UFP são armazenados em um arquivo Excel em tempo real. A conexão da interface *modbus* utiliza os 02 fios da linha RS 485 para conexão ao IO-RACK do medidor ultrasônico. A Figura 15 mostra como foi efetuada a ligação.

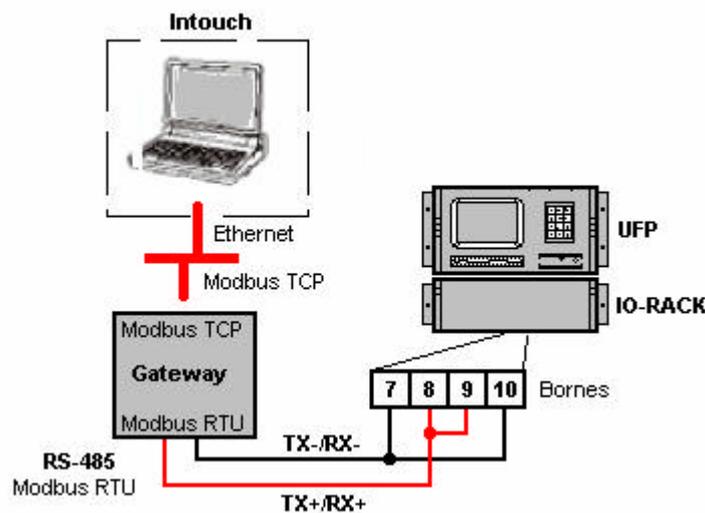


Figura 15 – Esquemático da ligação de automação para aquisição de dados.

Em tempo, todas as designações técnicas dos termos de automação usados nesse capítulo podem ser melhor compreendidos no Apêndice C desse trabalho.

## 4.2

### Teste em Loop usando Fluido Água: Metodologia.

O medidor ASV de propriedade da Petrobras foi instalado no sistema de calibração do Laboratório de fluido água, sendo esse acreditado pelo INMETRO e pertencente à rede brasileira de calibração (RBC) para atuar na área de vazão.

O padrão primário de referência nesse caso é um tanque provador gravimétrico com divisor, operando a pressão atmosférica. O medidor ultrassônico foi instalado à jusante de um trecho reto com 15 diâmetros nominais (DN) em relação ao medidor com DN=200 mm. A montante do medidor encontrava-se um retificador de fluxo instalado a uma distância de 2000 mm. A Figura 16 apresenta a disposição do arranjo mencionado.



**Figura 16 – Medidor ASV inserido no circuito de calibração água.**

A Figura 17 apresenta o arranjo de automação responsável pela aquisição de dados, conforme descrito sucintamente no item 4.1 desse trabalho.



**Figura 17 – Arranjo de automação para aquisição de dados.**

Observa-se para esse sistema que o fluido água armazenado em tanque (capacidade de 200.000 litros) é bombeado para atender o sistema e após passar pelo medidor US segue para o tanque balança (capacidade de 60 toneladas), através da junção do divisor que tem como função direcionar o fluido do tanque

reservatório para o tanque provador, após a estabilização da vazão (como mostrado na Figura 18). Portanto inicia-se a corrida de calibração fazendo o fluido escoar num sistema fechado, visando obter um regime de escoamento permanente, somente após atingindo esse patamar o divisor é acionado. A massa do fluido é então mensurada pela indicação da balança digital (capacidade de 60 toneladas), como tem-se a densidade da água do sistema (0,9975 kg/l) pode-se determinar o volume do fluido no tanque. As pressões e temperaturas do sistema são monitoradas para que sejam feitas as devidas correções dos volumes totalizados.

O volume totalizado no medidor pode ser obtido através da totalização de pulsos no momento em que é acionado o divisor até o final da corrida. Foram realizadas 3 corridas para cada vazão de 150, 250, 350, 450, 500 e 550 m<sup>3</sup>/h. Os dados levantados permitem determinar o erro relativo, bem como a repetitividade do ensaio e ainda fornecer insumos para determinação do diagnóstico desse medidor.

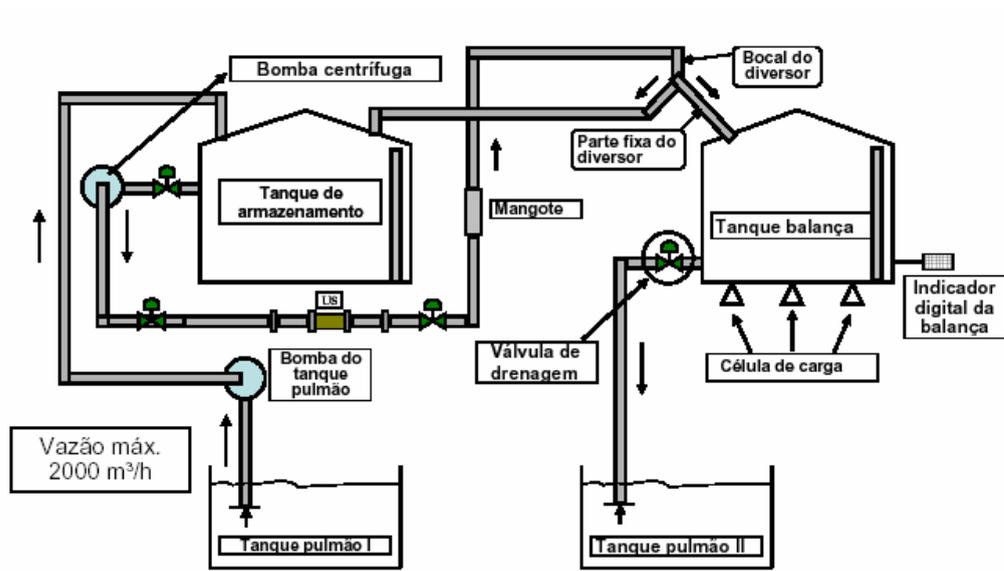


Figura 18 – Esquemático do sistema de calibração – Laboratório fluido água.

### 4.3

#### Resultados da Calibração usando Circuito Água.

Os resultados da calibração do medidor em estudo contra o padrão tanque podem ser observados na Tabela 3, nela encontra-se a massa de água equivalente e o número de pulsos indicado pelo medidor, bem como a conversão dos resultados em unidade de volume (litros). Observa-se ainda que, conforme já informado a densidade da água é de 0,9975 kg/l e a relação de pulsos do Altosonic V é de 4,2857 pulsos por litro.

