

Capítulo 6

Resultados Encontrados

Almeja-se com esse capítulo uma comparação entre os resultados apurados nos processos anteriores, ou seja, as informações coletadas nos laboratórios mencionados e o levantamento de campo. O objetivo é confrontar os parâmetros do diagnóstico, cujo principal papel é a avaliação de desempenho do medidor.

Para tanto, nesse capítulo será abordado o comportamento da vazão, bem como o perfil de velocidades para todos os processos verificados. Mostrar-se-á o desvio e a repetitividade durante a calibração do medidor nos laboratórios pertencentes à RBC, e ainda serão dispostos os valores médios da simetria, escoamento cruzado, turbilhonamento, swirl e diferenças de velocidade do som para os três processos. Finalmente serão reportados às informações acerca da confiabilidade das medições e de sua incerteza.

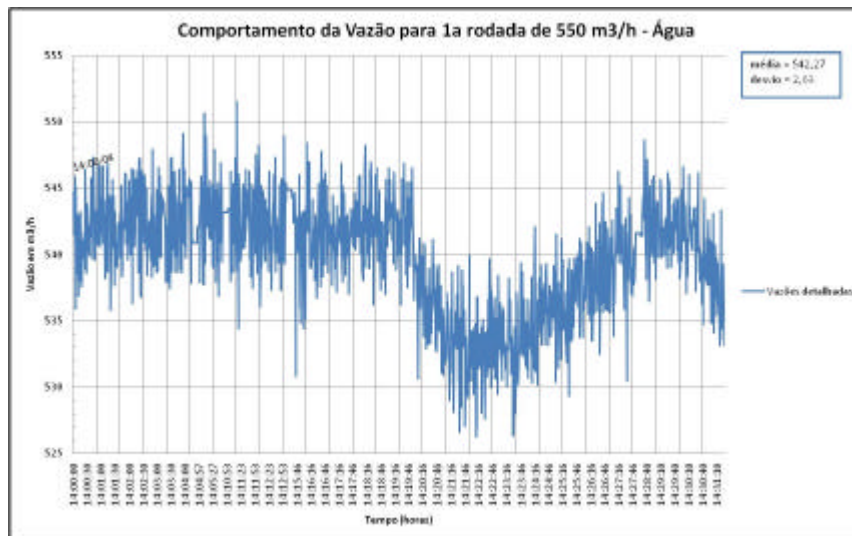
6.1

Comportamento da Vazão e Perfil de Velocidade

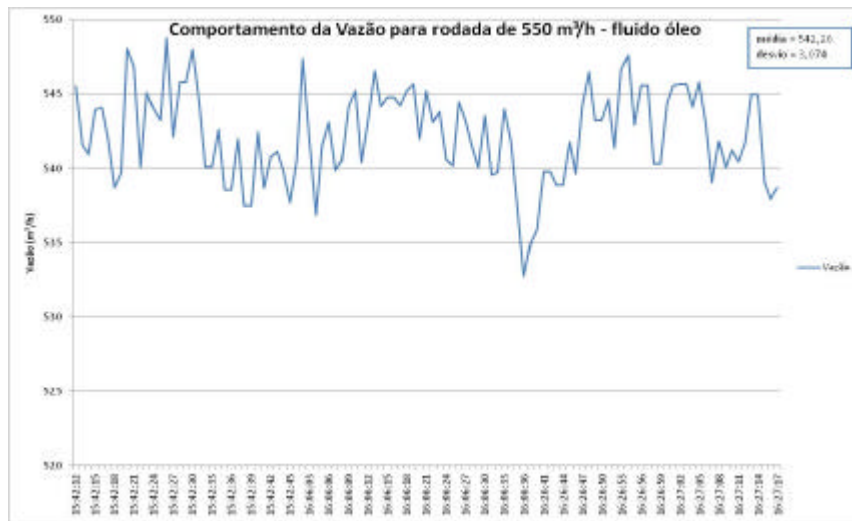
Parte-se do princípio que há três processos distintos no que tange a obtenção das variáveis à uma especificada vazão de trabalho. Nos casos dos laboratórios tem-se os circuitos fechados, sendo que no laboratório água a corrida de calibração tem a sua duração mais ampla que o laboratório óleo e conseqüentemente uma maior coleta de dados, isso devido à grande capacidade do tanque onde está inserida a balança (conforme visto em 4.2) em comparação com o controle de nível do sistema do tanque do laboratório óleo. Como a flutuação da vazão na plataforma é maior do que no laboratório, foi determinado o intervalo mínimo de tempo necessário para que a incerteza do volume medido (integral da vazão) não influencie na aceitação do medidor como fiscal.

