

4 RESULTADO E ANÁLISE

4.1 Resultado das calibrações dos sensores de temperatura

Os resultados das calibrações para cada um dos sensores de temperatura serão apresentados em forma de tabelas do Apêndice 5. Estes resultados compreendem os valores de temperatura (°C) dos sensores e do padrão para os pontos de 0, 10, 25, 30 e 40°C. A temperatura ambiente onde foram realizadas as leituras foi de 23°C ±1°C.

4.2 Análise dos resultados da calibração dos sensores de temperatura

A calibração das temperaturas dos sensores, identificados como Sensor de Temperatura da Linha Master e Sensor de Temperatura da Linha Teste foi feita através de um PT100 padrão, fazendo-se uso do procedimento de cálculo das incertezas, abaixo descrito, e dos resultados apresentados nas tabelas do Apêndice 5.

O modelo matemático que leva em conta todas as variáveis presentes no processo de calibração é dado por: (Link, 1997) (Guide, 1993)

$$T_m = T_p + \Delta T_p + \Delta IT_p + \Delta IT_m \quad (39)$$

Onde:

T_m - temperatura indicada no sensor de temperatura sob calibração (mensurando);

T_p - temperatura indicada no sensor de temperatura padrão;

ΔT_p - correção associada ao padrão de temperatura;

ΔIT_p - correção associada ao indicador de temperatura do padrão;

ΔIT_m - correção associada ao indicador de temperatura do mensurando;

- A incerteza associada ao erro experimental $\sigma(T_m)$ é o desvio padrão amostral das leituras efetuadas com o indicador de temperatura;
- A incerteza associada ao erro experimental $\sigma(T_p)$ é o desvio padrão amostral das leituras efetuadas com o indicador de temperatura padrão;
- A incerteza associada à correção do padrão é dada por:
- $\sigma(\Delta T_p) = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$ (dado fornecido no certificado de calibração)
- A incerteza associada ao indicador de temperatura do padrão é dada por:
- $\sigma(\Delta T_p) = 0,056 \text{ } ^\circ\text{C}$ (dado fornecido no certificado de calibração)
- A incerteza associada ao indicador de temperatura do mensurando é dada por:
- $\sigma(\Delta T_m) = 0,005 \text{ } ^\circ\text{C}$ (dado analisado pela resolução)

A distribuição de probabilidade retangular é sugerida no GUM (ISO, 1998) e em Link (1997), onde em casos em que não se tem conhecimento específico sobre a distribuição de probabilidade da variável aleatória, assume-se que todos os valores são equiprováveis dentro do intervalo de confiança. O grau de liberdade neste caso é infinito, pois a variável aleatória pode estar em qualquer ponto do intervalo.

A distribuição de probabilidade retangular com funções escalonadas não tem sentido físico, pois os valores dos experimentos são menos prováveis de ocorrer do que os valores próximos ao centro do escalonamento. Neste caso é mais realista admitir que a distribuição de probabilidade é a distribuição-t e tornar o fator de abrangência, com o fator-t baseado nos graus de liberdade efetivos ν_{eff} da incerteza padrão combinada, obtidos pela fórmula de Welch – Satterthwaite: GUM (ISO, 1998). Em nosso estudo utilizou-se um intervalo tendo um nível da confiança de 95,45 por cento.

$$\nu_{eff} = \frac{[\sigma(T_m)]^4}{\sum_{i=1}^N \frac{[\sigma(x_i)]^4}{\nu_i}} \quad (40)$$

onde v_i é o grau de liberdade para cada componente de incerteza.

A incerteza combinada é dada por:

$$u_c(T_m) = \sqrt{\sum [\sigma(x_i)]^2} \quad (41)$$

O fator de abrangência corresponde aos valores de k obtidos para a distribuição t-Student, considerando o grau de liberdade efetivo. GUM (ISO, 1998)

Tabela 8 : Valores das incertezas do Sensor de Temperatura da Linha de Master

0°C	Estimativa x_i (°C)	$\sigma(T_m)$ em °C	$\sigma(T_p)$ em °C	$\sigma(\Delta T_p)$ em °C	$\sigma(\Delta T_p)$ em °C	$\sigma(\Delta T_m)$ em °C	Incerteza Combinada de x_i	V_{eff}	Fator de abran_ gência	Incerteza Expandida de x_i
Padrão	0,01		0,002	0,01	0,056					
Mensurando	-0,04	0,007				0,005	0,058	18911	2	0,12
10°C										
Padrão	10,00		0,006	0,01	0,056					
Mensurando	9,88	0,010				0,005	0,058	6238	2	0,12
20°C										
Padrão	20,00		0,005	0,01	0,056					
Mensurando	19,65	0,005				0,005	0,058	61051	2	0,12
25°C										
Padrão	25,01		0,002	0,01	0,056					
Mensurando	24,58	0,013				0,005	0,059	2291	2	0,12
30°C										
Padrão	30,01		0,002	0,01	0,056					
Mensurando	29,59	0,010				0,005	0,058	4712	2	0,12
40°C										
Padrão	40,01		0,004	0,01	0,056					
Mensurando	39,59	0,002				0,005	0,057	3364050	2	0,11

De modo análogo, os resultados dos cálculos das incertezas do sensor de temperatura utilizado na linha da turbina em teste nos pontos de temperatura de 0, 10, 20, 25, 30 e 40 °C estão na Tabela 9.

Tabela 9: Valores das incertezas do Sensor de Temperatura da Linha de Teste

0°C	Estimativa x_i (°C)	$\sigma(T_m)$ em °C	$\sigma(T_p)$ em °C	$\sigma(\Delta T_p)$ em °C	$\sigma(\Delta IT_p)$ em °C	$\sigma(\Delta IT_m)$ em °C	Incerteza Combinada de x_i	V_{eff}	Fator de abran- gência	Incerteza Expandida de x_i
Padrão	0,01		0,002	0,01	0,056					
Mensurando	-0,05	0,002				0,005	0,057	3343575	2	0,11
10°C										
Padrão	10,00		0,006	0,01	0,056					
Mensurando	9,90	0,019				0,005	0,060	542	2	0,12
20°C										
Padrão	20,00		0,005	0,01	0,056					
Mensurando	19,65	0,004				0,005	0,057	136538	2	0,11
25°C										
Padrão	25,01		0,002	0,01	0,056					
Mensurando	24,57	0,009				0,005	0,058	7948	2	0,12
30°C										
Padrão	30,01		0,002	0,01	0,056					
Mensurando	29,59	0,002				0,005	0,057	1487851	2	0,11
40°C										
Padrão	40,01		0,004	0,01	0,056					
Mensurando	39,62	0,006				0,005	0,058	47416,6	2	0,12

A leitura dos sensores de temperatura em qualquer ponto de temperatura para um nível de confiança de 95,45% será dada por:

$$T_m = (T_p \pm \sigma_{95,45\%}) \text{ °C} \quad (42)$$

4.3 Resultado das calibrações dos sensores de pressão

O resultado das calibrações para cada um dos sensores de temperatura será apresentado em forma de tabelas do Apêndice 5. Estes resultados compreendem os valores da interface de leitura dos sensores em (mmH₂O) e do padrão para os pontos de 0, 176, 352, 528 e 704 mmH₂O. A temperatura ambiente onde foram realizadas as leituras foi de 21°C ±1°C.

4.4 Análise dos resultados da calibração dos sensores de Pressão

A calibração das pressões dos sensores, identificados como Sensor de Pressão da Linha Master e Sensor de Pressão da Linha Teste foi feita através de uma Coluna “U” padrão, fazendo-se uso do procedimento de cálculo das incertezas, abaixo descrito, e dos resultados apresentados nas tabelas do Apêndice 5.

O modelo matemático que leva em conta todas as variáveis presentes no processo de calibração é dado por: (Link, 1997) (Guide, 1993)

$$P_m = P_p + \Delta P_p + \Delta IP_p + \Delta IP_m \quad (43)$$

Onde:

P_m - pressão indicada no sensor de pressão sob calibração (mensurando);

P_p - pressão indicada no sensor de pressão padrão;

ΔP_p - correção associada ao padrão;

ΔIP_p - correção associada ao indicador de pressão do padrão;

ΔIP_m - correção associada ao indicador de pressão do mensurando;

- A incerteza associada à medição $\sigma (P_m)$ é o desvio padrão amostral das leituras efetuadas com o indicador de pressão;

- A incerteza associada à medição $\sigma(P_p)$ é o desvio padrão amostral das leituras efetuadas com o indicador de pressão padrão;
- A incerteza associada à correção do padrão é dada por:
- $\sigma(\Delta P_p) = 0,058 \text{ mmHg}$ (dado fornecido no certificado de calibração)
- A incerteza associada ao indicador de pressão do padrão é dada por:
- $\sigma(\Delta IP_p) = 0,5 \text{ mmHg}$ (dado analisado pela resolução)
- A incerteza associada ao indicador de pressão do mensurando é dada por:
- $\sigma(\Delta IP_m) = 0,05 \text{ °C}$ (dado analisado pela resolução)

Utilizando os mesmos conceitos de distribuição de probabilidade do item 4.2, podemos dizer que:

$$v_{eff} = \frac{[\sigma(P_m)]^4}{\sum_{i=1}^N \frac{[\sigma(x_i)]^4}{v_i}} \quad (44)$$

onde v_i é o grau de liberdade para cada componente de incerteza.

A incerteza combinada é dada por:

$$u_c(P_m) = \sqrt{\sum [\sigma(x_i)]^2} \quad (45)$$

O fator de abrangência corresponde aos valores de k obtidos para a distribuição t-Student, considerando o grau de liberdade efetivo, GUM (ISO, 1998).

Tabela 10 : Valores das incertezas do Sensor de Pressão da Linha de Master

0 mmH ₂ O	Estimativa x_i (mmH ₂ O)	$\sigma (P_m)$ em mmH ₂ O	$\sigma (P_p)$ em mmH ₂ O	$\sigma (\Delta P_p)$ em mmH ₂ O	$\sigma (\Delta IP_p)$ em mmH ₂ O	$\sigma (\Delta IP_m)$ em mmH ₂ O	Incerteza Combinada de x_i	V_{eff}	Fator de abran_ gência	Incerteza Expandida de x_i
Padrão	0,00		0,000	0,058	0,05					
Mensurando	0,01	0,005				0,05	0,092	563003	2	0,18
176 mmH ₂ O										
Padrão	175,75		0,854	0,058	0,05					
Mensurando	173,44	2,210				0,05	2,371	6,6	2,52	5,98
352 mmH ₂ O										
Padrão	352,75		0,750	0,058	0,05					
Mensurando	348,87	2,158				0,05	2,286	6,3	2,65	6,06
528 mmH ₂ O										
Padrão	529,25		0,854	0,058	0,05					
Mensurando	531,10	2,008				0,05	2,184	7,0	2,65	5,79
704 mmH ₂ O										
Padrão	706,00		1,291	0,058	0,05					
Mensurando	708,81	1,095				0,05	1,695	28,7	2,11	3,58

De modo análogo, os resultados dos cálculos das incertezas do sensor de temperatura utilizado na linha da turbina em teste nos pontos de temperatura de 0, 176, 352, 538 e 704 mmH₂O estão na Tabela 11.

Tabela 11 : Valores das incertezas do Sensor de Pressão da Linha de Teste

0 mmH ₂ O	Estimativa x_i (mmH ₂ O)	$\sigma(P_m)$ em mmH ₂ O	$\sigma(P_p)$ em mmH ₂ O	$\sigma(\Delta P_p)$ em mmH ₂ O	$\sigma(\Delta IP_p)$ em mmH ₂ O	$\sigma(\Delta IP_m)$ em mmH ₂ O	Incerteza Combinada de x_i	V_{eff}	Fator de abran_ gência	Incerteza Expandida de x_i
Padrão	0,00		0,000	0,058	0,05					
Mensurando	3,29	0,017				0,05	0,093	4008	2	0,19
176 mmH ₂ O										
Padrão	175,75		0,854	0,058	0,05					
Mensurando	177,61	2,165				0,05	2,329	6,7	2,52	5,87
352 mmH ₂ O										
Padrão	352,75		0,750	0,058	0,05					
Mensurando	357,13	0,956				0,05	1,218	13,2	2,21	2,69
528 mmH ₂ O										
Padrão	529,25		0,854	0,058	0,05					
Mensurando	534,41	0,460				0,05	0,974	100,6	2,025	1,97
704 mmH ₂ O										
Padrão	706,00		1,291	0,058	0,05					
Mensurando	709,81	2,064				0,05	2,437	9,7	2,32	5,65

A leitura dos sensores de temperatura em qualquer ponto de pressão para um nível de confiança de 95,45% será dada por:

$$P_m = (P_p \pm \sigma_{95,45\%}) \text{ mmH}_2\text{O} \quad (46)$$

4.5 Análise dos resultados da calibração da Turbina Master

No item 3.2.3 verificamos o procedimento para calibração das turbinas master onde constata-se que a calibração é realizada por organismo acreditado. Mas as turbinas de 2” e 6” não possuem a incerteza do Fator K, que é de grande importância para que possamos levar em conta a incerteza do volume totalizado pelas turbinas master.

Como descrito no item 3.2.5 a turbina de 6”, foi o único padrão utilizado em todos os testes. Deste modo, iremos relatar a incerteza do polinômio estimador do Fator K desta turbina e a relação entre esta incerteza e a incerteza do volume computado pela turbina padrão.