**Tabela 3: Resultados da Calibração do Medidor Altosonic V – Circuito Água**

Vazão m <sup>3</sup> /h	Massa na Balança (kg)	Volume na Balança litros	A SV Contador puls	A SV Total litros
540	15225	15263,2	65446	15270,7
540	15210	15248,1	65403	15260,7
540	15245	15283,2	65555	15296,2
498	15210	15248,1	65402	15260,5
499	15190	15228,1	65321	15241,6
499	15160	15198,0	65184	15209,6
452	15130	15167,9	65067	15182,3
452	15160	15198,0	65199	15213,1
452	15180	15218,0	65292	15234,8
351	15135	15172,9	65074	15183,9
351	15130	15167,9	65051	15178,6
351	15150	15188,0	65121	15194,9
252	15065	15102,8	64733	15104,4
252	15110	15147,9	64942	15153,1
252	15090	15127,8	64851	15131,9
150	15055	15092,7	64654	15085,9
150	15055	15092,7	64665	15088,5
150	15055	15092,7	64666	15088,7

As Figuras 19 e 20 a seguir apresentam as curvas de desvios e da repetitividade da calibração, respectivamente.

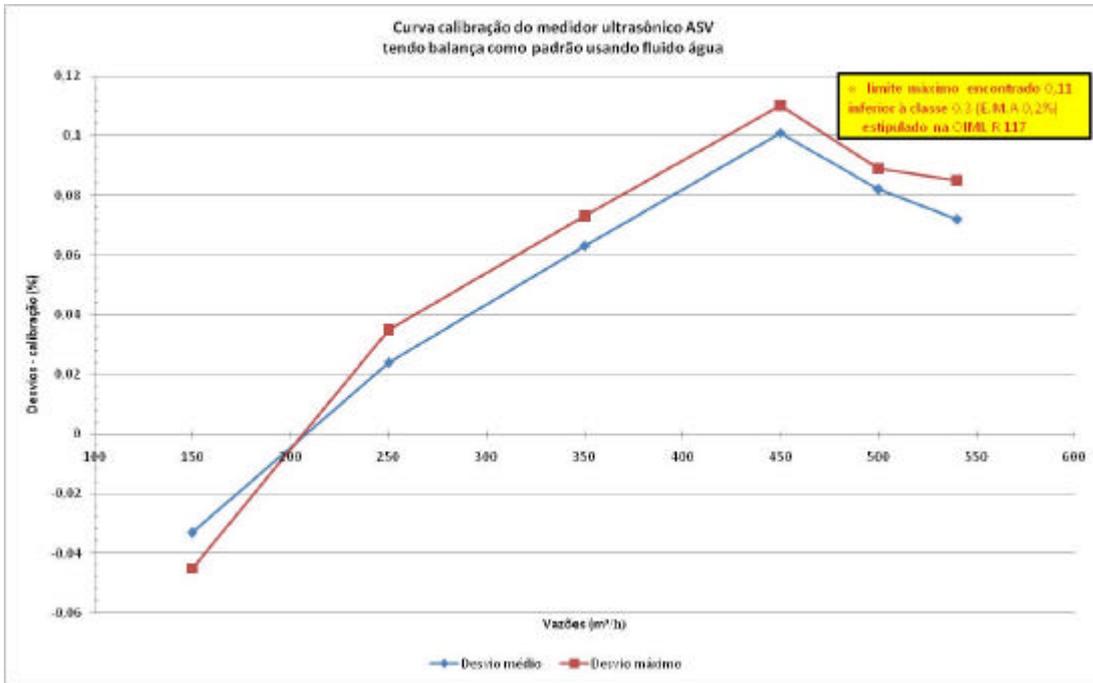


Figura 19 – Desvios encontrados na calibração do ASV – laboratório fluido água

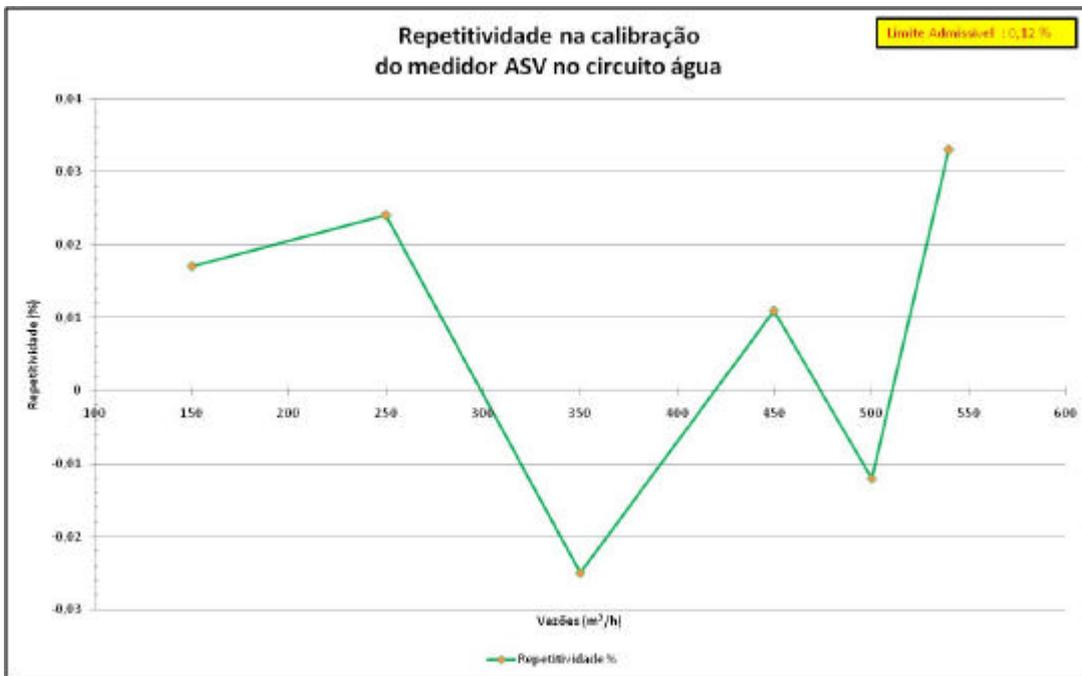


Figura 20 – Repetitividade encontrada na calibração do ASV – laboratório fluido água

#### 4.4 Diagnóstico do Medidor para o Circuito Água

Após o processo de calibração do medidor e da coleta de dados para estudo, inicia-se o processo de avaliação do diagnóstico do mesmo, conforme preceitos estabelecidos no item 2.6 desse trabalho. Todavia cabe lembrar que o objetivo aqui é acompanhar a evolução temporal de índices (deriva) que identifiquem a qualidade da medição realizada.

Os dados aqui verificados foram frutos da disposição do medidor no sistema de calibração com água no dia 19/04/2007; o trabalho de coleta de dados iniciou-se às 14:00 hs terminando às 17:23 hs. Foram coletados um total de 11.661 linhas de dados, dispostos numa planilha Excel, tomados a cada 1 segundo para as vazões de 550, 500, 450, 350, 250 e 150 m<sup>3</sup>/h.