Na sequência observam-se os gráficos (Figura 39) onde estão apresentadas as variações das grandezas vazão ao longo do tempo para os três processos em estudo. É possível perceber a facilidade de controle da vazão em laboratório em contraponto às variações abruptas nas condições reais de campo. Observa-se também como foi viável obter um maior número de pontos amostrados para o laboratório água.

a)



b)



c)

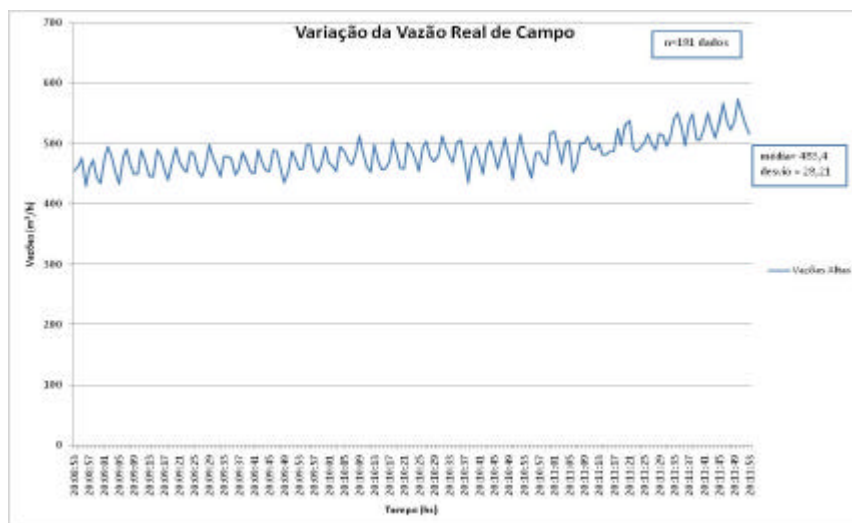


Figura 39 a,b,c – Comportamento das Vazões para água, óleo mineral e campo.

A garantia de um perfil conhecido de escoamento (completamente desenvolvido) permite o relacionamento entre a velocidade medida e a vazão do escoamento. Como na prática existem distorções desse perfil, o uso de vários feixes acústicos pode compensar as discrepâncias, fazendo com que a medição de vazão tenha uma incerteza mais baixa.

As Figuras 40 (a) e (b) mostram o traçado do perfil de velocidades na unidade de processamento (UFP), tendo como aspecto o perfil turbulento conforme esperado. É possível identificar que a variação na diferença das velocidades nos canais 1 e 2 (superiores) comparado as velocidades dos canais 4 e 5 (inferiores) são mais sutis no laboratório água (a) que no campo (b), isso pode ser explicado a facilidade de inclusão de um trecho reto suficientemente grande para eliminar os efeitos indesejáveis do escoamento no perfil de velocidades, como a alta turbulência.



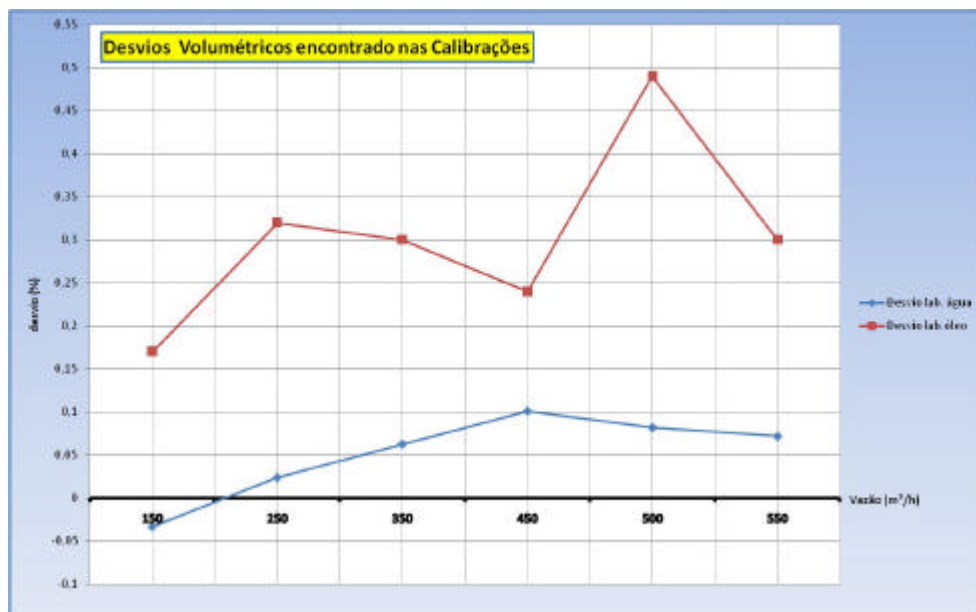
Figura 40 – Traçado na UFP do perfil de velocidades: processos água e campo respectivamente.