Utilizando o método dos mínimos quadrados nos dados apresentados na Tabela 7 para gerar o polinômio estimador do Fator k, chegamos a seguinte equação:

Polinômio estimador¹ do Fator k do medidor de 6”:

$$\text{Fator K (pulsos/m}^3\text{)} = C_{-2}Q^4 + C_{-1}Q^3 + C_0Q^2 + C_1Q + C_2$$

Incerteza do polinômio estimador é igual 0,13%

Onde:

$$Q = \text{Vazão [m}^3\text{/h]}$$

$$C_{-2} = 2,1097797\text{E-}10$$

$$C_1 = -2,5874200\text{E-}01$$

$$C_{-1} = -5,6066699\text{E-}07$$

$$C_2 = 1,3820711\text{E+}03$$

$$C_0 = 5,5627203\text{E-}04$$

A melhor maneira para a obtenção da incerteza do polinômio estimador do Fator k é calculando a variância entre os valores tabelados e os calculados pelo polinômio estimador. Utilizando a Eq. (27), chegamos a um valor igual a 0,13 %.

Ao analisarmos a relação entre o Fator K e o Volume podemos chegar ao seguinte:

$$k_M = \frac{NP_M}{V_M}, \quad V_M = \frac{NP_M}{k_M} \quad (47)$$

$$\left(\frac{U_{VM}}{V_M} \right)^2 = \left(\frac{U_{NPM}}{NP_M} \right)^2 + \left(\frac{U_{KM}}{K_M} \right)^2 \quad (48)$$

A turbina utilizada com padrão fornece cerca de 1300 pulsos por metro cúbico. Como o menor volume realizado em nossa medição foi de 10 m³, podemos afirmar que em cada medição foram totalizados mais que 13000 pulsos. No item 3.1.5, ao descrevermos a interface de aquisição de sinais, relatamos que a interface possui um microprocessador com contadores de 16 bits e um cristal de 7MHz. Deste modo, podemos aquisitar os pulsos com uma taxa de perda muito pequena. Com base nestas condições, podemos dizer que:

Se $U_{KM} = 1$ e $NP_M \gg 1$, então

$$(U_{NPM} / NP_M) \approx 0 \quad (49)$$

Logo,

$$\left(\frac{U_{VM}}{V_M} \right) \approx \left(\frac{U_{KM}}{K_M} \right) \quad (50)$$

Onde :

NP_M = Números de pulsos fornecidos pela turbina master;

V_M = Volume passado pela turbina master;

K_M = Fator K da turbina master

U_{VM} = Incerteza expandida do volume da turbina master

U_{KM} = Incerteza expandida do fator k da turbina master

Deste modo podemos associar a incerteza na determinação do volume verdadeiro convencional com a incerteza do polinômio estimador do Fator k , aumentando a incerteza do medidor de volume. Com isso, apresentamos uma incerteza mais condizente com o nosso processo. Deste modo, podemos combinar a incerteza do volume computado pela turbina master, fornecida pelo organismo acreditado e o do polinômio estimador do Fator K .

- Utilizando a Eq. (37), para cálculo da incerteza combina e a Eq. (38), para determinar a incerteza expandida. Realizamos os cálculos e chegamos a incerteza combinada do volume da turbina master de 6” por meio do polinômio estimador do Fator K é de 0,35% do valor estimado, a qual está baseada em sua respectiva incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência $k=2$, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95,45%.

4.6 Resultado da Análise de dados obtidos com a bancada de calibração

Para análise do comportamento da turbina, foram realizadas corridas - valor de volume fixo no medidor em teste - que o sistema de aquisição, juntamente com o programa aplicativo, informam para todas as grandezas envolvidas. Estes dados são apresentados nas tabelas do Apêndice 2.

Para dar continuidade ao raciocínio, iremos mostrar os dados colhidos pela interface de aquisição e como eles serão apresentados no apêndice.

Tabela 12: Corrida de 10 m³ em uma vazão de aproximadamente 90 m³/h (Master)

Turbina Master						
Corrida	Pulsos	Temp. (K)	Pressão (kPa)	Fator K	Vol. Calculado (m ³)	Vol. Corrigido (m ³)
1	13605	294,4	101,3043	1364,49	9,9708	9,9203
2	13588	294,3	101,3043	1364,49	9,9583	9,9132
3	13567	294,1	101,3043	1364,49	9,9429	9,9044
4	13618	294,0	101,3043	1364,49	9,9803	9,9453
5	13583	293,9	101,3043	1364,49	9,9546	9,9219
6	13574	293,8	101,3043	1364,49	9,9480	9,9177
7	13577	293,8	101,3043	1364,49	9,9502	9,9205
8	13542	293,8	101,3043	1364,49	9,9246	9,8966
9	13540	293,8	101,3043	1364,49	9,9231	9,8953
10	13551	293,8	101,3043	1364,49	9,9312	9,9016
11	13563	293,8	101,3043	1364,49	9,9400	9,9104
12	13573	293,8	101,3043	1364,49	9,9473	9,9177
13	13558	294,0	101,3043	1364,49	9,9363	9,9022
14	13551	294,0	101,2974	1364,49	9,9312	9,8943
15	13534	294,1	101,3043	1364,49	9,9187	9,8806
16	13522	294,1	101,2974	1364,49	9,9099	9,8696
17	13551	294,2	101,2974	1364,49	9,9312	9,8891
18	13553	294,2	101,2974	1364,49	9,9326	9,8901
19	13551	294,2	101,2974	1364,49	9,9312	9,8871
20	13556	294,3	101,2974	1364,49	9,9348	9,8875

Vale salientar que na realização destes testes foram utilizados um único master, o de 6”, e a mesma turbina de teste.

Tabela 13 : Corrida de 10 m³ em uma vazão de aproximadamente 90 m³/h (Teste)

Turbina Teste						
Corrida	Pulsos	Temp. (K)	Pressão (kPa)	Fator K	Vol. Calculado (m ³)	Vol. Corrigido (m ³)
1	1	294,0	101,325	10	10	9,9646
2	1	293,9	101,325	10	10	9,9708
3	1	293,8	101,325	10	10	9,9725
4	1	293,8	101,318	10	10	9,9723
5	1	293,8	101,318	10	10	9,9732
6	1	293,8	101,318	10	10	9,9738
7	1	293,8	101,318	10	10	9,9738
8	1	293,9	101,318	10	10	9,9704
9	1	293,9	101,318	10	10	9,9687
10	1	294,0	101,318	10	10	9,9653
11	1	293,9	101,318	10	10	9,9671
12	1	294,0	101,318	10	10	9,9659
13	1	294,2	101,318	10	10	9,9602
14	1	294,3	101,318	10	10	9,9551
15	1	294,4	101,318	10	10	9,9518
16	1	294,5	101,318	10	10	9,9499
17	1	294,5	101,318	10	10	9,9484
18	1	294,6	101,318	10	10	9,9467
19	1	294,6	101,318	10	10	9,9450
20	1	294,6	101,318	10	10	9,9434

Tabela 14: Corrida de 10 m³ em uma vazão de aproximadamente 90 m³/h

(Cálculos)

Corrida	V _{CM} (m ³)	V _{CT} (m ³)	<i>k-factor</i>	Erro(%)	Vazão(m ³ /h)
1	9,92034	9,96456	0,99556	0,446	91,3
2	9,91320	9,97084	0,99422	0,581	90,9
3	9,90444	9,97247	0,99318	0,687	90,9
4	9,94526	9,97230	0,99729	0,272	91,4
5	9,92186	9,97325	0,99485	0,518	91,2
6	9,91774	9,97379	0,99438	0,565	91,2
7	9,92054	9,97379	0,99466	0,537	91,1
8	9,89662	9,97040	0,99260	0,745	90,7
9	9,89526	9,96867	0,99264	0,742	90,9
10	9,90165	9,96531	0,99361	0,643	91,1
11	9,91038	9,96711	0,99431	0,572	90,8
12	9,91766	9,96585	0,99516	0,486	90,9
13	9,90218	9,96023	0,99417	0,586	89,5
14	9,89434	9,95515	0,99389	0,615	89,2
15	9,88062	9,95177	0,99285	0,720	89,2
16	9,86957	9,94988	0,99193	0,814	89,1
17	9,88906	9,94839	0,99404	0,600	88,9
18	9,89008	9,94670	0,99431	0,572	89,3
19	9,88708	9,94498	0,99418	0,586	89,5
20	9,88753	9,94339	0,99438	0,565	89,4

Onde:

- Pulso – Quantificação elétrica da determinação de um volume fixo;
- Volume Calculado – Pulsos vezes Fator *k*
- Volume Corrigido – Volume Calculado corrigido para 1 atm 20°C
- V_{CM} – Volume corrigido da turbina master;
- V_{CT} – Volume corrigido da turbina em teste;
- k-factor* – Razão entre o valor do volume corrigido da turbina master e o volume corrigido da turbina em teste;

Erro(%) – Erro relativo. É a razão da diferença entre o valor indicado(turbina em teste) e o valor verdadeiro convencional (turbina master), do volume que passa pelo medidor durante o teste, dividido pelo valor verdadeiro convencional, conforme Eq. (1).

Com as corridas realizadas conseguimos colher os seguintes dados:

- volume, pressão e temperatura na linha onde se encontra a turbina master
- volume, pressão e temperatura na linha onde se encontra a turbina em teste.

Com base nos valores colhidos, podemos definir que se utilizarmos os volumes corrigidos das turbinas padrão e teste para acharmos a razão entre eles, iremos obter o *k-factor*, valor este que representa a correção entre o volume indicado e o volume verdadeiro convencional.

Para estudarmos a dispersão do *k-factor* de uma turbina, realizamos várias corridas em uma mesma vazão e, esta mesma metodologia foi adotada em outras vazões. Deste modo, esperamos verificar o comportamento do *k-factor* ao longo de uma faixa de utilização de uma turbina.

Conforme definido no item 3.2.5, realizamos estes testes passando pelas turbinas volumes diferente, aumentando-os gradativamente.

Os testes realizados foram divididos da seguinte forma:

- Comportamento do *k-factor* quando o escoamento é de 10 m^3 por corrida
- Comportamento do *k-factor* quando o escoamento é de 20 m^3 por corrida
- Comportamento do *k-factor* quando o escoamento é de 30 m^3 por corrida
- Comportamento do *k-factor* quando o escoamento é de 40 m^3 por corrida

4.6.1 Resultados do comportamento da turbina em teste em uma corrida de 10 m³

A Tabela 15 demonstra o comportamento do *k-factor*, nas vazões de 90, 180, 270, 360, 450, 540, 630 e 720 m³/h, quando passamos 10m³ nos medidores de volume. Utilizaremos estes dados para apresentar uma representação gráfica Fig. 21 e Fig. 22, do comportamento do *k-factor*.

Tabela 15 : Valores dos *k-factors* utilizando 10 m³

Corridas	Fk 90-10	Fk 180-10	Fk 270-10	Fk 360-10	Fk 450-10	Fk 540-10	Fk 630-10	Fk 720-10
1	0,99556	1,00077	1,00668	1,00470	1,00620	1,00519	1,00780	1,00886
2	0,99422	1,00368	1,00149	1,00506	1,00762	1,00124	1,00867	1,00546
3	0,99318	1,00389	1,00546	1,00601	1,00683	1,00424	1,00654	1,00760
4	0,99729	1,00441	1,00620	1,00689	1,00720	1,00158	1,00654	1,00699
5	0,99485	1,00191	1,00401	1,00527	1,00441	1,00340	1,00945	1,00813
6	0,99438	1,00263	1,00393	1,00704	1,00769	1,00131	1,00724	1,00696
7	0,99466	1,00153	1,00503	1,00436	1,00745	1,00374	1,00745	1,00604
8	0,99260	1,00407	1,00377	1,00385	1,00719	1,00347	1,00612	1,00767
9	0,99264	1,00533	1,00369	1,00780	1,00562	1,00119	1,00973	1,00706
10	0,99361	1,00217	1,00747	1,00755	1,00503	1,00637	1,00719	1,00661
11	0,99431	1,00428	1,00691	1,00547	1,00588	1,00283	1,00680	1,00691
12	0,99516	1,00298	1,00683	1,00694	1,00661	1,00182	1,00970	1,00917
13	0,99417	1,00024	1,00359	1,00491	1,00462	1,00335	1,00776	1,00641
14	0,99389	1,00081	1,00448	1,00418	1,00572	1,00346	1,00514	1,00957
15	0,99285	1,00031	1,00525	1,00602	1,00650	1,00217	1,00889	1,00769
16	0,99193	1,00246	1,00676	1,00442	1,00768	1,00341	1,00682	1,00998
17	0,99404	1,00259	1,00332	1,00760	1,00554	1,00456	1,00527	1,00999
18	0,99431	1,00124	1,00510	1,00662	1,00966	1,00315	1,00717	1,00679
19	0,99418	1,00241	1,00505	1,00356	1,00656	1,00210	1,00948	1,00634
20	0,99438	1,00004	1,00328	1,00545	1,00848	1,00085	1,00816	1,00833
K-Factor Média	0,99411	1,00239	1,00492	1,00569	1,00662	1,00297	1,00760	1,00763
Desvio Padrão	0,00118	0,00155	0,00156	0,00132	0,00131	0,00146	0,00139	0,00132

Onde:

- Fk 90-10 – *k-factor* na vazão de 90 m³/h, passando 10m³;
 Fk 180-10 – *k-factor* na vazão de 180 m³/h, passando 10m³;
 Fk 270-10 – *k-factor* na vazão de 270 m³/h, passando 10m³;
 Fk 360-10 – *k-factor* na vazão de 360 m³/h, passando 10m³;
 Fk 450-10 – *k-factor* na vazão de 450 m³/h, passando 10m³;
 Fk 540-10 – *k-factor* na vazão de 540 m³/h, passando 10m³;
 Fk 630-10 – *k-factor* na vazão de 630 m³/h, passando 10m³;
 Fk 720-10 – *k-factor* na vazão de 720 m³/h, passando 10m³.