A metodologia utilizada foi de representar, em Excel, os gráficos de tempo x parâmetros do diagnóstico (simetria, escoamento cruzado e turbilhonamento) para cada vazão ensaiada, contendo seus valores médios e desvios observados. Também foram confeccionados os gráficos dos parâmetros *Swirl* e Velocidade do Som.

Uma importante hipótese teve que ser adotada nesse procedimento, haja visto que foi constatado que o medidor não dispõe das velocidades axiais diretamente para coleta, mas sim a vazão por canal ultrasônico. Portanto, usando a equação 5 desse trabalho, tendo a área como constante, pode-se dizer que a vazão é proporcionalmente direta à velocidade axial e portanto ser utilizada para cálculos dos parâmetros desejados. Em tempo, quando verificados os valores de vazão por canal, observa-se que esses são muitos próximos e que não são representativos da vazão ensaiada.

Em contato com os projetistas e responsáveis pelo desenvolvimento do produto do fabricante alemão, os mesmos reportaram que no medidor incide um fator de correção para cada canal e é característica de cada equipamento, que mesmo que o equipamento fosse rastreado desde sua compra esses parâmetros não poderiam ser fornecidos e que os próximos modelos a entrar no mercado daqui a 2 anos já teriam a coleta direta da velocidade axial por canal.

Como esses parâmetros são inerentes do equipamento e não de processo ou laboratório, os valores encontrados podem refletir uma incerteza maior, ou à

princípio numa abordagem errônea, porém no estudo do comportamento da qualidade dos diagnósticos esses erros deverão ser absorvidos, esperando se assim que não causem impacto nas conclusões finais. E ainda, os valores de diagnósticos para o efeito *swirl* e velocidade do som não sofrem nenhuma interferência pois suas origem de dados são diretas.

Um exemplo da disposição dessa massa de dados pode ser verificada no anexo desse trabalho, com todos os parâmetros coletados. Todavia a íntegra da massa de dados não consta no corpo desse trabalho devido a inviabilidade de disposição do arquivo completo.

#### 4.4.1 Apresentação do diagnóstico circuito água

Os valores calculados para simetria, escoamento cruzado e turbilhonamento estão dispostos no gráfico da Figura 21. Para a vazão de 550 m<sup>3</sup>/h houve a fragmentação de coleta em 5 intervalos distintos para as 3 rodadas efetuadas, gerando assim 5 gráficos para a sua representação.

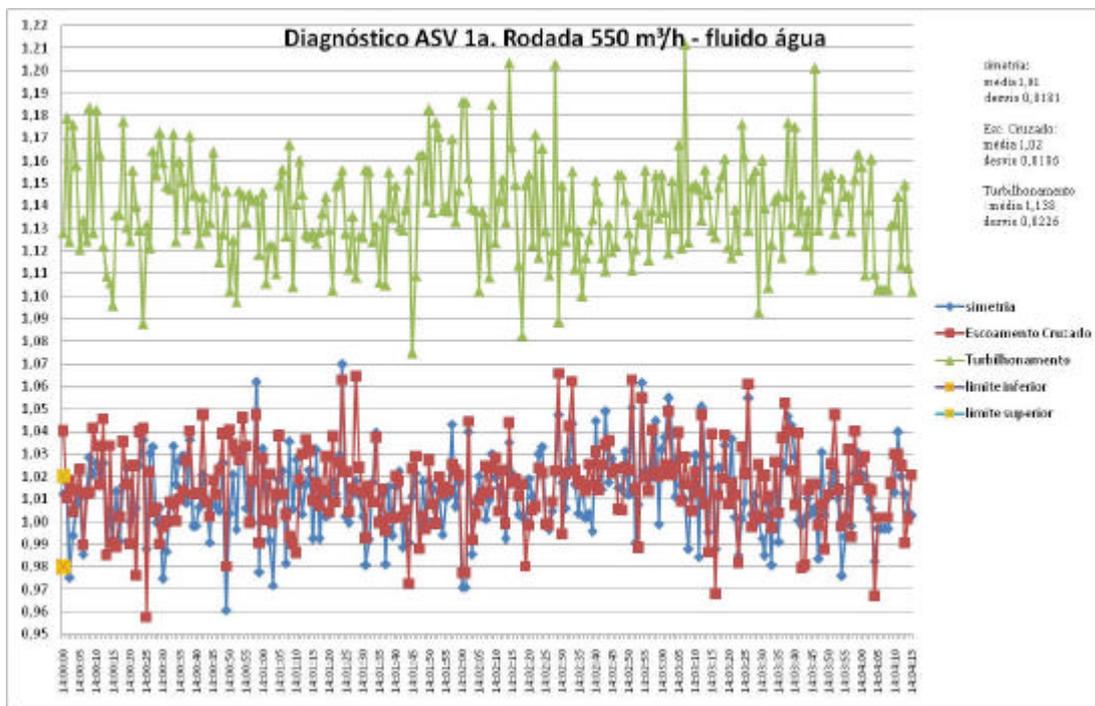


Figura 21 – Diagnóstico ASV – 550 m<sup>3</sup>/h - fluido água.

Para as outras vazões as 3 rodadas efetuadas foram aglutinadas para compor um único gráfico, conforme exemplificado na Figura 22, para a vazão de 150 m<sup>3</sup>/h. Os demais gráficos estão dispostos no anexo desse relatório. Os resumos com os principais insumos aferidos estão dispostos na Tabela 4 na seqüência.