6.2

Desvios e Repetitividade durante as Calibrações

É possível estabelecer uma base comparativa dos resultados obtidos em laboratório, durante o processo de calibração do medidor quando comparado aos tanques padrão dispostos em ambos os circuitos, água e óleo mineral, como visto na Figura 41.

a)



b)

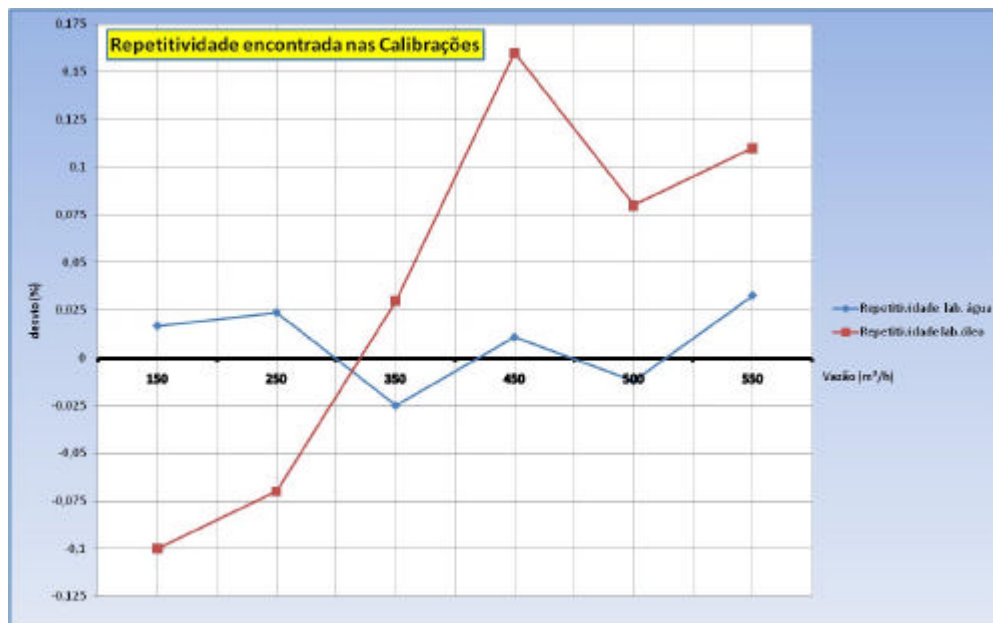


Figura 41 a, b – Comparação nos desvios e repetitividade encontrados durante calibração.

Verifica-se uma melhor performance do medidor no laboratório água. Pôde-se observar que nesse laboratório o processo de estabilização de fluxo é conseguido mais rapidamente, com duração mais prolongada da corrida do circuito, permite minimizar discrepâncias e abranger uma coleta maior de dados.

O sistema automático do início e término do processo é outro ponto importante, pois é feito de forma sincronizada, sem a intervenção do controle de abertura manual como foi verificado no laboratório de óleo mineral.

6.3

Comparação dos Parâmetros do Diagnóstico: Simetria, Escoamento Cruzado e Turbilhonamento

Identificou-se que o medidor ultra-sônico utiliza-se das velocidades em cada canal para determinar a velocidade média e conseqüentemente a vazão do processo. Dessa forma, caso haja uma distorção no perfil de escoamento, as velocidades dos canais serão afetadas e o comprometimento no cálculo de vazão será aparente.

Por essa razão, o estudo de parâmetros do perfil de escoamento torna-se pertinente, garantindo um adequado perfil de velocidades e representatividade das condições reais de fluxo quando em comparação com as condições de laboratório.

A garantia da manutenção sobre a variação do perfil de escoamento trará confiabilidade acerca do processo de comprovação metrológica dos volumes apurados e das incertezas atribuídas.

Para o devido levantamento dos valores, foram considerados os dados coletados de vazão de fluxo (FLOWCH) para cada processo de aquisição, que pode ser conferido nas planilhas dos anexos A, C e E desse trabalho.

Por exemplo, para o circuito água, vazão nominal de 550 m³/h, tem-se para cada canal, as seguintes informações tomadas em 1 segundo: Canal 1: 304,604; Canal 2: 330,5; Canal 3: 321,236; Canal 4: 338,783; Canal 5: 288,353.

Todavia, os valores fornecidos pela UFP do medidor a princípio não parece representar a vazão real, o que comprometeria a determinação da velocidade e aplicação do conceito de diagnóstico para o medidor.

Porém, em contato com o fornecedor europeu do equipamento, o mesmo informou que o valor disposto pelo equipamento é representativo e há atribuição

de uma “certa” parametrização em sua configuração, configuração essa que levaria em conta pontos flutuantes e o fato de que o medidor não apresenta o mesmo diâmetro para cada canal, o mesmo ainda informou haver atribuição de pesos distintos para cada canal, todavia esses pesos não foram disponibilizados.

Sendo assim, mesmo sabendo que os valores não são diretamente velocidades, nem vazões, mas um parâmetro do fabricante que está correlacionado com as variáveis desejadas, proceder-se-á com o trabalho de levantamento dos valores de diagnóstico do perfil de escoamento.

Dessa forma, para cada dado (tomados a cada segundo) foram determinados os valores de simetria, escoamento cruzado e turbilhonamento, para todos os 03 processos.