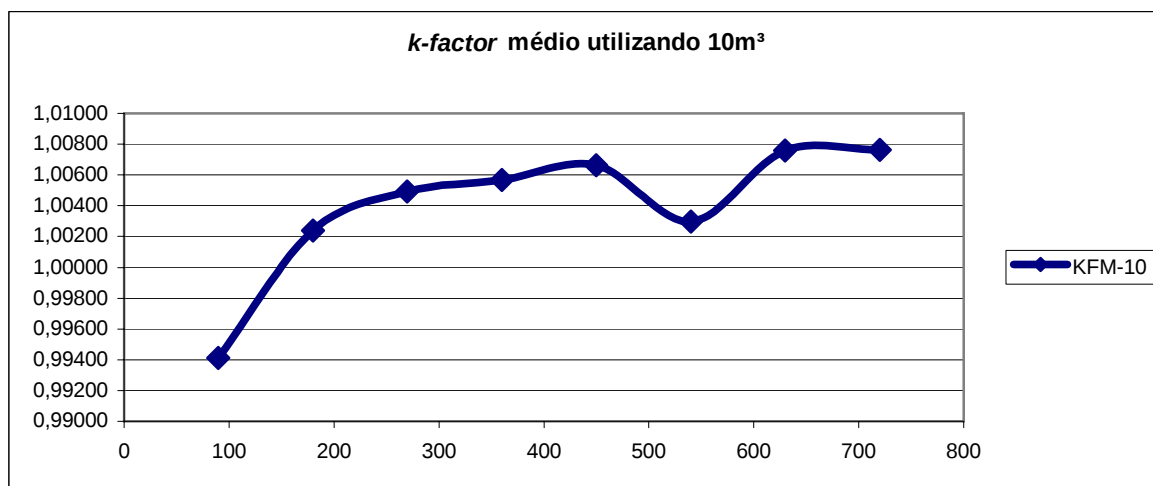


Figura 21: Gráfico do *k-factor* obtido passando 10m³ pela turbina em teste

Nota: O valor encontrado para *k-factor* na vazão de 540 m³/h, passando 10m³, teve um comportamento de tendência diferente dos demais da curva apresenta na Fig. 21. Este ponto foi repetido 20 vezes e confirmado o seu valor, mas não conseguimos avaliar o porque deste comportamento.

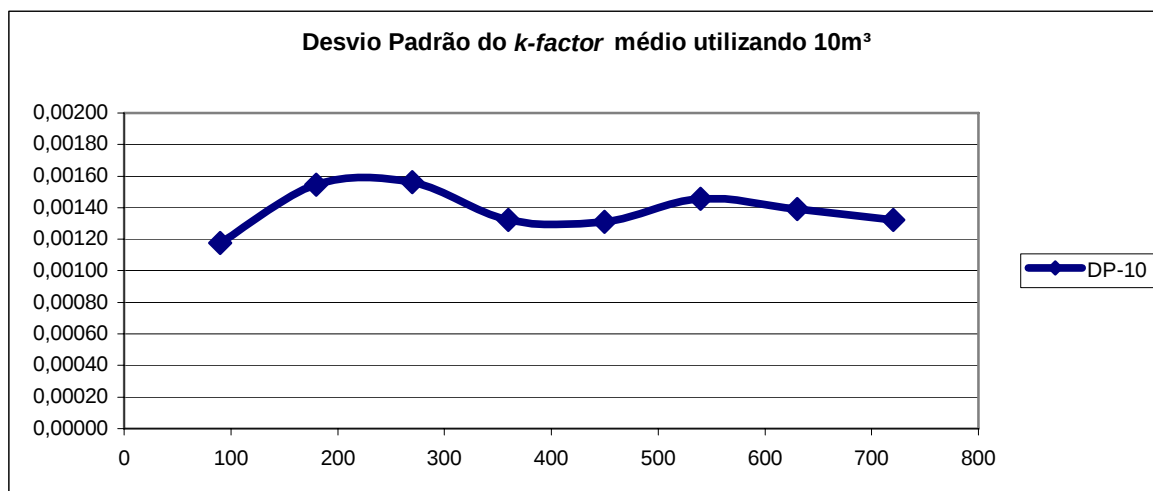


Figura 22: Gráfico do Desvio padrão do k -factor obtido passando 10m^3 pela turbina em teste

4.6.2 Resultados do comportamento da turbina em teste em uma corrida de 20 m^3

A Tabela 16 demonstra o comportamento do k -factor, nas vazões de 90, 360, 450 e $630\text{m}^3/\text{h}$, quando passamos 20m^3 nos medidores de volume. Utilizaremos estes dados para apresentar uma representação gráfica Fig. 23 e Fig 24, do comportamento do k -factor.

Tabela 16 : Valores dos k -factors utilizando 20 m^3

Corridas	Fk 90-20	Fk 360-20	Fk 450-20	Fk 630-20
1	0,99689	1,00380	1,00477	1,00230
2	0,99535	1,00345	1,00408	1,00234
3	0,99626	1,00399	1,00491	1,00259
4	0,99394	1,00289	1,00463	1,00195
5	0,99550	1,00453	1,00393	1,00141
6	0,99375	1,00309	1,00360	1,00233
7	0,99408	1,00424	1,00490	1,00350
8	0,99361		1,00353	1,00300
9	0,99354		1,00531	1,00207
10	0,99359		1,00370	1,00233
K-Factor Média	0,99465	1,00371	1,00433	1,00238
Desvio Padrão	0,00124	0,00060	0,00064	0,00057

Onde:

Fk 90-20 – *k-factor* na vazão de 90 m³/h, passando 20m³;

Fk 360-20 – *k-factor* na vazão de 360 m³/h, passando 20m³;

Fk 450-20 – *k-factor* na vazão de 450 m³/h, passando 20m³;

Fk 630-20 – *k-factor* na vazão de 630 m³/h, passando 20m³;

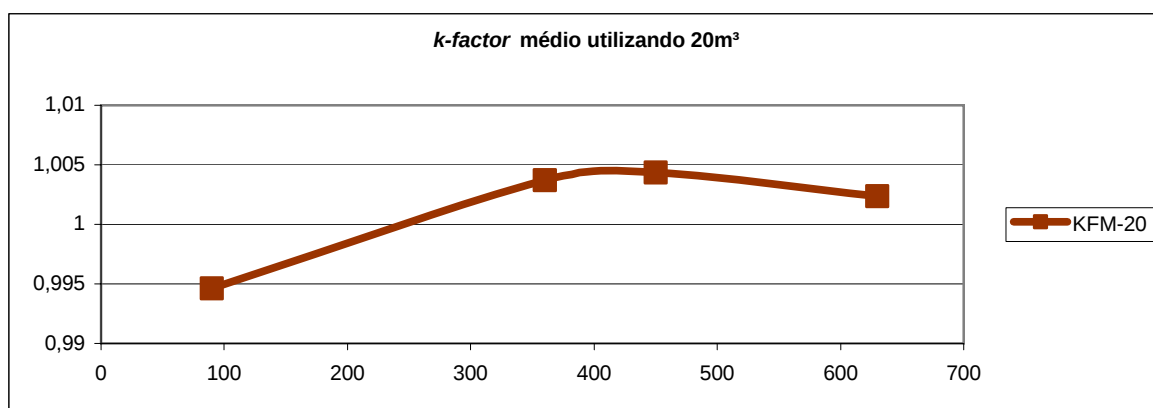


Figura 23: Gráfico do *k-factor* obtido passando 20m³ pela turbina em teste

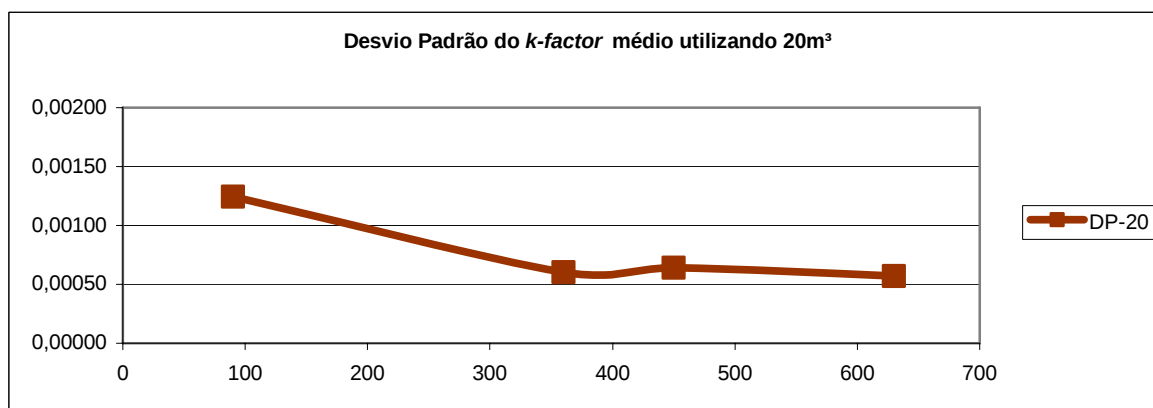


Figura 24: Gráfico do Desvio padrão do *k-factor* obtido passando 20m³ pela turbina em teste

4.6.3 Resultados do comportamento da turbina em teste em uma corrida de 30 m³

A Tabela 17 demonstra o comportamento do *k-factor*, nas vazões de 90, 360, 450 e 630m³/h, quando passamos 30m³ nos medidores de volume. Utilizaremos estes dados para apresentar uma representação gráfica Fig. 25 e Fig. 26, do comportamento do *k-factor*.

Tabela 17 : Valores dos *k-factors* utilizando 30 m³

Corridas	Fk 90-30	Fk 360-30	Fk 450-30	Fk 630-30
1	0,99386	1,00386	1,00464	1,00151
2	0,99376	1,00354	1,00416	1,00164
3	0,99159	1,00439	1,00519	1,00193
4	0,99211	1,00513	1,00457	1,00283
5	0,99246	1,00324	1,00346	1,00142
6	0,99372	1,00368	1,00388	1,00298
7	0,99253	1,00466	1,00388	1,00139
8		1,00309	1,00390	1,00143
9		1,00347	1,00575	1,00273
10		1,00337	1,00310	1,00260
K-Factor Média	0,99286	1,00384	1,00425	1,00205
Desvio Padrão	0,00091	0,00067	0,00080	0,00066

Onde:

Fk 90-30 – *k-factor* na vazão de 90 m³/h, passando 30m³;

Fk 360-30 – *k-factor* na vazão de 360 m³/h, passando 30m³;

Fk 450-30 – *k-factor* na vazão de 450 m³/h, passando 30m³;

Fk 630-30 – *k-factor* na vazão de 630 m³/h, passando 30m³;

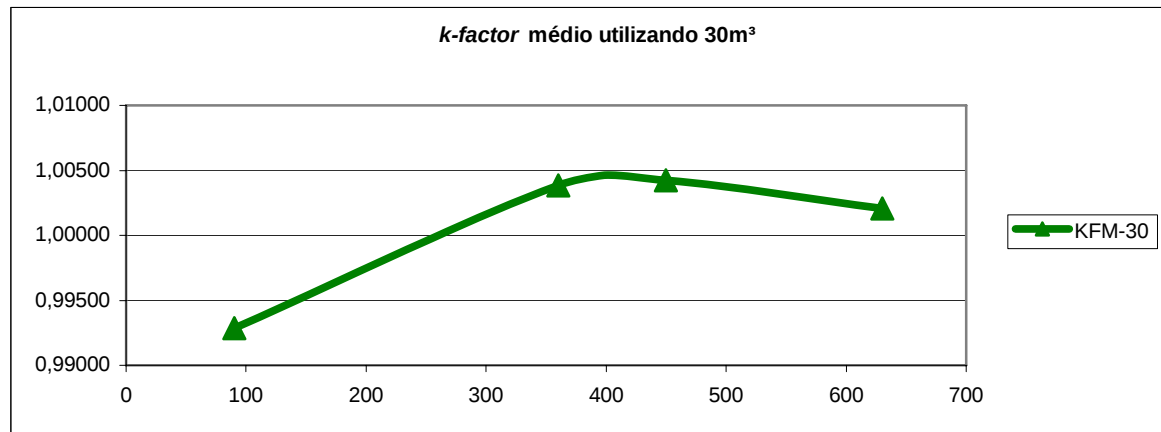


Figura 25: Gráfico do k -factor obtido passando 30m³ pela turbina em teste

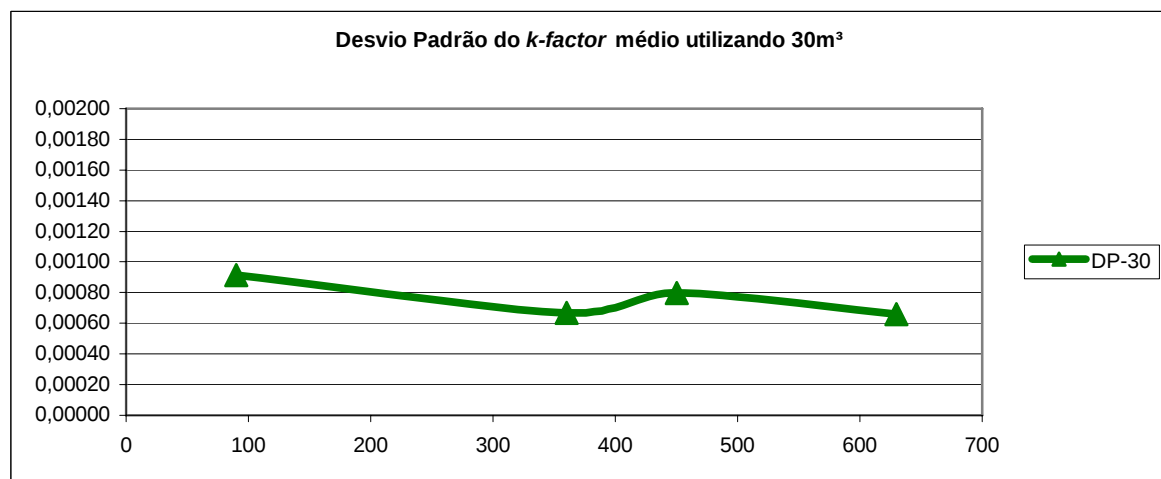


Figura 26: Gráfico do Desvio padrão do k -factor obtido passando 30m³ pela turbina em teste

4.6.4 Resultados do comportamento da turbina em teste em uma corrida de 40 m³

A Tabela 18 demonstra o comportamento do *k-factor*, nas vazões de 90, 225, 270, 360, 450, 540 e 630m³/h, quando passamos 40m³ nos medidores de volume. Utilizaremos estes dados para apresentar uma representação gráfica Fig. 27 e Fig. 28, do comportamento do *k-factor*.