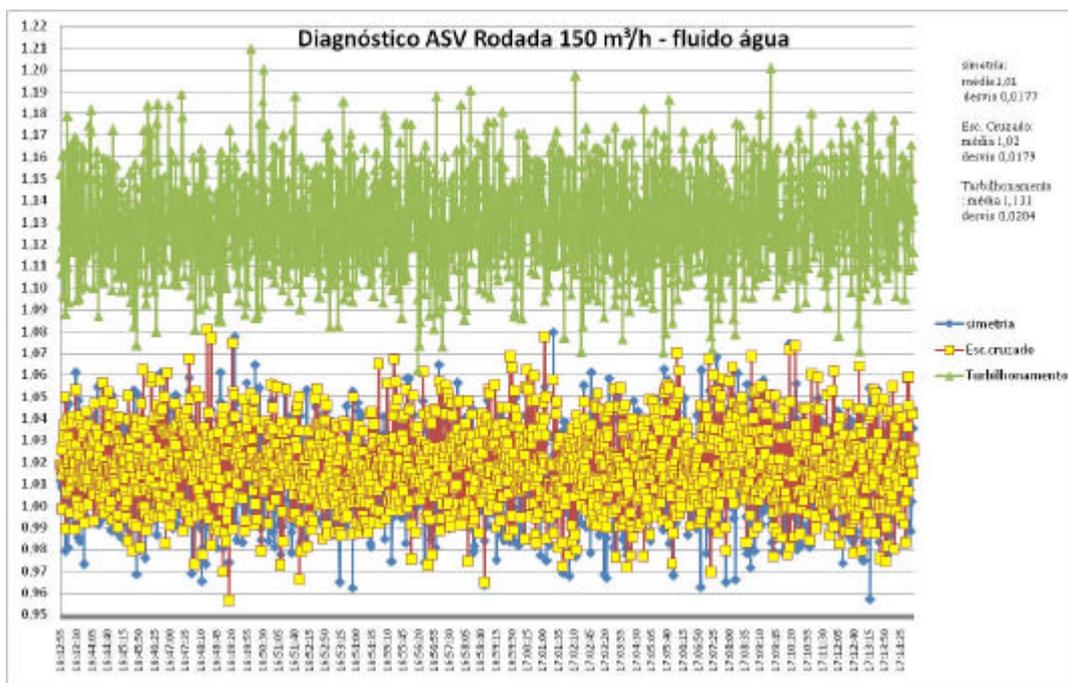


Figura 22 – Diagnóstico ASV – 150 m<sup>3</sup>/h - fluído água.

Tabela 4: Resultados do Diagnóstico ASV – Circuito Água

Vazão m <sup>3</sup> /h	Rodada ordem	Intervalo hh:mm:ss	Amostras unidade	Simetria		Escoamento cruzado		Turbilhonamento	
				média	desvio p.	média	desvio p.	média	desvio p.
550	1ª	14:00:00 - 14:04:15	256	1,01	0,01805	1,02	0,01868	1,138	0,02262
550	2ª	14:04:43 - 14:05:46	64	1,01	0,01999	1,01	0,01565	1,127	0,02255
550	3ª	14:10:43 - 14:12:59	137	1,01	0,01857	1,01	0,01817	1,14	0,02348
550	4ª	14:15:23 - 14:27:50	748	1,01	0,01836	1,01	0,0187	1,139	0,0212
550	5ª	14:28:15 - 14:31:28	194	1,01	0,01813	1,01	0,0186	1,137	0,0246
500	única	14:46:34 - 15:09:03	1350	1,01	0,0181	1,01	0,01803	1,137	0,02235
450	única	15:14:03 - 15:37:05	1383	1,01	0,01911	1,02	0,01878	1,136	0,02154
350	única	15:39:19 - 16:08:08	1730	1,01	0,01957	1,02	0,01998	1,137	0,0237
250	única	16:09:50 - 16:37:21	1652	1,01	0,02045	1,02	0,02054	1,135	0,02408
150	única	16:42:55 - 17:14:56	1922	1,01	0,01771	1,02	0,01787	1,131	0,02039
		soma/média	9436	1,01	0,0188	1,015	0,0185	1,1357	0,2265
									Dados coletados em 19/04/07

Para os outros parâmetros do diagnóstico a serem avaliados dispõem-se dos gráficos das Figuras 23 e 24, referentes ao efeito *swirl* e velocidade do som. Pode-se observar que os resultados obtidos estão bem inferiores ao valor limite de 0,25 admissível para esse parâmetros do diagnóstico.

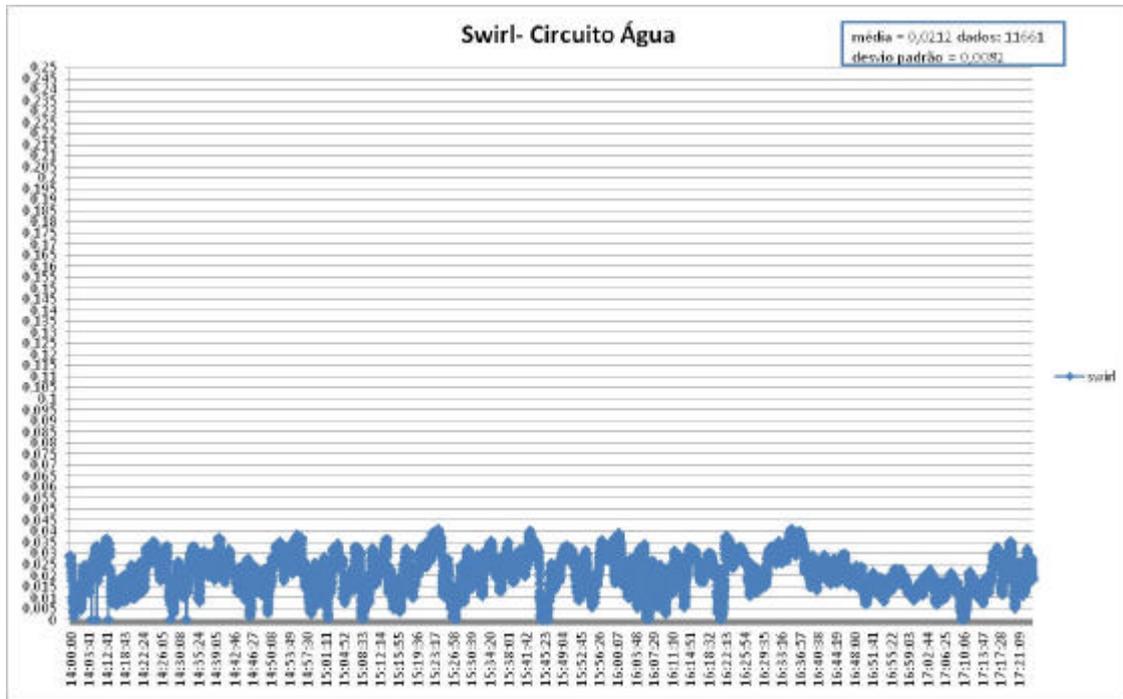


Figura 23 – Diagnóstico Efeito Swirl - fluido água.