Como exemplo, para os valores mencionados anteriormente do circuito água, tem-se:

$$\text{Simetria (X1)} = (304,604 + 330,2)/(338,783+288,353) = 1,01222$$

$$\text{Escoamento Cruzado (X2)} = (304,604+338,783)/(330,2+288,353) = 1,0401$$

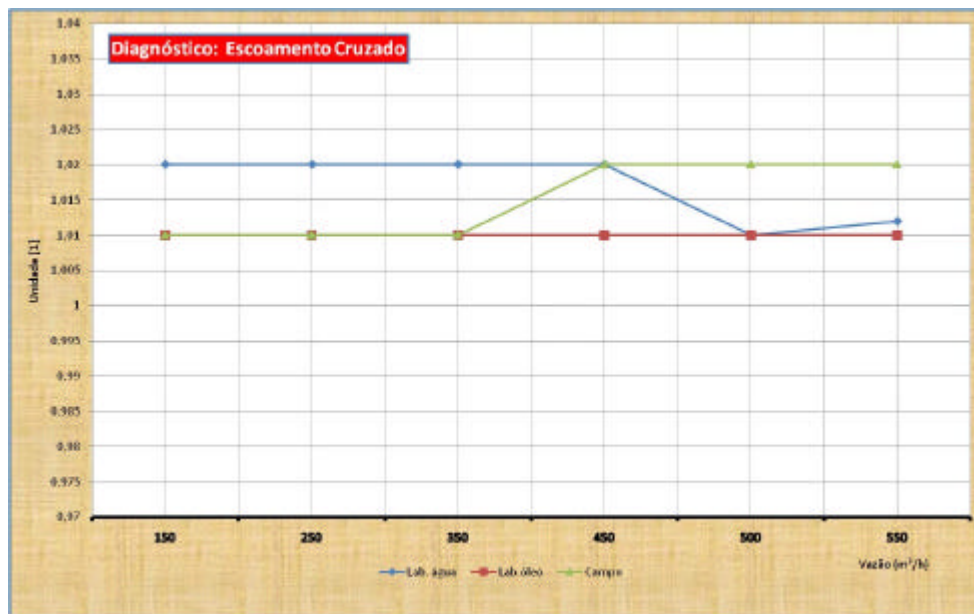
$$\text{Turbilhonamento (X3)} = (330,2+338,783)/(304,604+288,353) = 1,1282$$

Foram registrados valores médios de todos os resultados obtidos para cada diagnóstico, durante todos os segundos do período considerado de análise. Os resultados foram dispostos nos gráficos da Figura 42, para melhor análise.

a)



b)



c)

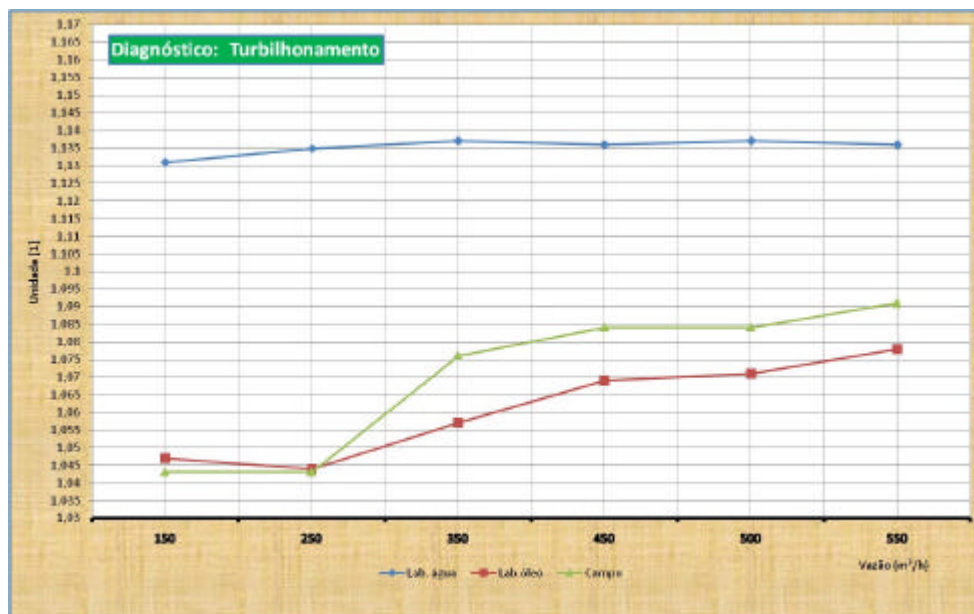


Figura 42 a, b, c – Comparação dos parâmetros do diagnóstico: simetria, escoamento cruzado e turbilhonamento.

Constata-se que os valores médios para os três diagnósticos ficaram dentro do limite de tolerância determinado. Para simetria, observa-se que o campo manteve o perfil do laboratório água na íntegra. Um desvio nessa variável poderia representar problemas no condicionador de fluxo ou mudança no perfil. Para escoamento cruzado, observa-se que o campo conseguiu manter uma constância em relação ao laboratório óleo durante as vazões baixas (até 350 m³/h).