Tabela 18 : Valores dos *k-factors* utilizando 40 m³

Corridas	Fk 90-40	Fk 225-40	Fk 270-40	Fk 360-40	Fk 450-40	Fk 540-40	Fk 630-40
1	0,99178	1,00387	1,00281	1,00389	1,00247	1,00369	1,00341
2	0,99161	1,00324	1,00292	1,00407	1,00237	1,00310	1,00354
3	0,99149	1,00290	1,00328	1,00410	1,00194	1,00370	1,00216
4	0,99205	1,00351	1,00368	1,00375	1,00269	1,00299	1,00280
5	0,99263	1,00295	1,00390	1,00407	1,00282	1,00313	1,00273
6	0,99287	1,00282	1,00421	1,00320	1,00283	1,00351	1,00250
7	0,99275	1,00260	1,00431	1,00390	1,00300	1,00310	1,00283
8		1,00199	1,00391	1,00435	1,00216	1,00276	1,00281
9		1,00288			1,00197	1,00366	1,00324
10		1,00219			1,00242	1,00309	1,00315
<i>K-factor</i> Média	0,99217	1,00290	1,00363	1,00392	1,00247	1,00327	1,00292
Desvio Padrão	0,00058	0,00056	0,00057	0,00034	0,00037	0,00034	0,00042

Onde:

- Fk 90-410 – *k-factor* na vazão de 90 m³/h, passando 40m³;
- Fk 225-40 – *k-factor* na vazão de 180 m³/h, passando 40m³;
- Fk 270-40 – *k-factor* na vazão de 270 m³/h, passando 40m³;
- Fk 360-40 – *k-factor* na vazão de 360 m³/h, passando 40m³;
- Fk 450-40 – *k-factor* na vazão de 450 m³/h, passando 40m³;
- Fk 540-40 – *k-factor* na vazão de 540 m³/h, passando 40m³;
- Fk 630-40 – *k-factor* na vazão de 630 m³/h, passando 40m³;

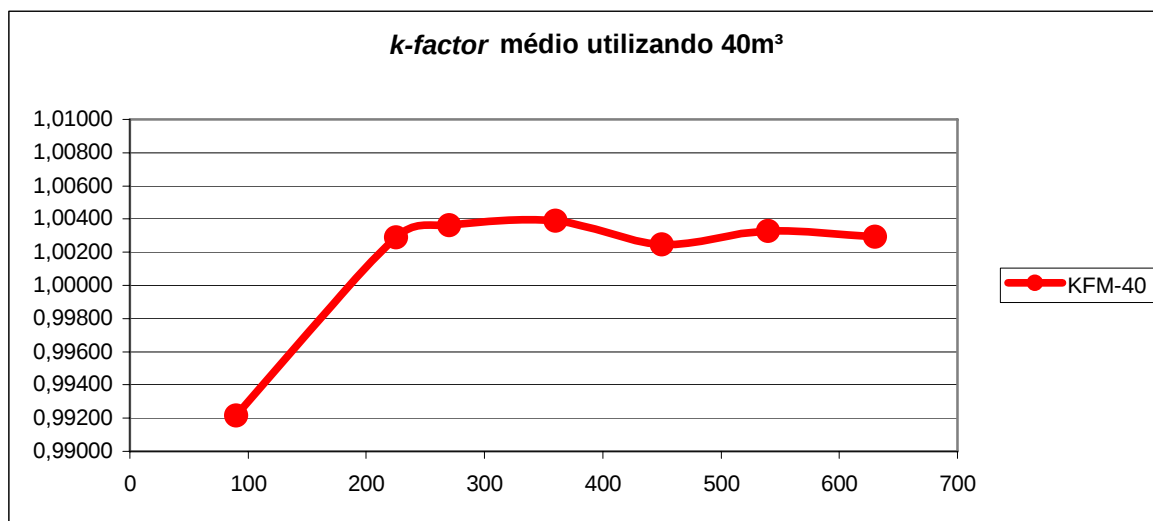


Figura 27: Gráfico do *k*-factor obtido passando 40m³ pela turbina em teste

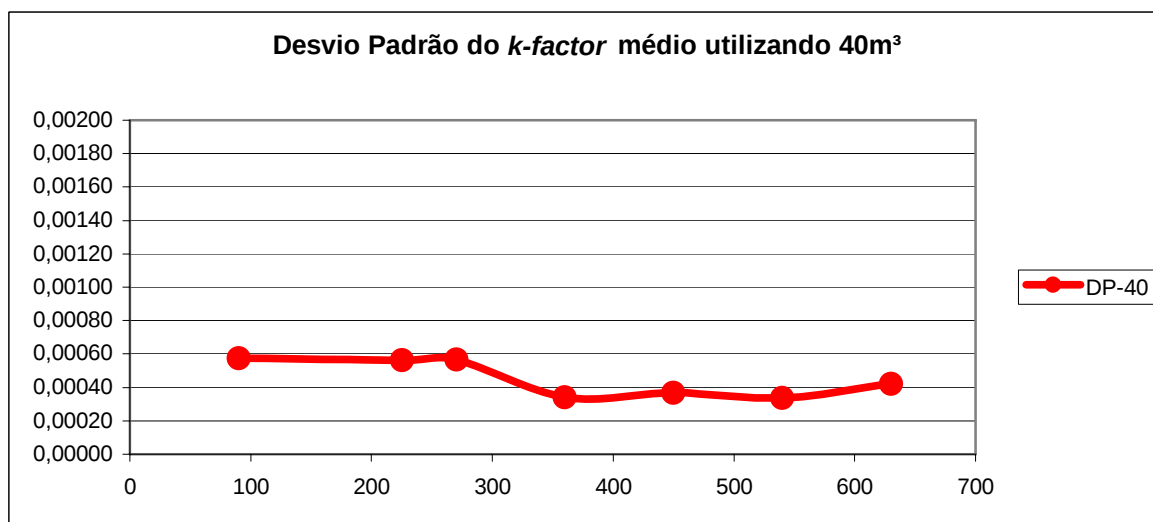


Figura 28: Gráfico do Desvio padrão do *k*-factor obtido passando 40m³ pela turbina em teste

4.7 Análise dos resultados do comportamento da turbina em teste

Para que possamos avaliar os dados de uma maneira geral, apresentaremos o comportamento do k -factor obtido nos testes anteriores, ou seja em volumes diferentes, deste modo observamos de uma maneira mais ampla o seu comportamento.

A Fig. 29, mostra que o k -factor tem um comportamento definido e que apesar dos testes serem realizados com volumes diferentes o k -factor se apresenta bem similar.

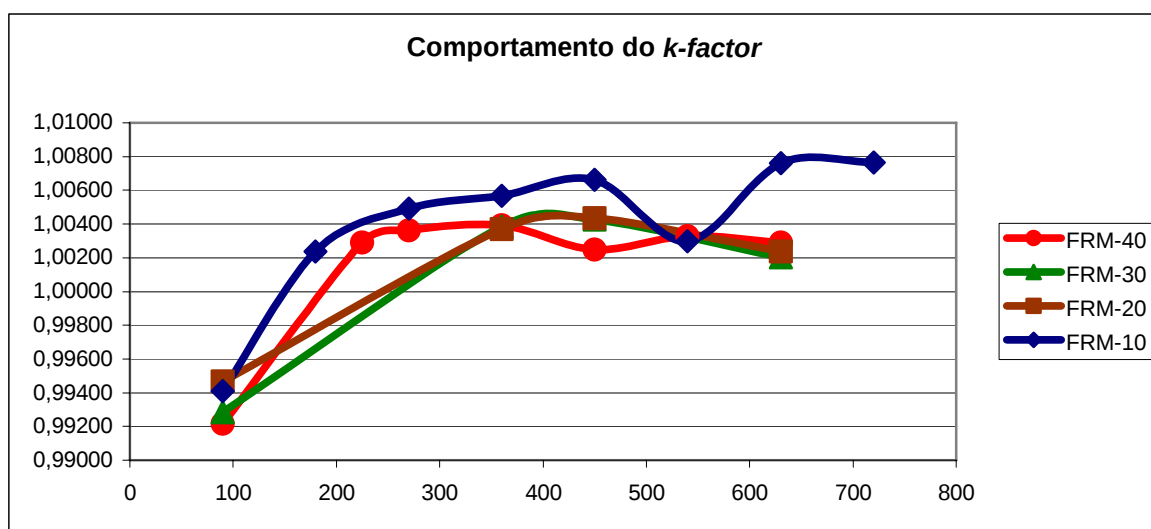


Figura 29: Gráfico do Comportamento do k -factor nas situações avaliadas

Mas, quando analisamos a Fig. 30, verificamos a dispersão do desvio médio quadrático do k -factor. Estes valores nos levam a admitir que quanto maior o volume escoado em um medidor tipo turbina, menor é o desvio padrão. Deste modo, nos levará a um fator de correção que nos aproximará do valor verdadeiro convencional deste volume.

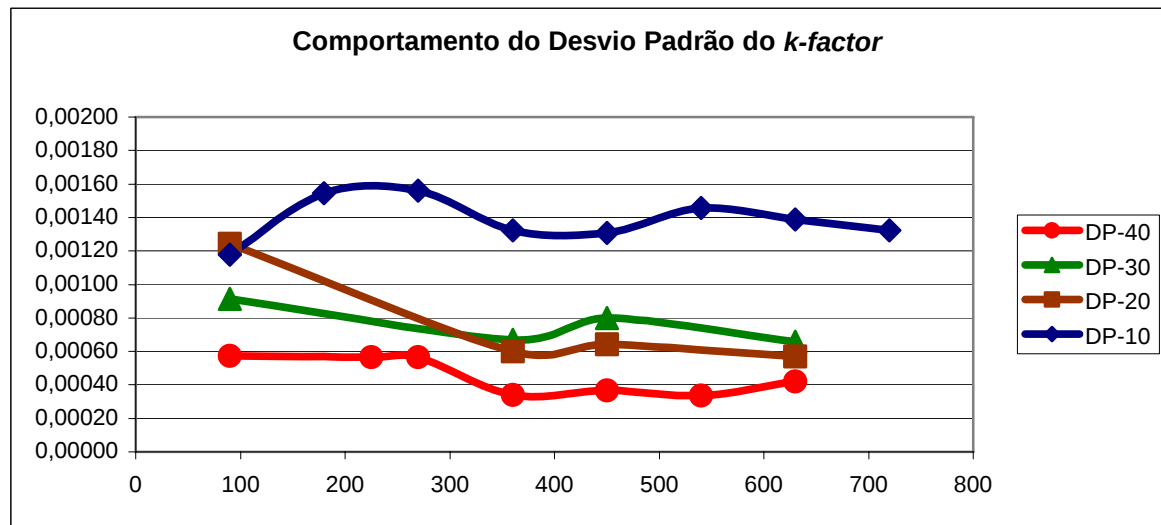


Figura 30: Gráfico do Comportamento do Desvio Padrão do k -factor nas situações avaliadas

4.8 Análise das Incertezas do *k-factor*

Para avaliarmos o comportamento das incertezas de medição do *k-factor*, devemos calcular o quanto cada grandeza influencia no processo de medição. Deste modo, calculamos conforme Eq. (36), os coeficientes de sensibilidade em cada uma das vazões e volumes testados.

As Tabelas 19, 20, 21 e 22 apresentam os valores médios dos coeficientes de sensibilidade, calculados em cada corrida.

Tabela 19: Coeficientes de Sensibilidade nas corridas de 10m³

Vazão(m ³ /h)	C _{VM}	C _{PM}	C _{TT}	C _{VT}	C _{PT}	C _{TM}
90	0,100	0,010	0,003	-0,099	-0,010	-0,003
180	0,100	0,010	0,003	-0,100	-0,010	-0,003
270	0,100	0,010	0,003	-0,100	-0,010	-0,003
360	0,100	0,010	0,003	-0,101	-0,010	-0,003
450	0,100	0,010	0,003	-0,101	-0,010	-0,003
540	0,100	0,010	0,003	-0,100	-0,010	-0,003
630	0,100	0,010	0,003	-0,101	-0,010	-0,003
720	0,100	0,010	0,003	-0,101	-0,010	-0,003
Coef. Medios	0,100	0,010	0,003	-0,100	-0,010	-0,003

Tabela 20: Coeficientes de Sensibilidade nas corridas de 20m³

Vazão(m ³ /h)	C _{VM}	C _{PM}	C _{TT}	C _{VT}	C _{PT}	C _{TM}
90	0,050	0,010	0,003	-0,050	-0,010	-0,003
360	0,050	0,010	0,003	-0,050	-0,010	-0,003
450	0,050	0,010	0,003	-0,050	-0,010	-0,003
630	0,050	0,010	0,003	-0,050	-0,010	-0,003
Coef. Medios	0,050	0,010	0,003	-0,050	-0,010	-0,003

Tabela 21: Coeficientes de Sensibilidade nas corridas de 30m³

Vazão(m ³ /h)	C _{VM}	C _{PM}	C _{TT}	C _{VT}	C _{PT}	C _{TM}
90	0,033	0,010	0,003	-0,033	-0,010	-0,003
360	0,033	0,010	0,003	-0,033	-0,010	-0,003
450	0,033	0,010	0,003	-0,033	-0,010	-0,003
630	0,033	0,010	0,003	-0,033	-0,010	-0,003
Coef. Medios	0,033	0,010	0,003	-0,033	-0,010	-0,003

Tabela 22: Coeficientes de Sensibilidade nas corridas de 40m³

Vazão(m ³ /h)	C _{VM}	C _{PM}	C _{TT}	C _{VT}	C _{PT}	C _{TM}
90	0,025	0,010	0,003	-0,025	-0,010	-0,003
225	0,025	0,010	0,003	-0,025	-0,010	-0,003
270	0,025	0,010	0,003	-0,025	-0,010	-0,003
360	0,025	0,010	0,003	-0,025	-0,010	-0,003
450	0,025	0,010	0,003	-0,025	-0,010	-0,003
540	0,025	0,010	0,003	-0,025	-0,010	-0,003
630	0,025	0,010	0,003	-0,025	-0,010	-0,003
Coef. Medios	0,025	0,010	0,003	-0,025	-0,010	-0,003

Verificamos que o comportamento dos coeficientes de sensibilidade praticamente independe da vazão e do volume passado, tendo basicamente o mesmo valor em todas as corridas analisadas.