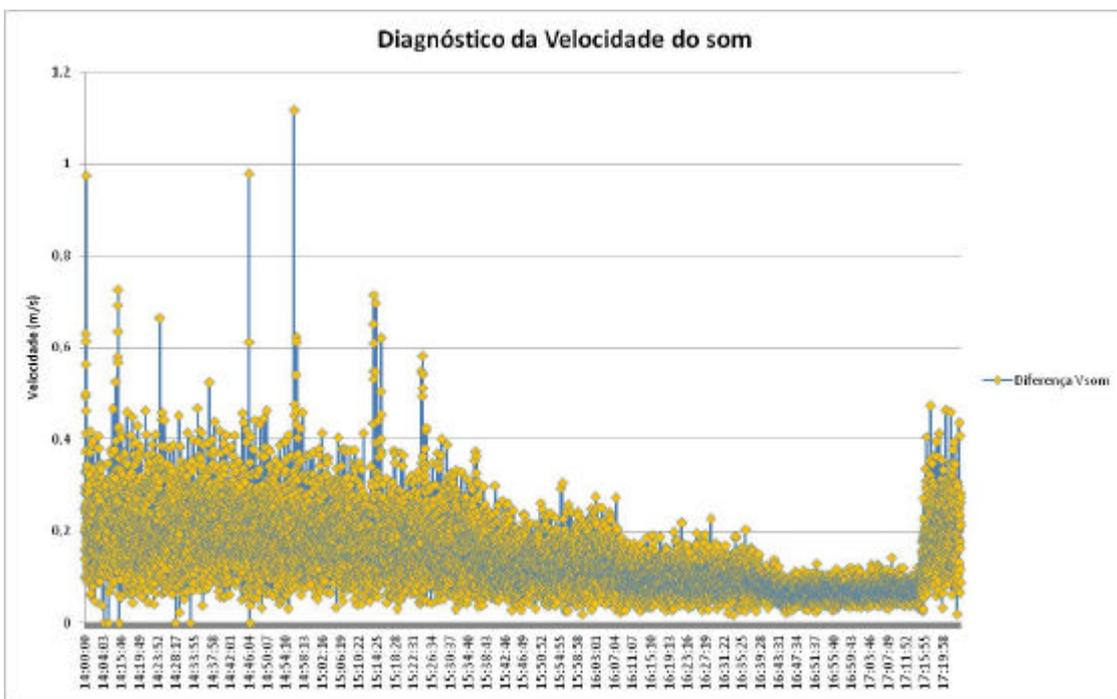


Figura 24 – Diagnóstico Velocidade do Som - fluido água.

Para obtenção do diagnóstico da velocidade foi considerada a diferença entre o maior e o menor valor coletado da velocidade do som, independente do canal à que a variável se referia. Um único valor ficou acima do limite admissível para uma base de amostra de 11.661 dados, podendo ser desconsiderado.

## 4.5

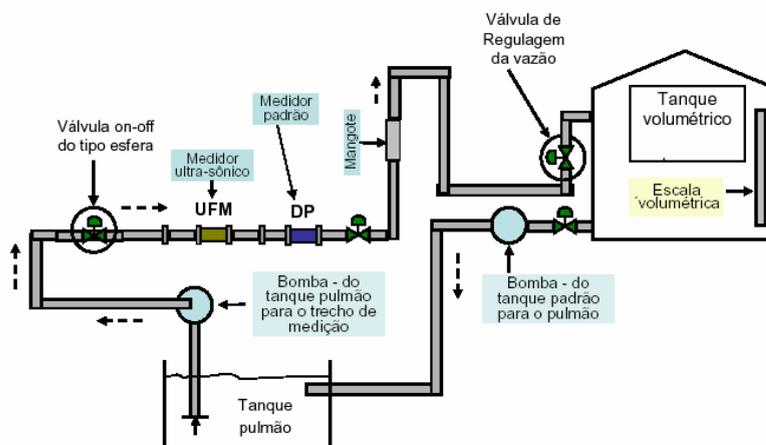
### Teste em Loop usando Fluido Óleo Mineral: Metodologia

O seguinte passo na aquisição de dados foi em laboratório que utiliza óleo mineral como fluido de trabalho, óleo esse denominado Spindura 10 (fabricante Castrol) que a uma temperatura de 25 °C apresenta 15,661 cSt de viscosidade.

Esse laboratório é acreditado junto ao INMETRO e pertence à RBC para calibração de medidores de vazão, detém a mesma característica do anterior sendo o seu padrão primário de tanque aberto, ou seja operando a pressão atmosférica.

O circuito da Figura 25 mostra a disposição de um tanque provador volumétrico (capacidade de 6000 litros) como padrão primário de referência acompanhado de um medidor padrão deslocamento positivo que também pode ser usado como parâmetro de comparação junto ao medidor em análise.

Pode-se observar que a bomba fornece energia cinética para que o óleo mineral possa percorrer o circuito, após a abertura manual da válvula esfera o fluido segue pelo medidor ASV e posteriormente pelo medidor deslocamento positivo para em seguida ir rumo ao tanque provador. Através de uma escala no junto ao corpo do tanque é possível determinar o volume de fluido em seu interior.



**Figura 25 – Esquemático do sistema de calibração – Laboratório fluido óleo mineral.**

As pressões e temperaturas do sistema são monitoradas para que sejam feitas as devidas correções dos volumes totalizados. O volume totalizado no medidor pode ser obtido através da totalização de pulsos no momento em que é acionada a válvula esfera até o final da corrida (limitada à capacidade volumétrica do tanque) multiplicado pelo seu fator  $k$ .

Foram realizadas 3 corridas para cada vazão de 150, 250, 350, 450, 500 e 550 m<sup>3</sup>/h. Os dados levantados permitem determinar o erro relativo, bem como a repetitividade do ensaio e ainda fornecer insumos para determinação do diagnóstico desse medidor.

A Figura 26 (a,b e c) traz a instalação para esse circuito.



**Figura 26 – a) Medidor ASV inserido no circuito de calibração óleo mineral.**

**b) Esquemático de automação para aquisição de dados.**

**c) Medidor ASV, medidor deslocamento positivo e tanque provador.**

#### 4.6 Resultados da Calibração usando Circuito Óleo Mineral.

Os resultados da calibração do medidor em estudo contra o padrão tanque podem ser observados na Tabela 5, nela encontra-se o volume do tanque em litros e o número de pulsos indicado pelo medidor ultrasônico, bem como a conversão dos resultados em unidade de volume (litros).

**Tabela 5: Resultados da Calibração do Medidor Altosonic V – Circuito Óleo**

Vazão m <sup>3</sup> /h	Volume TQ litros	Pulsos ASV	Volume ASV k do ASV (litros)
			0,23333
550	5968,59	25641	5983
550	6030,68	25937	6052
550	6068,73	26093	6088
500	6028,68	25943	6053
500	6053,71	26071	6083
500	6053,71	26091	6088
450	6003,64	25771	6013
450	6035,69	25951	6055
450	6046,7	25977	6061
350	6036,69	25947	6054
350	5944,56	25559	5964
350	5980,61	25708	5998
250	6011,65	25858	6033
250	5988,62	25742	6006
250	6020,66	25882	6039
150	5993,63	25739	6006
150	6005,64	25794	6019
150	5988,62	25694	5995

As Figuras 27 e 28, apresentam as curvas de desvios e da repetitividade da calibração, respectivamente para o circuito óleo.