O aumento gradativo do valor para vazões altas pode significar que há incrustações na tubulação de campo que estão interferindo no perfil de escoamento. Para turbilhonamento, houve uma melhor representatividade do campo com o laboratório óleo mineral.

6.4

Comparação do Parâmetro do Diagnóstico: Swirl

A formação dos redemoinhos (swirl, da Figura 6) pode ser um complicador com relação ao perfil de escoamento, necessitando assim, muitas vezes de condicionadores de fluxo de modo a estratificar o perfil de escoamento mantendo condições favoráveis para garantia de uma boa medição. Do gráfico da Figura 43, pode-se observar que todos os três processos apresentam valores médios de formação de swirl inferiores ao limite estipulado pelo fabricante do medidor. Quanto menor o valor de swirl maior a possibilidade de ter-se um perfil adequado para o bom desempenho do medidor.

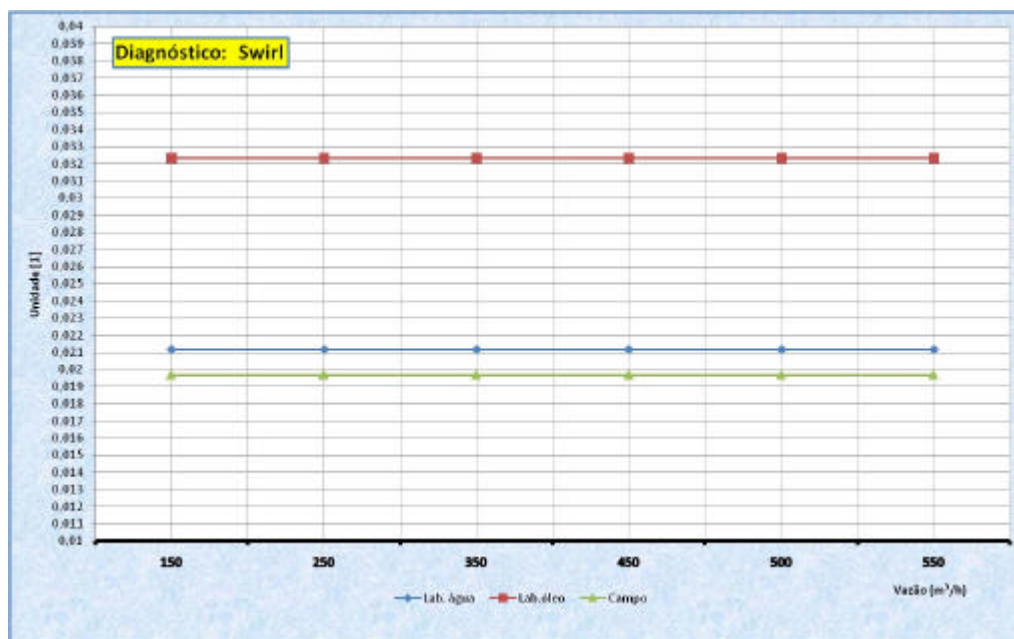


Figura 43 – Comparação do parâmetro do diagnóstico: swirl.

Verifica-se uma melhor condição de perfil entre as condições de campo e laboratório água. Em ambos os casos as condições de instalação são favoráveis com longos trechos retos que permitem uma estabilização aparente do perfil de velocidades. Apesar dos valores dentro da faixa de tolerância, para o laboratório

óleo, observa-se uma formação maior de efeito swirl durante o escoamento, fato esse que pode ser percebido fisicamente pela presença de uma curva ascendente logo a montante do trecho reto que acompanha o medidor, provavelmente o aspecto construtivo responsável pelo aumento de vórtices.

6.5

Comparação do Parâmetro do Diagnóstico: Diferença Velocidade do Som

Os valores de velocidade do som em cada feixe devem ser iguais. Os valores não devem diferir entre si em mais que 1,0 m/s em valor absoluto. Assim sendo, constata-se através da Figura 44, que os valores encontrados ficaram dentro do limite admissível.

Outro ponto que deve ser levado em conta é se há formação da estratificação do escoamento, ocasionado pelas correntes de convecção natural, que ocorre quando há velocidades inferiores à 1 m/s, aumentando-se assim a incerteza de medição. Para os casos em estudo não foi apresentado estratificação do escoamento.