Os coeficientes que se relacionam com o volume são diferentes quando aumentamos o volume passado pelas turbinas master e de teste, mas a incerteza da medição do volume na turbina é fornecida em percentual, ou seja aumentando o volume não diminuirá o peso da incerteza da turbina master.

Após os cálculos dos coeficientes de sensibilidade precisamos analisar a contribuição de cada grandeza do processo. Para isso, apresentaremos nas Tabelas 23, 24, 25 e 26, os valores dos seus coeficientes (C) multiplicado pela sua incerteza (u) e, por fim, a sua incerteza combinada (u_c).

A incerteza da medição do volume na turbina em teste e de ordem quase desprezível perante as demais, isto é possível pois a seguinte lógica foi utilizada:

- a determinação do volume da turbina em teste é um valor numérico constante, informado nas características técnicas de cada medidor em teste;
- a turbina em teste fornece um pulso a cada volume constante escoado;
- um microprocessador realiza varredura deste sinal (pulso) utilizando como base de tempo um cristal de aproximadamente 7MHz;
- com este processo o pulso pode ser percebido em aproximadamente 0,15 μ s.

Utilizando as Eq. (29), (30), (31), (32), (33), (34), (35) e (36), chegamos ao valor da incerteza do tipo B utilizando o peso dos coeficientes de sensibilidade. A incerteza do volume da master é percentual, fazendo com que C seja sempre igual a 1. Logo $u = C \times u$, e este valor se repetirá nas outras tabelas, pois independentemente do volume passado, a sua contribuição será sempre a mesma.

Tabela 23: Contribuição das Incertezas do tipo B nas corridas de 10m³

Incetezas	uvm	uspm	ustt	uvt	spt	ustt
u (incertezas do tipo B)	1,75E-03	2,94E-02	5,80E-02	1,00E-04	2,94E-02	5,80E-02
C x u	1,75E-03	2,92E-04	1,98E-04	-1,00E-05	-2,92E-04	-1,98E-04
(C u) ²	3,06E-06	8,55E-08	3,91E-08	1,01E-10	8,51E-08	3,91E-08
$\Sigma (C u)^2$	3,31E-06					
(Uc)Raiz do Σ.	1,82E-03					

Tabela 24: Contribuição das Incertezas do tipo B nas corridas de 20m³

Incetezas	uvm	uspm	ustt	uvt	spt	ustt
u (incertezas do tipo B)	1,75E-03	2,94E-02	5,80E-02	1,00E-04	2,94E-02	5,80E-02
C x u	1,75E-03	2,92E-04	1,95E-04	-5,01E-06	-2,91E-04	-1,95E-04
(C u) ²	3,06E-06	8,51E-08	3,80E-08	2,51E-11	8,47E-08	3,81E-08
$\Sigma (C u)^2$	3,31E-06					
(Uc)Raiz do Σ.	1,82E-03					

Tabela 25: Contribuição das Incertezas do tipo B nas corridas de 30m³

Incerteza	uvm	uspm	ustt	uvt	spt	ustt
u (incertezas do tipo B)	1,75E-03	2,94E-02	5,80E-02	1,00E-04	2,94E-02	5,80E-02
C x u	1,75E-03	2,91E-04	1,95E-04	-3,34E-06	-2,91E-04	-1,95E-04
(C u) ²	3,06E-06	8,50E-08	3,80E-08	1,11E-11	8,46E-08	3,81E-08
Σ (C u) ²	3,31E-06					
(Uc)Raiz do Σ.	1,82E-03					

Tabela 26: Contribuição das Incertezas do tipo B nas corridas de 40m³

Incerteza	uvm	uspm	ustt	uvt	spt	ustt
u (incertezas do tipo B)	1,75E-03	2,94E-02	5,80E-02	1,00E-04	2,94E-02	5,80E-02
C x u	1,75E-03	2,92E-04	1,95E-04	-2,50E-06	-2,91E-04	-1,95E-04
(C u) ²	3,06E-06	8,50E-08	3,81E-08	6,27E-12	8,47E-08	3,82E-08
Σ (C u) ²	3,31E-06					
(Uc)Raiz do Σ.	1,82E-03					

Verificamos que as grandezas P,V e T possuem um comportamento estático quando variamos a vazão e o volume passado por uma turbina. Podemos observar que a incerteza do tipo B é constante em todas as vazões e volumes submetidos.

Como u_c é constante, analisaremos a u_a – incerteza do tipo A, fornecida pelo certificado de calibração do medidor de volume – para que possamos verificar o comportamento da repetitividade do valor indicado pela turbina em teste e o da bancada a avaliarmos assim a incerteza final do teste.

As Tabelas 27, 28, 29 e 30 apresentarão os valores das incertezas u_a (incerteza do tipo A), u_c (incerteza do tipo B) e u_k (incerteza expandida do k -factor da turbina em teste).

Tabela 27 : Incertezas em corridas utilizando 10 m³

Corridas	Fk 90-10	Fk 180-10	Fk 270-10	Fk 360-10	Fk 450-10	Fk 540-10	Fk 630-10	Fk 720-10
u_c	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03
u_a	1,18E-03	1,55E-03	1,56E-03	1,32E-03	1,31E-03	1,46E-03	1,39E-03	1,32E-03
u_k	2,17E-03	2,39E-03	2,40E-03	2,25E-03	2,24E-03	2,33E-03	2,29E-03	2,25E-03

Tabela 28 : Incertezas em corridas utilizando 20 m³

Corridas	Fk 90-20	Fk 360-20	Fk 450-20	Fk 630-20
u_c	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03
u_a	1,24E-03	6,01E-04	6,42E-04	5,71E-04
u_k	2,20E-03	1,92E-03	1,93E-03	1,91E-03

Tabela 29 : Incertezas em corridas utilizando 30 m³

Corridas	Fk 90-30	Fk 360-30	Fk 450-30	Fk 630-30
u_c	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03
u_a	9,13E-04	6,69E-04	7,99E-04	6,59E-04
u_k	2,04E-03	1,94E-03	1,99E-03	1,93E-03

Tabela 30 : Incertezas em corridas utilizando 40 m³

Corridas	Fk 90-40	Fk 225-40	Fk 270-40	Fk 360-40	Fk 450-40	Fk 540-40	Fk 630-40
u_c	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03	1,82E-03
u_a	5,75E-04	5,65E-04	5,67E-04	3,39E-04	3,67E-04	3,36E-04	4,21E-04
u_k	1,91E-03	1,90E-03	1,91E-03	1,85E-03	1,86E-03	1,85E-03	1,87E-03

4.9 Determinação da Incerteza Expandida do *k-factor*

Conforme já foi informado, a incerteza expandida U é resultado do produto da incerteza padrão combinada $u_k(y)$ por um fator de abrangência k . A multiplicação de $u_k(y)$ por uma constante não trará acréscimo de novas informações, mas a informação previamente disponível estará apresentada de forma diferente.

$$U_k = K_{\text{abrangência}} * u_k \quad (51)$$

Para o valor de um fator de abrangência k , corresponde-se a uma probabilidade de abrangência especificada, é necessário que seja levada em conta a confiabilidade da incerteza padrão $u_k(y)$ da estimativa de saída y . Isto implica considerar quão bem $u_k(y)$ estima o desvio padrão associado ao resultado da medição. Uma medida adequada da confiabilidade da incerteza padrão associada a uma estimativa de saída é seu grau de liberdade efetivo v_{eff} , que é aproximado por uma combinação apropriada dos graus de liberdade efetivos das diferentes contribuições da incerteza $u_i(y)$.

O procedimento para cálculo de um fator de abrangência apropriado k , quanto as condições do teorema central do limite são satisfeita, é obtido a partir da fórmula de Welch – Satterthwaite: GUM (ISO, 1998)

Em nosso estudo utilizamos um intervalo tendo um nível da confiança de 95,45 %.

$$v_{\text{eff}} = \frac{[\sigma(k - factor)]^4}{\sum_{i=1}^N \frac{[\sigma(x_i)]^4}{v_i}} \quad (52)$$

onde v_i é o grau de liberdade para cada componente de incerteza.

O fator de abrangência corresponde aos valores de k obtidos para a distribuição t-Student, considerando o grau de liberdade efetivo GUM (ISO, 1998).

Tabela 31 : Fator de abrangência e incerteza expandida em 10 m³

Corridas	Fk 90-10	Fk 180-10	Fk 270-10	Fk 360-10	Fk 450-10	Fk 540-10	Fk 630-10	Fk 720-10
U_k	2,17E-03	2,39E-03	2,40E-03	2,25E-03	2,24E-03	2,33E-03	2,29E-03	2,25E-03
Veff	218	108	95	142	163	124	140	159
k	2	2,025	2,025	2	2	2	2	2
U	4,34E-03	4,84E-03	4,86E-03	4,50E-03	4,48E-03	4,66E-03	4,58E-03	4,50E-03
U_k (%)	0,43	0,48	0,49	0,45	0,45	0,47	0,46	0,45

Tabela 32 : Fator de abrangência e incerteza expandida em 20 m³

Corridas	Fk 90-20	Fk 360-20	Fk 450-20	Fk 630-20
U_k	2,20E-03	1,92E-03	1,93E-03	1,91E-03
Veff	89	927	734	1120
k	2,03	2	2	2
U	4,47E-03	3,83E-03	3,86E-03	3,81E-03
U_k (%)	0,45	0,38	0,39	0,38

Tabela 33 : Fator de abrangência e incerteza expandida em 30 m³

Corridas	Fk 90-30	Fk 360-30	Fk 450-30	Fk 630-30
U_k	2,04E-03	1,94E-03	1,99E-03	1,93E-03
Veff	222	633	344	669
k	2	2	2	2
U	4,07E-03	3,88E-03	3,97E-03	3,87E-03
U_k (%)	0,41	0,39	0,40	0,39

Corridas	Fk 90-40	Fk 225-40	Fk 270-40	Fk 360-40	Fk 450-40	Fk 540-40	Fk 630-40
U_k	1,91E-03	1,90E-03	1,91E-03	1,85E-03	1,86E-03	1,85E-03	1,87E-03
Veff	1087	1165	892	6186	5871	8278	3480
k	2	2	2	2	2	2	2
U	3,82E-03	3,81E-03	3,81E-03	3,70E-03	3,71E-03	3,70E-03	3,73E-03
U_k (%)	0,38	0,38	0,38	0,37	0,37	0,37	0,37

Tabela 34 : Fator de abrangência e incerteza expandida em 40 m³

4.10 Curva de Tendência do *k-factor*

Utilizou-se o método dos mínimos quadrados para definir qual a melhor curva que representa a relação entre o valor verdadeiro e o valor lido e a variância s^2 para a incerteza do ajuste. Para que pudéssemos avaliar a melhor representação desta relação, foram apresentadas três propostas de equação.

Foram apresentados os polinômios de tendência do *k*-fator, utilizando os polinômios de primeira, segunda e terceira ordem se as incertezas provocadas por cada um deles. Estas equações foram calculadas com os dados adquiridos quando realizamos as calibrações utilizando 10m³, 20m³, 30m³ e 40m³. Com base nestas equações, destes quatro casos bem peculiares, foi analisado o comportamento das curvas e das incertezas.