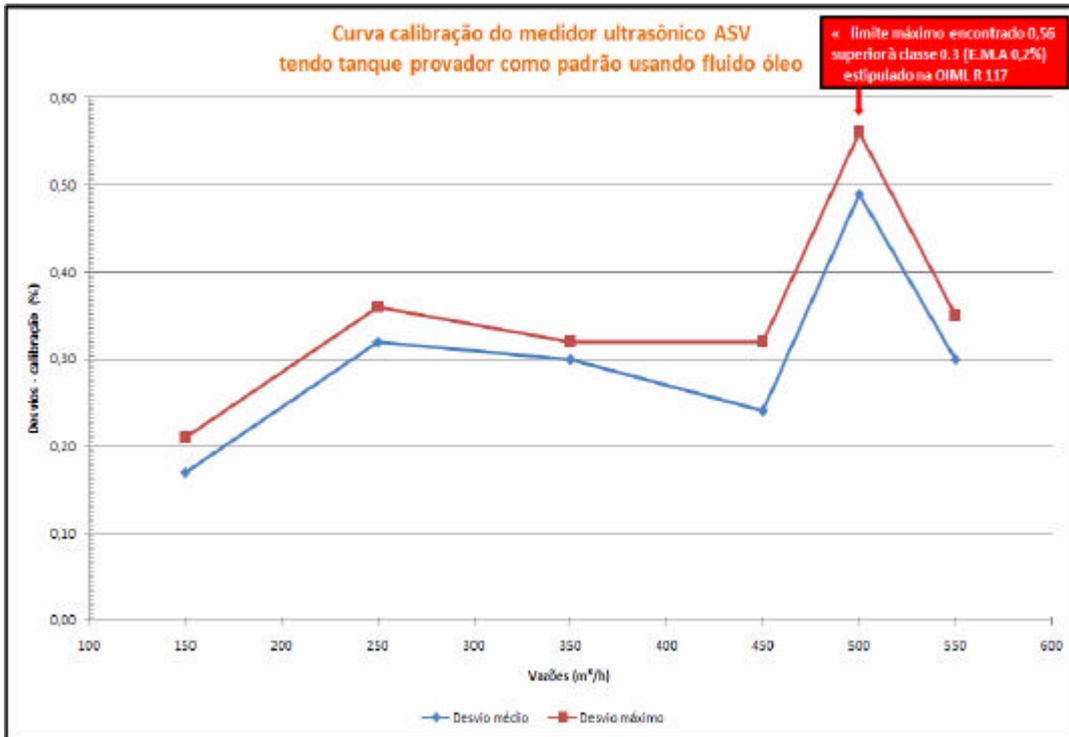


Figura 27 – Desvios encontrados na calibração do ASV – laboratório fluido óleo.

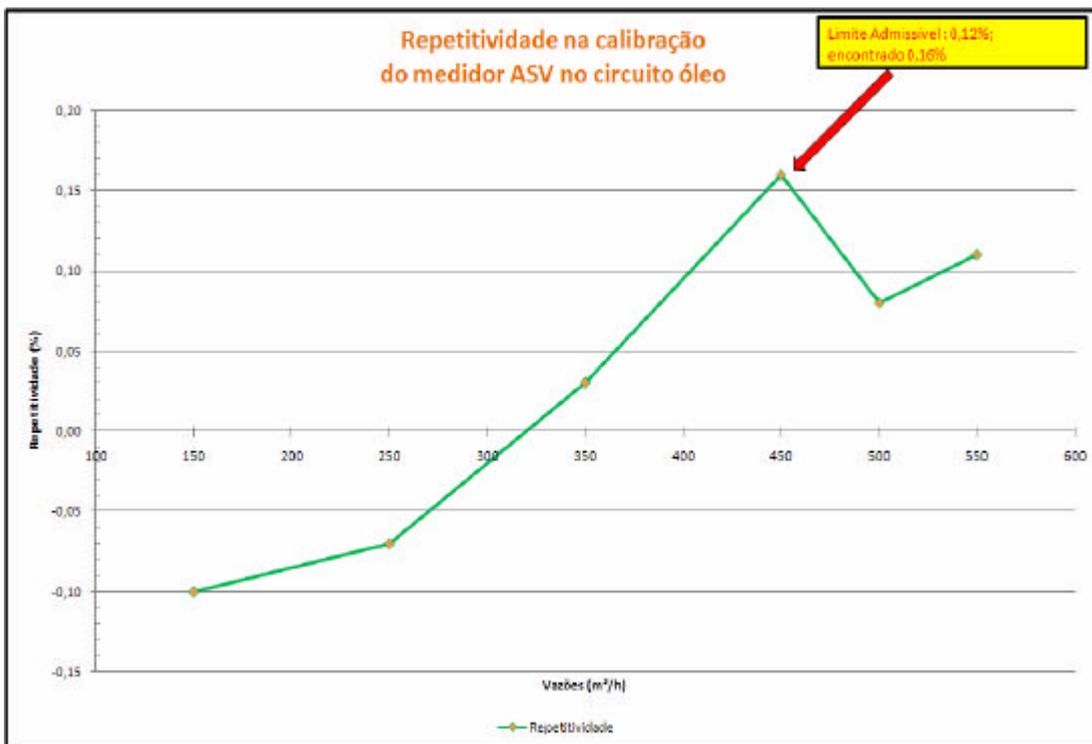


Figura 28 – Repetitividade encontrada na calibração do ASV – laboratório fluido óleo.

## 4.7 Diagnóstico do Medidor para o Circuito Óleo

Analogamente ao processo de calibração do medidor no circuito água, para o processo óleo, findado a etapa de coleta de dados, pôde-se estabelecer um estudo do diagnóstico nesse processo, utilizando-se assim os mesmos preceitos estabelecidos no item 2.6 desse trabalho.

Os dados tomados no circuito óleo foram adquiridos uma semana após o ensaio do circuito água, nos dias 26 e 27 de abril de 2007; o trabalho de coleta de dados iniciou-se às 15:42 hs do primeiro dia e terminando às 16:17 hs do segundo dia. Foram tomados um total de 7254 linhas de dados, dispostos numa planilha Excel, tomados a cada 1 segundo para as vazões de {550, 500, 450 e 350} m<sup>3</sup>/h, equivalente ao processo anterior, todavia para as vazões de 250 m<sup>3</sup>/h e 150 m<sup>3</sup>/h a frequência de coleta foi diminuída para 1 décimo de segundo, para observação da flutuabilidade dos dados.