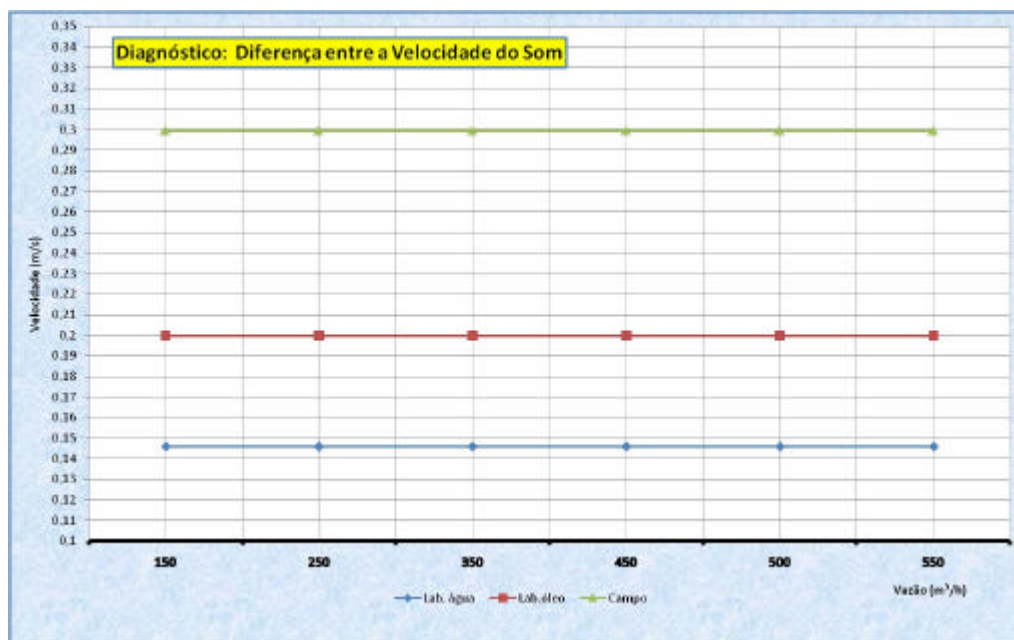


Figura 44 – Comparação do parâmetro do diagnóstico: V_{som}.

Em tempo, vale registrar a anomalia constatada durante as coletas do circuito com óleo mineral, a diferença entre as velocidades do som para o canal 1 e qualquer outro canal apresentaram valores acima de 1 m/s para o início de cada

corrida das vazões baixas; 150 m³/h e 250 m³/h. Esse fato teve sua origem provavelmente no manuseio da válvula de abertura do fluxo do sistema.

A Tabela 8 traz um resumo de todos os valores e respectivos desvios encontrados para os parâmetros do diagnóstico ao longo desse trabalho para os três processos.

Tabela 8: Resumo dos Parâmetros de Diagnóstico do ASV.

Localização	Vazão (m ³ /h)	150	250	350	450	500	550
Água	Desvio	-0,033	0,024	0,063	0,101	0,082	0,072
Óleo	Desvio	0,17	0,32	0,3	0,24	0,49	0,3
Água	Repetitividade	0,017	0,024	-0,025	0,011	-0,012	0,033
Óleo	Repetitividade	-0,1	-0,07	0,03	0,16	0,08	0,11
Água	Simetria	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
	Desvio Simetria	0,01771	0,02045	0,01957	0,01911	0,0181	0,01862
Óleo	Simetria	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01
	Desvio Simetria	0,01861	0,0155	0,01598	0,01426	0,01262	0,0145
	Simetria	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Campo	Desvio Simetria	0,018524	0,018524	0,01364	0,009936	0,009936	0,013096
Água	Escoam. Cruz.	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,012
	Desv. Esc.Cruz.	0,01787	0,02054	0,01998	0,01878	0,01803	0,01796
Óleo	Escoam. Cruz.	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
	Desv. Esc.Cruz.	0,01546	0,01299	0,01397	0,0134	0,01286	0,0138
	Escoam. Cruz.	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02
Campo	Desv. Esc.Cruz.	0,01478	0,01478	0,012408	0,009845	0,009845	0,013499
Água	Turbilhonamento	1,131	1,135	1,137	1,136	1,137	1,136
	Desv. Turbilhon.	0,02039	0,02408	0,0237	0,02154	0,02235	0,02289
Óleo	Turbilhonamento	1,047	1,044	1,057	1,069	1,071	1,078
	Desv. Turbilhon.	0,01635	0,01398	0,01351	0,01362	0,01376	0,01516
	Turbilhonamento	1,043	1,043	1,076	1,084	1,084	1,091
Campo	Desv. Turbilhon.	0,017466	0,017466	0,01417	0,014481	0,014481	0,013107
Água	Swirl	0,02119	0,02119	0,02119	0,02119	0,02119	0,02119
	Desv. Swirl	0,008197	0,008197	0,008197	0,008197	0,008197	0,008197
Óleo	Swirl	0,03232	0,03232	0,03232	0,03232	0,03232	0,03232
	Desv. Swirl	0,011699	0,011699	0,011699	0,011699	0,011699	0,011699
	Swirl	0,01967	0,01967	0,01967	0,01967	0,01967	0,01967
Campo	Desv. Swirl	0,002521	0,002521	0,002521	0,002521	0,002521	0,002521
Água	Vsom	0,1459	0,1459	0,1459	0,1459	0,1459	0,1459
	Desv. Vsom	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082
Óleo	Vsom	0,19978	0,19978	0,19978	0,19978	0,19978	0,19978
	Desv. Vsom	0,17159	0,17159	0,17159	0,17159	0,17159	0,17159
	Vsom	0,299251	0,299251	0,299251	0,299251	0,299251	0,299251
Campo	Desv. Vsom	0,060351	0,060351	0,060351	0,060351	0,060351	0,060351

6.6

Confiabilidade das Medições e Incerteza Calculada

Nessa etapa, será focada a determinação da incerteza dos volumes apurados, demonstrando assim, a confiabilidade metrológica para determinação dessa grandeza derivada. Para o seu cálculo deve-se levar em consideração a participação das incertezas das variáveis do instrumento, do processo e do tempo de aquisição. Abaixo, encontra-se todo o desenvolvimento matemático que permitirá obter-se um modelo capaz de quantificar a incertezas relevantes que compõe a incerteza combinada do volume.