- Calculado para calibração utilizando 10m³

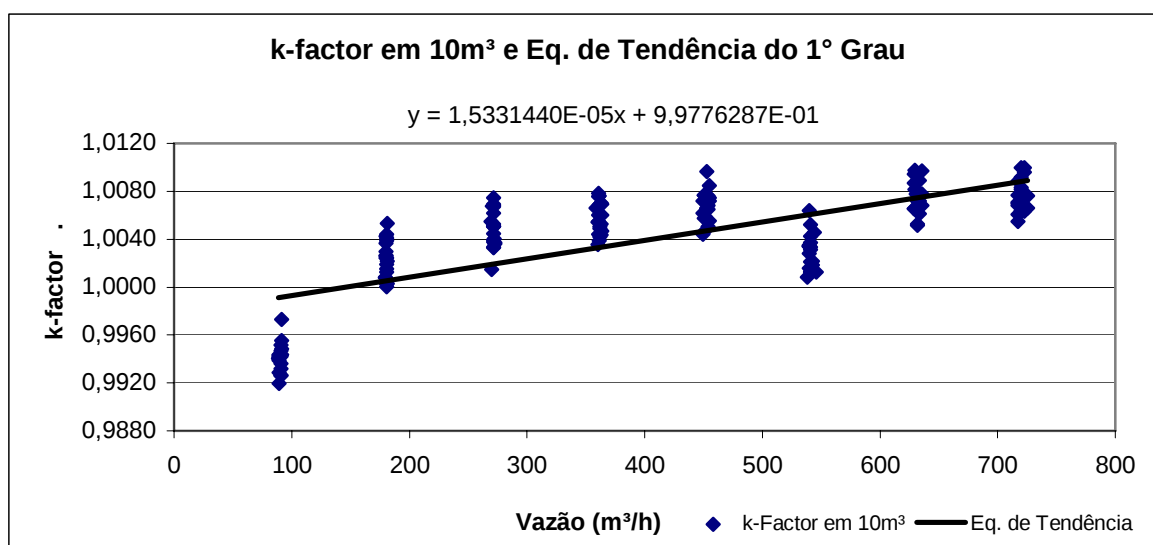


Figura 31: Gráfico da distribuição do *k*-factor em 10m³ e da Equação de tendência do 1º Grau

Polinômio de tendência de 1º Grau do *k*-factor:

$$k\text{-factor} = 1,5331440E-05 \cdot Q + 9,9776287E-01$$

A metodologia utilizada para obtenção da incerteza do polinômio de tendência do *k-factor* foi calculando a variância entre os valores lidos e os calculados pelo polinômio de tendência. Para isto, utilizando a Eq. (27). Utilizamos esta metodologia em todos os polinômios de tendência.

Incerteza do Polinômio de tendência de 1º Grau é de 0,302%

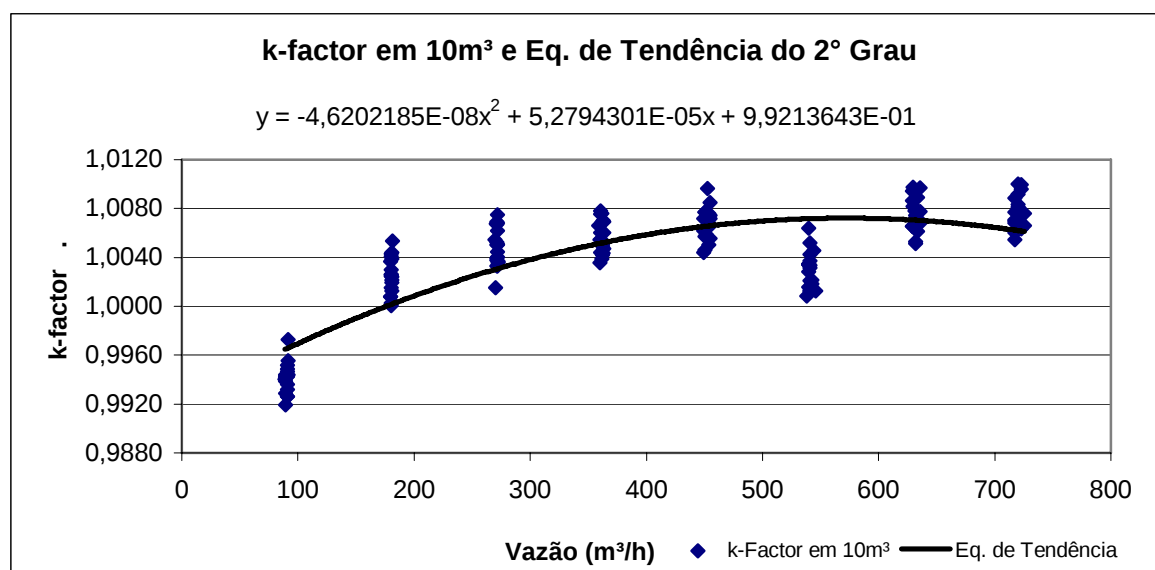


Figura 32: Gráfico da distribuição do *k-factor* em 10m³ e da Equação de tendência do 2º Grau

Polinômio de tendência de 2º Grau do *k-factor*:

$$\text{k-factor} = -4,6202185E-08 \cdot Q^2 + 5,2794301E-05 \cdot Q + 9,9213643E-01$$

Incerteza do Polinômio de tendência de 2º Grau é de 0,248%

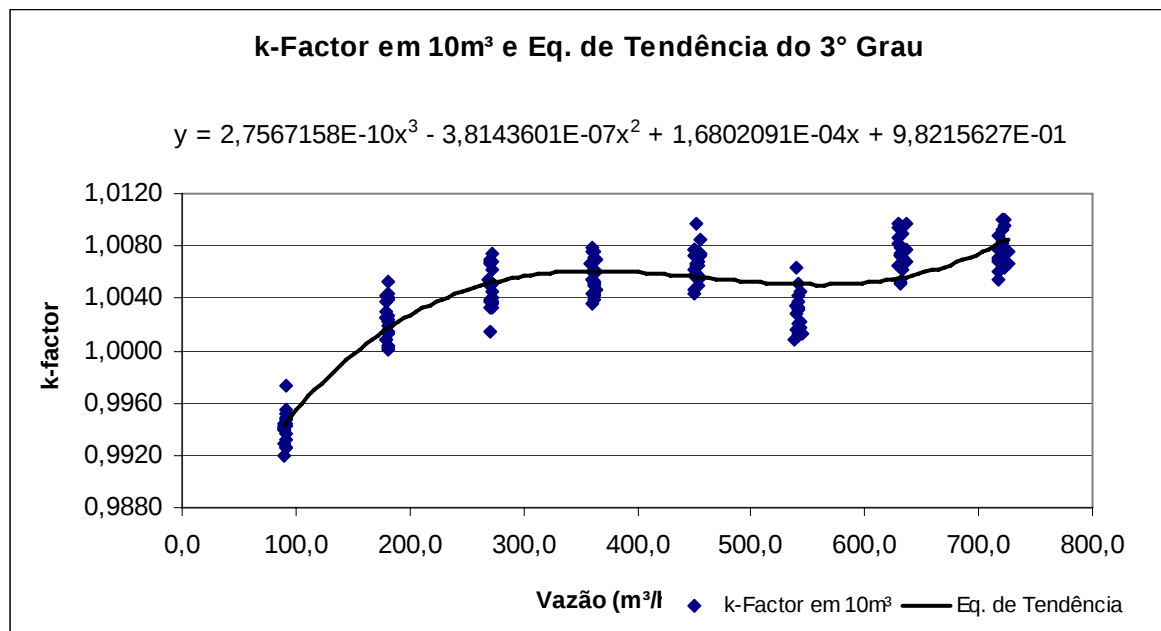


Figura 33: Gráfico da distribuição do k-factor em 10m³ e da Equação de tendência do 3º Grau

Polinômio de tendência de 3º Grau do *k-factor*:

$$\text{k-factor} = 2,7567158E-10 \cdot Q^3 - 3,8143601E-07 \cdot Q^2 + 1,6802091E-04 \cdot Q + 9,8215627E-01$$

Incerteza do Polinômio de tendência de 3º Grau é de 0,178%

- Calculado para calibração utilizando 20m³

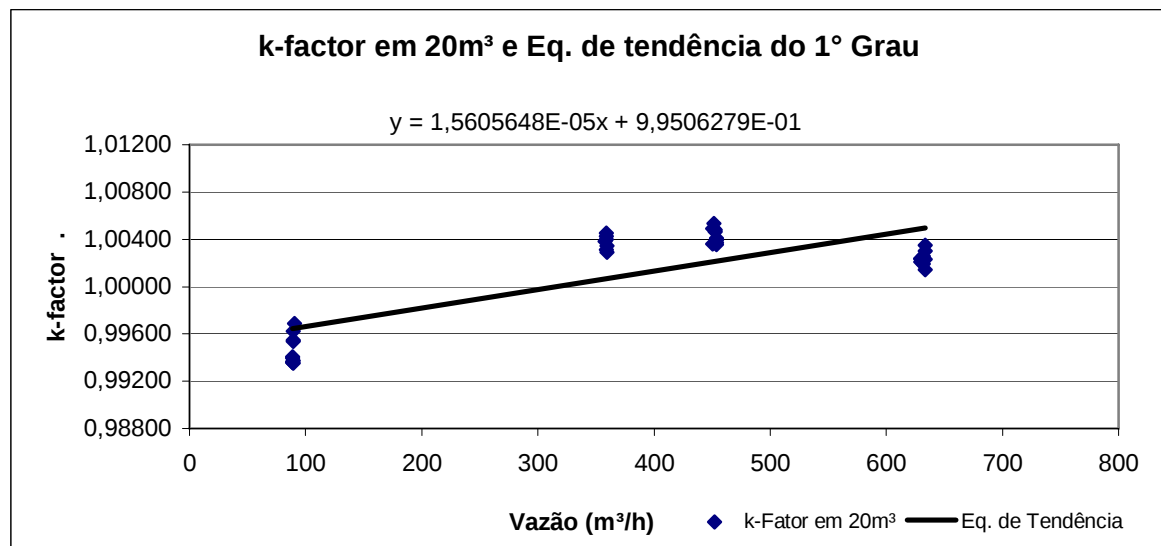


Figura 34: Gráfico da distribuição do k-factor em 20m³ e da Equação de tendência do 1º Grau

Polinômio de tendência de 1º Grau do *k-factor*:

$$k\text{-factor} = 1,5605648E-05 \cdot Q + 9,9506279E-01$$

Incerteza do Polinômio de tendência de 1º Grau é de 0,255%

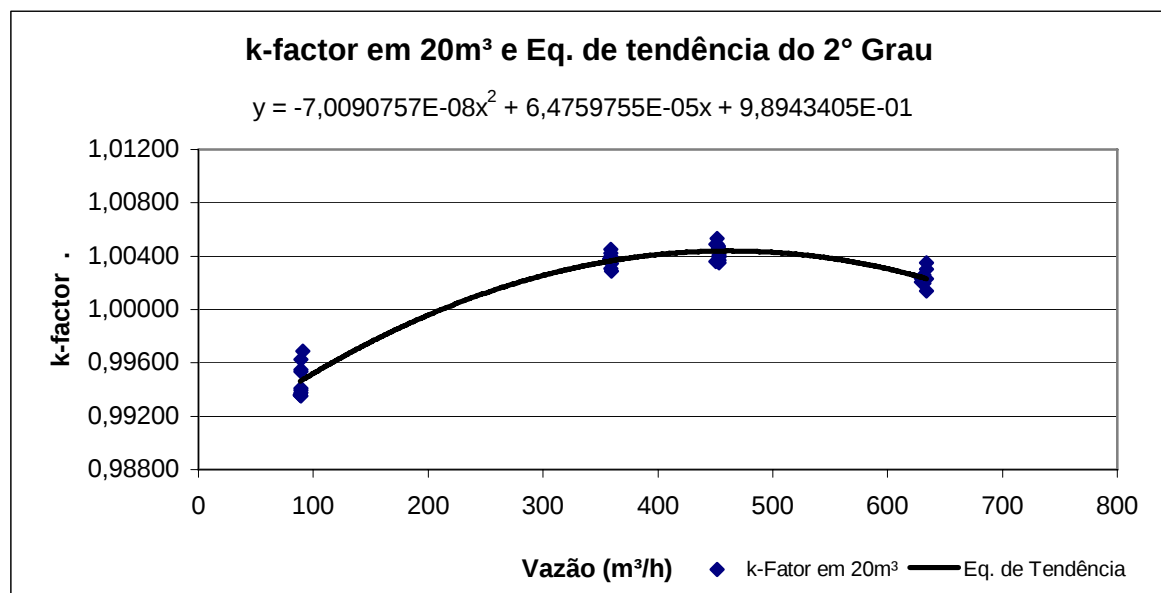


Figura 35: Gráfico da distribuição do k-factor em 20m³ e da Equação de tendência do 2º Grau

Polinômio de tendência de 2º Grau do *k-factor*:

$$k\text{-factor} = -7,0090757E-08*Q^2 + 6,4759755E-05*Q + 9,8943405E-01$$

Incerteza do Polinômio de tendência de 2º Grau é de 0,091 %

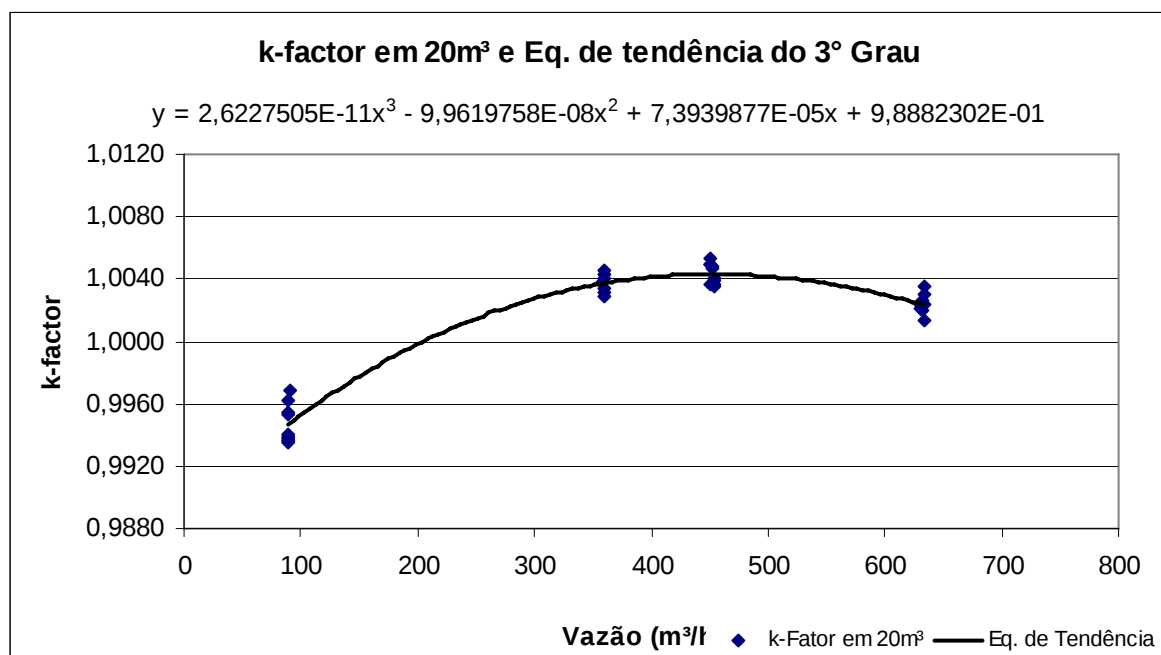


Figura 36: Gráfico da distribuição do k-factor em 20m³ e da Equação de tendência do 3º Grau