A metodologia utilizada foi a mesma de representar, em Excel, os gráficos de tempo x parâmetros do diagnóstico (simetria, escoamento cruzado e turbilhonamento) para cada vazão ensaiada, contendo seus valores médios e desvios observados, bem como foram confeccionados os gráficos dos parâmetros Swirl e Velocidade do Som, ou seja, semelhante o que foi feito para o circuito anterior.

A hipótese levantada para o sistema de água também teve que ser adotada nesse procedimento, ou seja, foi constatado que o medidor não dispõe das velocidades axiais diretamente para coleta, mas sim a vazão por canal ultrasônico.

Dessa forma, como a vazão é proporcionalmente direta à velocidade axial pode ser utilizada para cálculos dos parâmetros desejados.

Porém, como verificado anteriormente, ressalta-se que os valores de vazão por canal são muitos próximos e não são representativos da vazão ensaiada.

Uma justificativa válida para esse caso, e que, sendo esses parâmetros inerentes do equipamento e não de processo ou laboratório, os valores encontrados podem refletir uma incerteza maior, contudo no estudo do comportamento da qualidade dos diagnósticos esses erros também deverão ser absorvidos, esperando-se assim não causar impacto nas conclusões finais.

E vale lembrar que, os valores de diagnósticos para o efeito swirl e velocidade do som não sofrem nenhuma interferência pois suas origem de dados são diretas.

#### 4.7.1 Apresentação do diagnóstico circuito óleo

Os valores calculados para simetria, escoamento cruzado e turbilhonamento estão dispostos no gráfico da Figura 29.

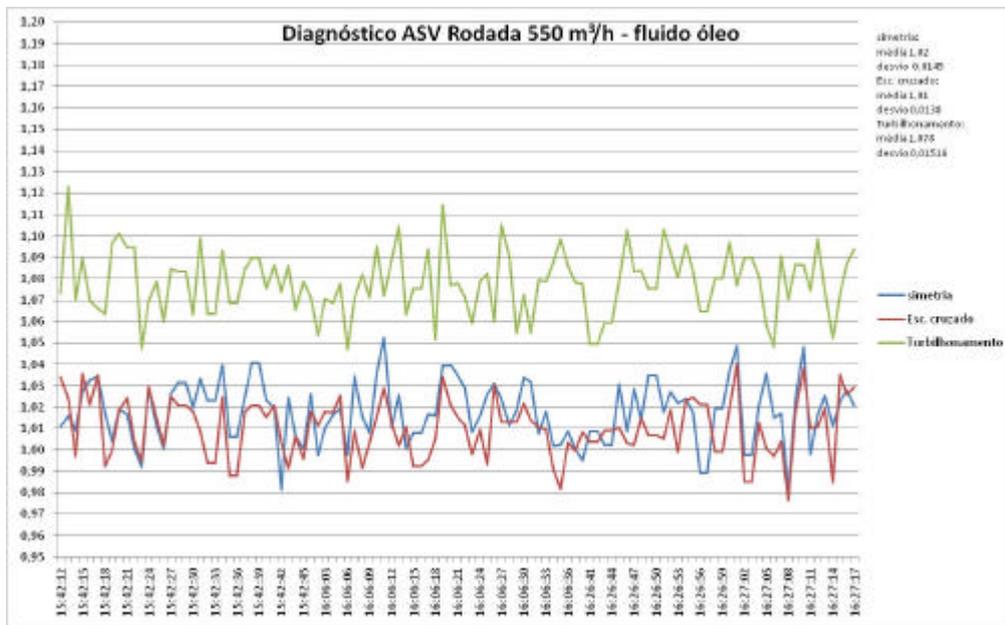


Figura 29 – Diagnóstico ASV – 550 m<sup>3</sup>/h - fluido óleo.

Na Figura 30, encontra-se o gráfico de diagnóstico para vazão de 150 m<sup>3</sup>/h, para as demais vazões os gráficos podem ser encontrados nos anexos desse trabalho. É interessante registrar que comparativamente os valores de turbilhonamento para o sistema de óleo apresentou valores inferiores que para o sistema água.

Os resumos com os principais insumos aferidos estão dispostos na Tabela 6 na seqüência.