Parte-se da equação básica que relaciona volume, vazão e tempo, respectivamente: $V = Q \times t$. Como o processo de coleta de dados envolve um intervalo de tempo onde foram tomados vários pontos de vazão instantânea obtidos a cada segundo, tem-se:

$$V = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n) \times t \quad (13)$$

Aplicando o conceito de incerteza na equação (13), resulta na seguinte equação:

$$u_v^2 = (t \times u_{Q1})^2 + (t \times u_{Q2})^2 + \dots + (t \times u_{Qn})^2 + [(Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n) \times u_t]^2$$

Considerando o número de termos para vazão dentro do intervalo de tempo, tem-se que o somatório das vazões é igual à $n \times \bar{Q}$, assim:

$$u_v^2 = t^2 \times (u_{Q1} + u_{Q2} + \dots + u_{Qn})^2 + [(n \times \bar{Q}) \times u_t]^2$$

Estabelecendo a relação: $(u_{Q1} / Q_1) = r$, retorna-se na equação anterior:

$$u_v^2 = t^2 \times r^2 \times (Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 + \dots + Q_n^2) + [(n \times \bar{Q}) \times u_t]^2$$

Dividindo toda a equação pelo volume ao quadrado, com intuito de termos a equação em termos da incerteza de volume, pode-se encontrar:

$$\left(\frac{u_v}{V}\right)^2 = r^2 \times \left[\frac{Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 + \dots + Q_n^2}{(n \times \bar{Q})^2}\right] + \left(\frac{u_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2$$

Sabendo-se que cada vazão instantânea (Q_i) é a soma de sua vazão média e sua variação ($Q_i = \bar{Q} + dQ_i$), então vem:

$$\left(\frac{u_v}{V}\right)^2 = r^2 \times \left[\frac{(\bar{Q} + dQ_1)^2 + (\bar{Q} + dQ_2)^2 + \dots + (\bar{Q} + dQ_n)^2}{(n \times \bar{Q})^2} \right] + \left(\frac{u_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2$$

Desenvolvendo a soma quadrática das parcelas inseridas por colchetes:

$$\left(\frac{u_v}{V}\right)^2 = r^2 \times \left[\frac{n \times \bar{Q}^2 + \sum_{i=1}^n dQ_i^2 + 2 \times \bar{Q} \times \sum_{i=1}^n dQ_i}{(n \times \bar{Q})^2} \right] + \left(\frac{u_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2$$

Através da equação $Q_i = (\bar{Q} + dQ_i)$, é possível demonstrar que a parcela SdQ_i é nula, portanto:

$$\left(\frac{u_v}{V}\right)^2 = \frac{r^2}{n} \times \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^n dQ_i^2}{(n \times \bar{Q})^2} \right] + \left(\frac{u_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2$$

Inserindo o conceito de desvio padrão (s) na equação acima, pode-se substituir o termo SdQ_i^2 por $(n-1) \times s^2$;

$$\left(\frac{u_v}{V}\right)^2 = \frac{r^2}{n} \times \left[1 + \frac{(n-1) \times s^2}{(n \times \bar{Q})^2} \right] + \left(\frac{u_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2$$

E finalmente chegamos à equação que representa a incerteza de volume:

$$\left(\frac{u_v}{V}\right)^2 = \frac{r^2}{n} \times \left[1 + \left(\frac{n-1}{n}\right) \times \left(\frac{s}{\bar{Q}}\right)^2 \right] + \left(\frac{u_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2 \quad (14)$$

Como a tomada de dados foi tomada a cada segundo ($\Delta t = 1$ s), tem-se que a incerteza de tempo é determinada pela resolução da amostragem, que para o caso em estudo é de 0,01 segundo, dessa forma a parcela referente à incerteza de tempo pode ser considerada desprezível (isso é $\ll 1$). Dessa forma, a equação (14) poderá ser re-escrita para aplicação nesse trabalho, considerando $n \gg 1$ e aplicando raiz quadrada nos termos, como sendo:

$$\left(\frac{u_v}{V}\right) = \frac{r}{\sqrt{n}} \times \left[1 + \left(\frac{s}{\bar{Q}}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Na Equação (15) o termo $(r/v \cdot n)$ representa a incerteza tipo B, atribuída ao medidor, onde r é a resolução do medidor, indicada no catálogo do fabricante. A segunda parcela é a incerteza do processo.