Polinômio de tendência de 3º Grau do *k-factor*:

$$\text{k-factor} = 2,6227505E-11 \cdot Q^3 - 9,9619758E-08 \cdot Q^2 + 7,3939877E-05 \cdot Q + 9,8882302E-01$$

Incerteza do Polinômio de tendência de 3º Grau é de 0,079%

- Calculado para calibração utilizando 30m³

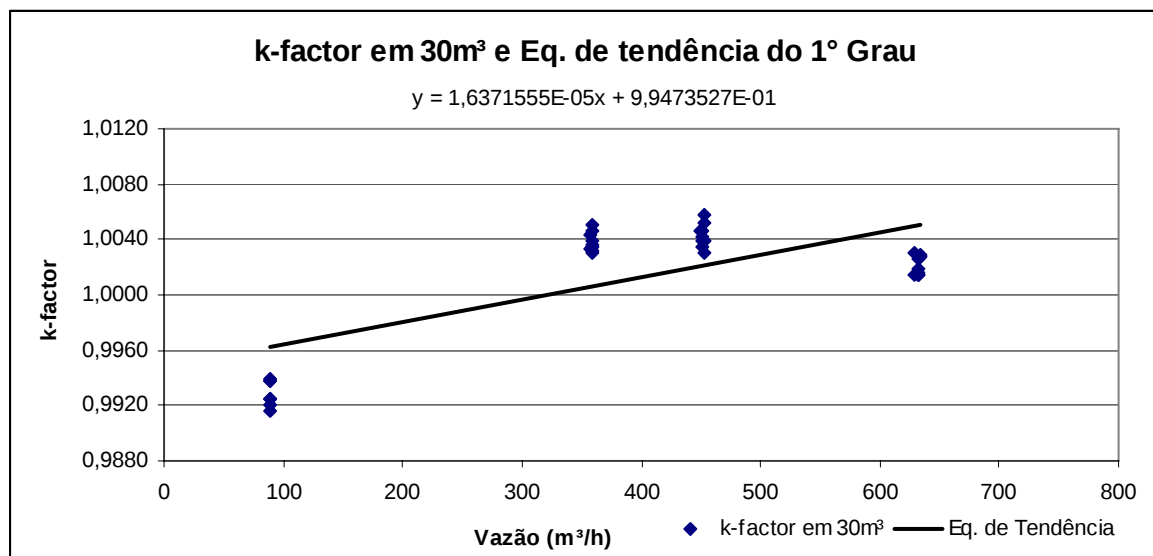


Figura 37: Gráfico da distribuição do k-factor em 30m³ e da Equação de tendência do 1º Grau

Polinômio de tendência de 1º Grau do *k-factor*:

$$k\text{-factor} = 1,6371555E-05 \cdot Q + 9,9473527E-01$$

Incerteza do Polinômio de tendência de 1º Grau é de 0,306 %

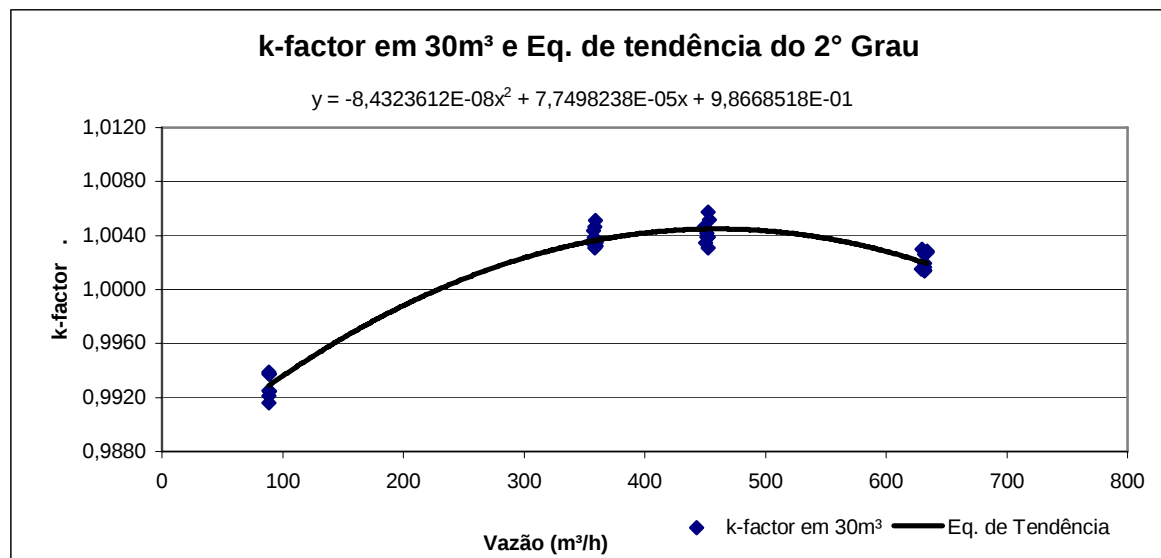


Figura 38: Gráfico da distribuição do k-factor em 30m³ e da Equação de tendência do 2º Grau

Polinômio de tendência de 2º Grau do *k-factor*:

$$k\text{-factor} = -8,4323612E-08*Q^2 + 7,7498238E-05*Q + 9,9473527E-01$$

Incerteza do Polinômio de tendência de 2º Grau é de 0,075%

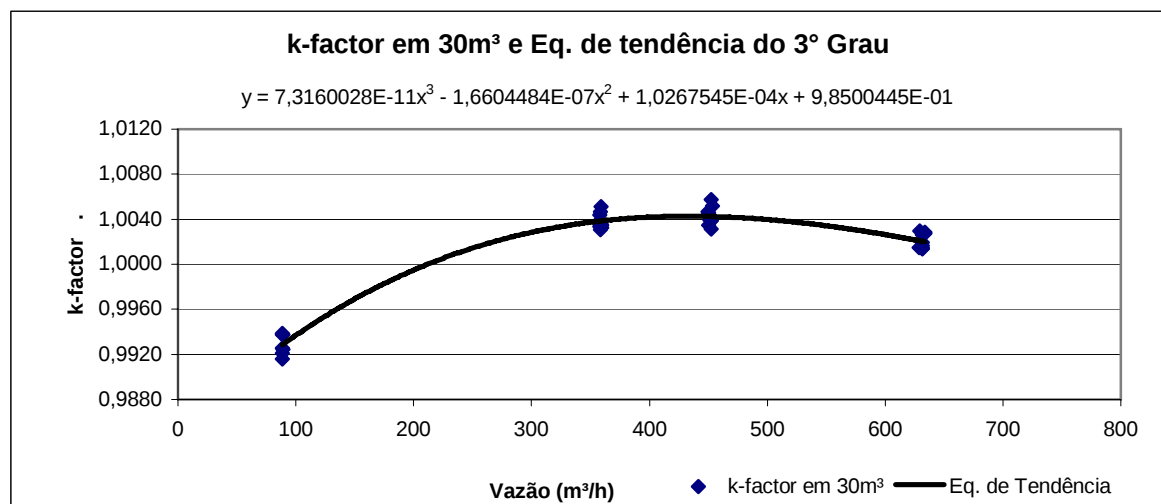


Figura 39: Gráfico da distribuição do k-factor em 30m³ e da Equação de tendência do 3º Grau

Polinômio de tendência de 3º Grau do *k-factor*:

$$\text{k-factor} = 7,3160028E-11 \cdot Q^3 - 1,6604484E-07 \cdot Q^2 + 1,0267545E-04 \cdot Q + 9,8500445E-01$$

Incerteza do Polinômio de tendência de 3º Grau é de 0,073%

- Calculado para calibração utilizando 40m³

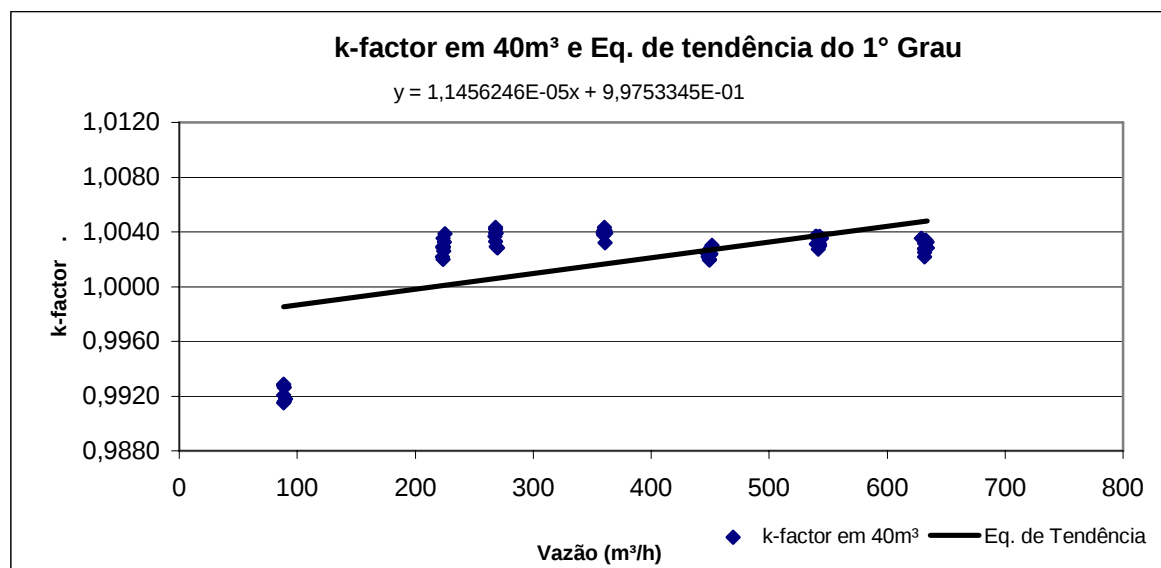


Figura 40: Gráfico da distribuição do k-factor em 40m³ e da Equação de tendência do 1º Grau

Polinômio de tendência de 1º Grau do *k-factor*:

$$k\text{-factor} = 1,1456246E-05 \cdot Q + 9,9753345E-01$$

Incerteza do Polinômio de tendência de 1º Grau é de 0,291%

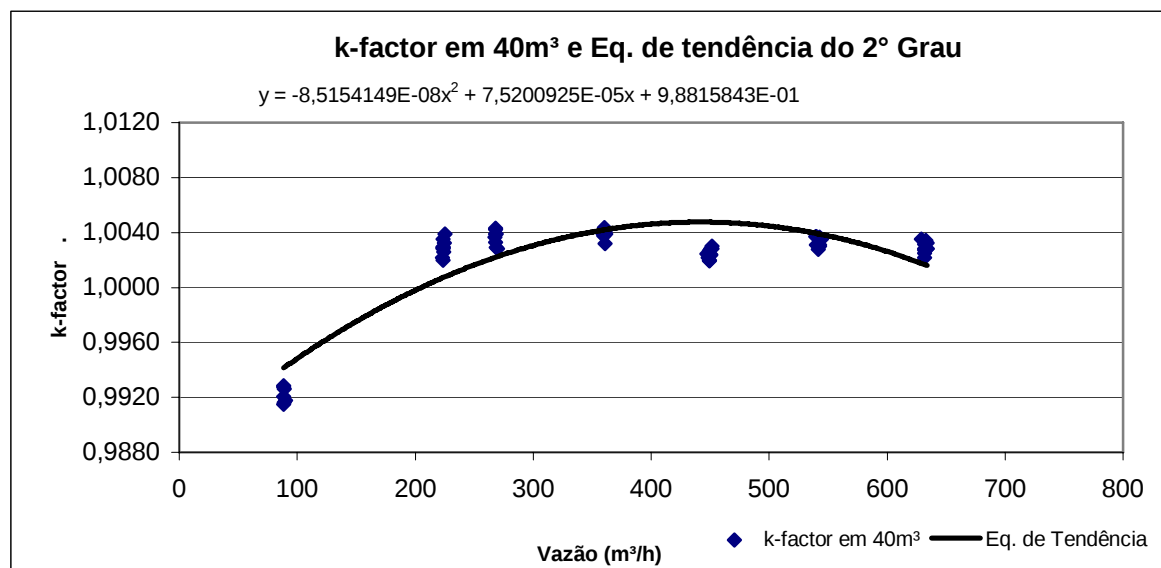


Figura 41: Gráfico da distribuição do k-factor em 40m³ e da Equação de tendência do 2º Grau