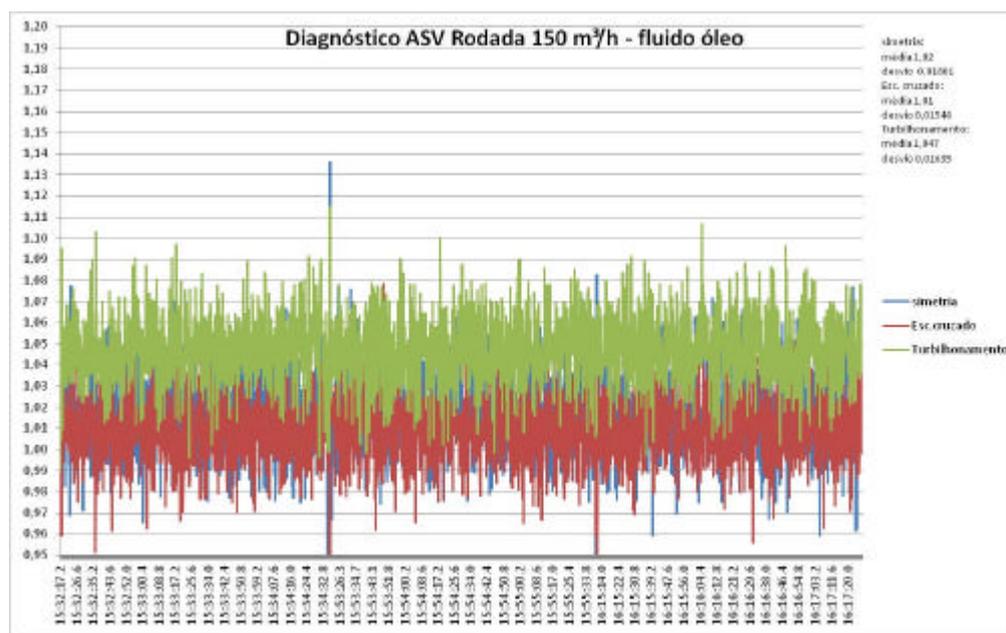


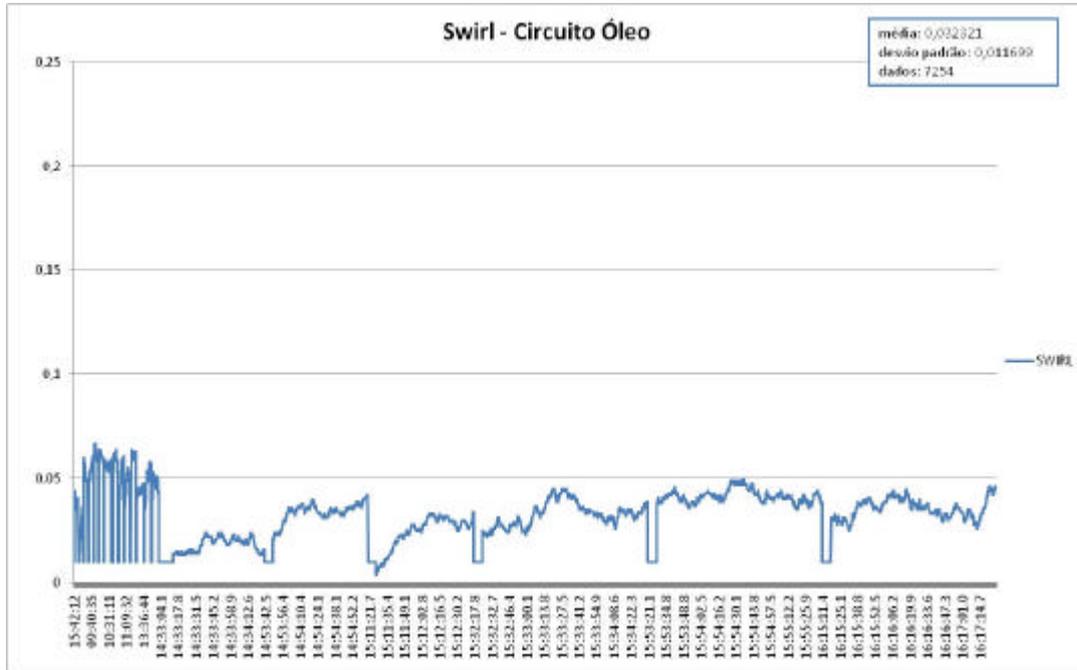
Figura 30 – Diagnóstico ASV – 150 m<sup>3</sup>/h - fluido óleo.

Tabela 6: Resultados do Diagnóstico ASV – Circuito Óleo

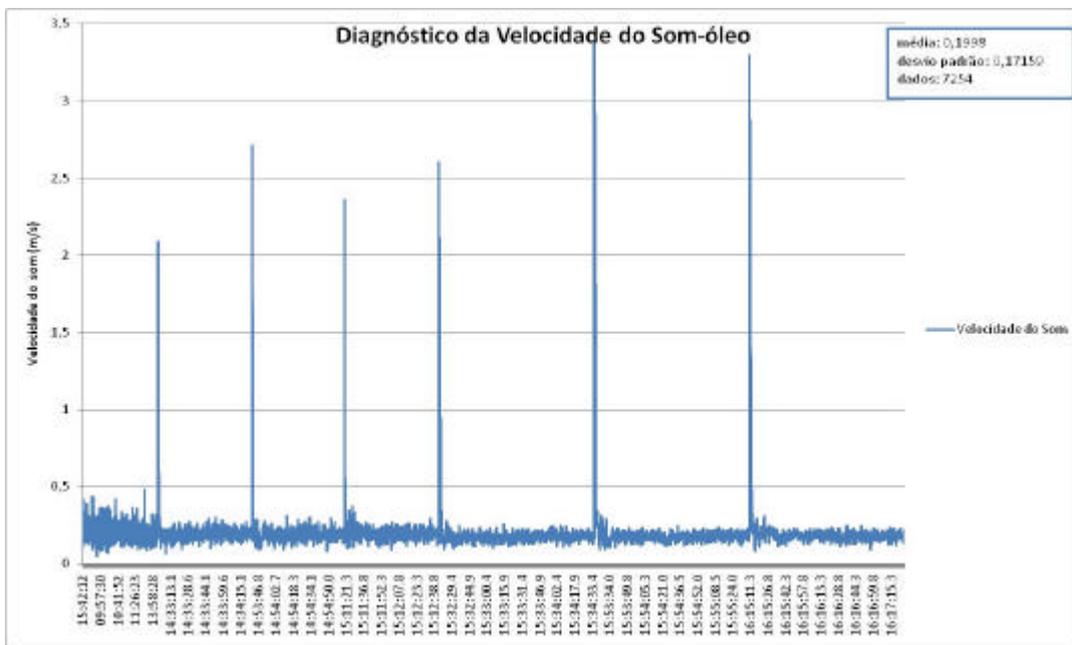
Vazão m <sup>3</sup> /h	Rodada ordem	Intervalo hh:mm:ss	Amostras unidade	Simetria		Escoamento cruzado		Turbilhonamento	
				média	desvio p.	média	desvio p.	média	desvio p.
550	única	15:42:12 - 16:27:17	109	1,01	0,0145	1,01	0,0138	1,078	0,01516
500	única	09:40:07 - 10:15:55	125	1,02	0,01262	1,01	0,01286	1,071	0,01376
450	única	10:51:50 - 11:26:43	138	1,02	0,01426	1,01	0,0134	1,069	0,01362
350	única	11:50:36 - 12:59:13	180	1,02	0,01598	1,01	0,01397	1,057	0,01351
250	única	14:33:02 - 15:12:43	2478	1,02	0,0155	1,01	0,01299	1,044	0,01398
150	única	15:32:17 - 16:17:27	4110	1,02	0,01861	1,01	0,01546	1,047	0,01635
		soma/média	7140	1,0183	0,0152	1,01	0,0137	1,061	0,0144
Dados coletados em 27/04/07									

Outros parâmetros do diagnóstico a serem avaliados estão dispostos nas Figuras 31 e 32, referentes ao efeito swirl e velocidade do som. Pode-se observar que os resultados obtidos estão bem inferiores ao valor limite de 0,25 admissível para esse parâmetro do diagnóstico.

Para obtenção do diagnóstico da velocidade foi considerada a diferença entre o maior e o menor valor coletado da velocidade do som, independente do canal à que a variável se referia.



**Figura 31 – Diagnóstico Efeito Swirl - fluido óleo.**



**Figura 32 – Diagnóstico Velocidade do Som - fluido óleo.**

Pode-se observar que houve um comportamento anômalo “interferência” (valores acima de 1) no que refere-se aos dados coletados da velocidade do som no canal 01 durante a partida para as vazões baixas, ou seja de 250 m<sup>3</sup>/h e 150 m<sup>3</sup>/h.

Uma justificativa plausível para esse efeito consiste no fato do circuito de calibração ser aberto, ou seja, há abertura da válvula de alimentação do circuito e para vazões baixas o fluido não teria condições de preenchimento total da tubulação, ficando o canal mais elevado (canal 1) desprovido de fluido, levando à discrepância na informação da velocidade do som naquele par de transdutores.