As Tabelas 9, 10 e 11 apresentam os valores de vazões médias, os desvios, os intervalos de tempo da amostra considerada, bem como o número de termos da amostra, para todos os três processos a serem avaliados. Vale ressaltar que a intenção é determinar a incerteza de volume, atribuindo às parcelas de incerteza de instrumento, bem como as inerentes do processo, conforme Equação (15).

Quando a incerteza determinada for inferior à resolução do medidor, deve atribuir a incerteza do volume como sendo a própria resolução.

Tabela 9: Apresentação da Incerteza Processo Água.

Incerteza Calculada para Volume - Circuito Água									
resolução do ASV =	0,0015						t-student =	2	VOLUME
Vazão	Desvio	Tempo	n	Volume	Inc. combinada	Inc. combinada	Inc. Expandida	Inc. Expandida	DESCRIÇÃO
(m³/h)	%	horas	dados	m³	m³	%	m³	%	m³
542,267	0,16451	0,0708	256	38,4104	4,6875E-05	0,0046875	9,375E-05	0,009375	38,41 ±0,0093
542,515	0,34098	0,0175	64	9,49401	9,375E-05	0,009375002	0,0001875	0,018750004	9,49±0,018
542,406	0,23041	0,0378	137	20,491	6,40768E-05	0,006407683	0,000128154	0,012815366	20,49±0,012
538,026	0,16158	0,2075	748	111,64	2,74227E-05	0,002742272	5,48454E-05	0,005484543	111,64±0,0054
540,889	0,20694	0,0536	194	28,9976	5,38469E-05	0,005384687	0,000107694	0,010769373	28,99±0,010
496,952	0,10985	0,3747	1350	186,219	2,04124E-05	0,002041242	4,08248E-05	0,004082483	186,21±0,0040
449,58	0,09942	0,3839	1383	172,589	2,01674E-05	0,002016741	4,03348E-05	0,004033483	172,58±0,0040
348,933	0,06803	0,4803	1730	167,585	1,80318E-05	0,001803176	3,60635E-05	0,003606353	167,58±0,0036
252,385	0,04344	0,4586	1652	115,747	1,84525E-05	0,001845254	3,69051E-05	0,003690509	115,74±0,0036
150,48	0,02207	0,5336	1922	80,2976	1,71074E-05	0,001710742	3,42148E-05	0,003421484	80,29±0,0034

Tabela 10: Apresentação da Incerteza Processo Óleo.

Incerteza Calculada para Volume - Circuito Óleo Mineral									
resolução do ASV =	0,0015						t-student =	2	VOLUME
Vazão	Desvio	Tempo	n	Volume	Inc. combinada	Inc. combinada	Inc. Expandida	Inc. Expandida	DESCRIÇÃO
(m³/h)	%	horas	dados	m³	m³	%	m³	%	m³
542,26694	0,294446	0,02944	109	15,96651	7,1837E-05	0,007183698	0,000143674	0,014367396	15,96±0,014
507,43875	0,37893	0,03389	125	17,19659	6,70821E-05	0,006708206	0,000134164	0,013416412	17,19±0,013
463,29466	0,208736	0,0375	138	16,99855	6,38442E-05	0,006384425	0,000127688	0,012768849	16,99±0,012
349,36701	0,199434	0,0492	180	17,18886	5,59017E-05	0,005590171	0,000111803	0,011180342	17,18±0,011
257,75305	0,051872	0,06917	2478	17,82801	1,50664E-05	0,001506644	3,01329E-05	0,003013288	17,82±0,0030
156,68591	0,025097	0,115	4110	18,01888	1,16988E-05	0,001169877	2,33975E-05	0,002339755	18,01±0,0023

Tabela 11: Apresentação da Incerteza Processo Campo.

Incerteza Calculada para Volume - Campo Óleo Real									
resolução do ASV =	0,0015						t-student =	2	VOLUME
Vazão	Desvio	Tempo	n	Volume	Inc. combinada	Inc. combinada	Inc. Expandida	Inc. Expandida	DESCRIÇÃO
(m³/h)	%	horas	dados	m³	m³	%	m³	%	m³
636,11	29,193	0,0756	273	48,062	4,54398E-05	0,004543984	9,08797E-05	0,009087969	48,06±0,0090
483,39	28,214	0,05	181	24,17	5,58419E-05	0,005584194	0,000111684	0,011168388	24,16±0,011
412,6091	25,284	0,0742	268	30,602	4,58995E-05	0,004589948	9,1799E-05	0,009179896	30,60±0,0091
217,692	64,43	0,0642	231	13,969	5,14623E-05	0,005146234	0,000102925	0,010292469	13,96±0,010

OBS: a) Volume = Vazão x Tempo;

b) Incerteza combinada = aplicação da equação (15), aonde r é a incerteza expandida obtida no certificado do fabricante, sendo necessário dividir pelo $k = 2$ que é o fator de abrangência. c) Incerteza expandida = Incerteza combinada x t-student, sendo que para uma probabilidade de 95,45%, com graus de liberdade maiores que 100, o valor considerado é 2 (ver anexo B).