Polinômio de tendência de 2º Grau do *k-factor*:

$$k\text{-factor} = -8,5154149E-08*Q^2 + 7,5200925E-05*Q + 9,8815843E-01$$

Incerteza do Polinômio de tendência de 2º Grau é de 0,168%

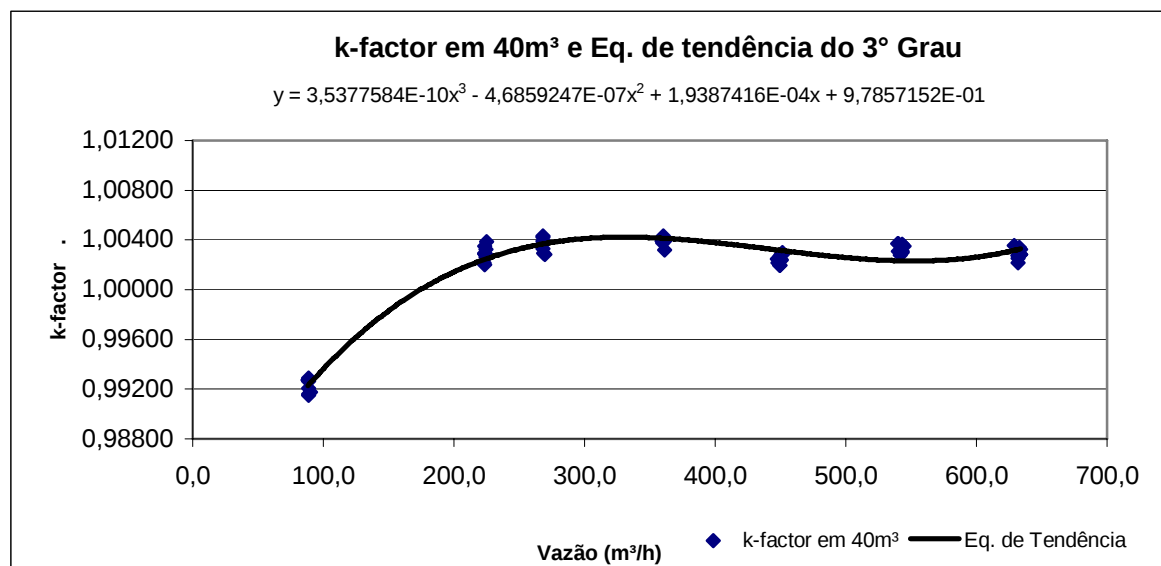


Figura 42: Gráfico da distribuição do k-factor em 40m³ e da Equação de tendência do 3º Grau

Polinômio de tendência de 3º Grau do *k-factor*:

$$\text{k-factor} = 3,5377584E-10 \cdot Q^3 - 4,6859247E-07 \cdot Q^2 + 1,9387416E-04 \cdot Q + 9,7857152E-01$$

Incerteza do Polinômio de tendência de 3º Grau é de 0,069%

4.11 Determinação da Incerteza Expandida utilizando o Polinômio de Tendência

A incerteza expandida U é definida como um intervalo em torno do resultado da medição com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando, conforme comentado no item 4.9.

Deste modo, a incerteza expandida U será a multiplicação do fator de abrangência k_{PT} pela incerteza combinada das influências de P, V e T e do polinômio de tendência nos volumes testados, ou seja:

$$u^2 = u_{PT}^2 + u_c^2 \quad (53)$$

e

$$U = k_{PT} * u \quad (54)$$

Deste modo, apresentaremos os valores de U , k_{PT} e u nas Tabelas 35, 36 e 37.

Tabela 35 : Incerteza expandida utilizando o polinômio de 1º Grau

Volume (m³)	u_c (%)	u_{PT} (%) - Eq. do 1º Grau	u (%)	k_{PT}	U (%)
10	0,182	0,302	0,353	2	0,705
20	0,182	0,255	0,313	2,07	0,649
30	0,182	0,306	0,356	2,07	0,737
40	0,182	0,291	0,343	2,05	0,704

Tabela 36 : Incerteza expandida utilizando o polinômio de 2º Grau

Volume (m³)	u_c (%)	u_{PT} (%) - Eq. do 2º Grau	u (%)	k_{PT}	U (%)
10	0,182	0,248	0,308	2	0,615
20	0,182	0,091	0,203	2,07	0,421
30	0,182	0,075	0,197	2,07	0,407
40	0,182	0,168	0,248	2,05	0,508

Tabela 37 : Incerteza expandida utilizando o polinômio de 3° Grau

Volume (m ³)	u_c (%)	u_{PT} (%) - Eq. do 3° Grau	u (%)	k_{PT}	U (%)
10	0,182	0,178	0,255	2	0,509
20	0,182	0,079	0,198	2,07	0,411
30	0,182	0,073	0,196	2,07	0,406
40	0,182	0,069	0,195	2,05	0,399

4.12 Análise Final das Incertezas

Ao analisarmos o comportamento da incerteza abordada no Item 4.9 e no Item 4.11, observamos que os valores das incertezas quando calculados pontualmente estão bem próximos dos valores calculados quando utilizamos o polinômio de tendência. Em ambos os casos a incerteza de medição tem seu menor valor quando passamos 40 m³ pelo medidor em teste.

A melhor representação matemática do comportamento do *k-factor* ocorre quando apresentamos um polinômio de tendência de terceira ordem, quando passamos 40 m³ de fluido pelo medidor em teste. Este polinômio relaciona o volume observado e o volume verdadeiro convencional, dentro da faixa de utilização da turbina.

Ao utilizarmos a melhor representação matemática do comportamento do *k-factor*, chegamos a uma incerteza expandida de 0,399 % , ou seja 0,40%. Observando a incerteza expandida apresentada, analisamos quais os fatores que mais contribuíram para esse valor. Para isso, verificamos a contribuição da incerteza do polinômio estimador do Fator K da turbina master de 6” e dos parâmetros do processo P, V e T (que associados, determinam a incerteza u_c).

Verificamos pela Tabela 37 e pela Fig. 43 que o polinômio de tendência possui uma contribuição praticamente 3 vezes menor que a incerteza u_c provocada pelos para V, P e T (para um volume de 40m³). Deste modo, devemos nos concentrar em avaliar quais os componentes de incerteza que contribuem para o valor da Incerteza u_c .

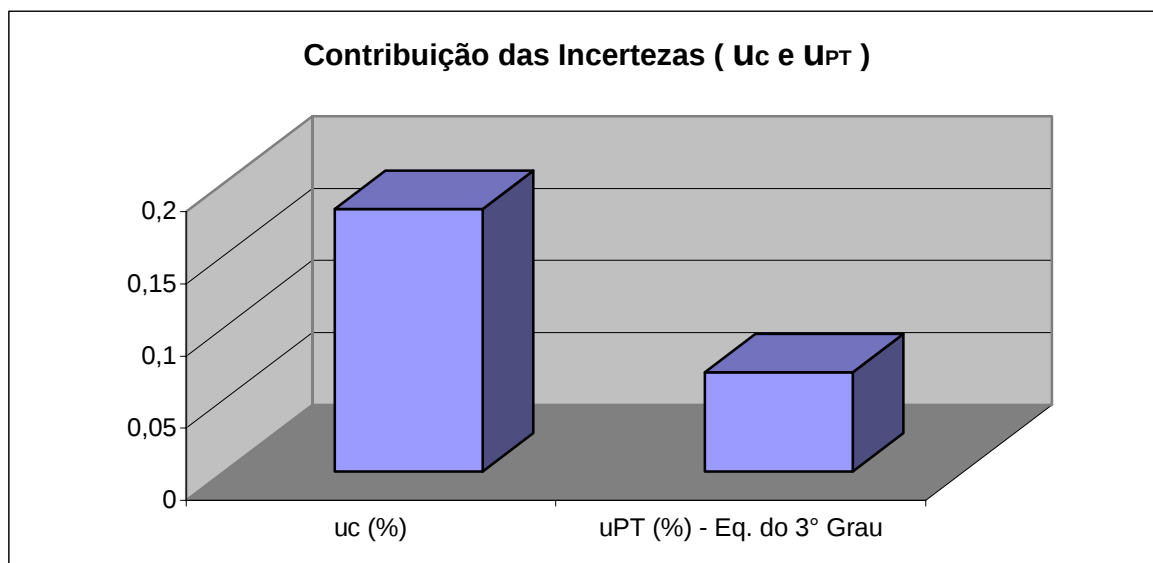


Figura 43 : Contribuição da incerteza u_c e u_{PT} na incerteza final

Ao analisarmos as incertezas que P, V e T, que são as que contribuem para determinação de u_c , verificamos, com auxílio da Fig. 44, que a incerteza provocada pelo Volume da Turbina Master é de uma ordem muito superior às demais.

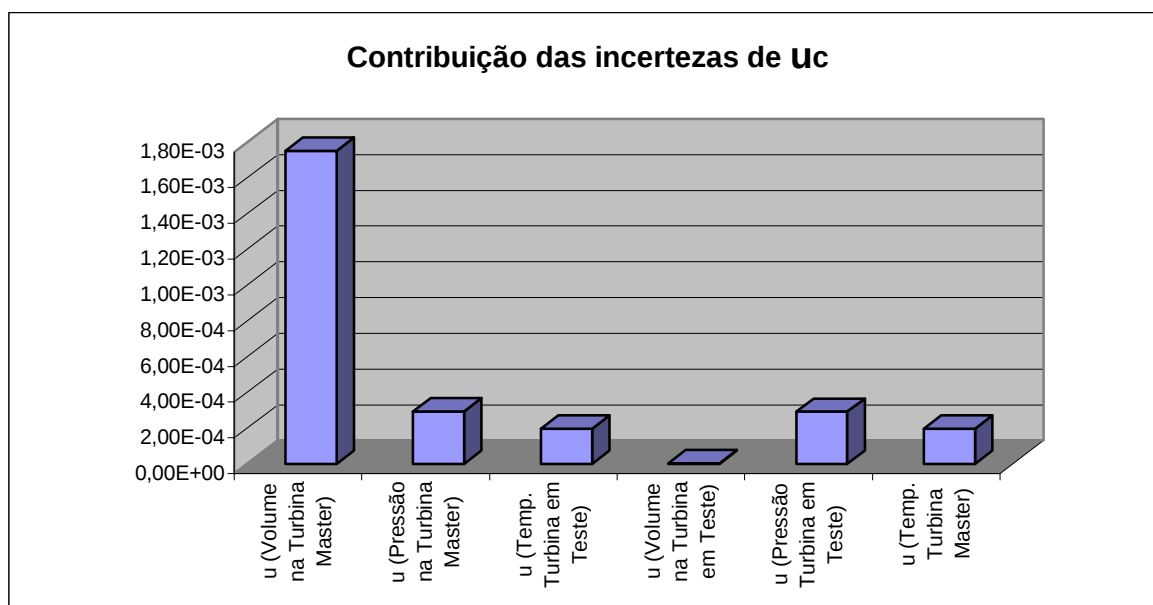


Figura 44 : Módulo das incertezas que contribuem para a obtenção de u_c multiplicado pelos coeficientes de sensibilidade

A Fig. 44 nos apresenta de forma clara que, para diminuirmos a incerteza final, precisamos diminuir a incerteza provocada pela Turbina Master, ou seja o padrão de medição de volume da bancada de calibração é o que mais contribui para a incerteza.

Para que possamos avaliar a incerteza da turbina master, e se de alguma forma podemos diminuí-la, iremos analisar as incertezas do certificado de calibração do IPT e do Polinômio estimador inserido no software aplicativo da bancada de calibração, que combinados, chegamos ao valor final da incerteza da turbina master. Estes valores podem ser observados na Fig. 45.

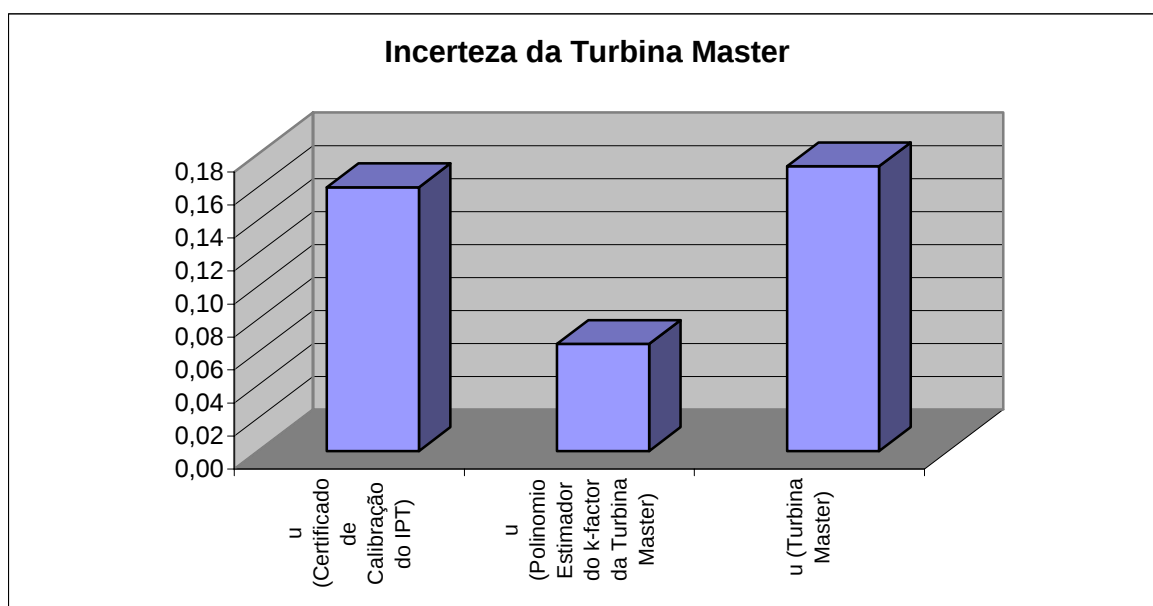


Figura 45 : Incertezas que compõem a incerteza da master e a incerteza final da Turbina Master

A incerteza elevada na turbina master nos leva a refletir sobre a incerteza fornecida no certificado de calibração do IPT, onde a Incerteza combinada da Turbina master, U_{TM} é igual a 0,32 %.

Apesar da Incerteza expressiva da turbina master, chegamos ao final deste estudo relatando em seu melhor caso uma incerteza combinada de $U_{k-factor} = 0,40\%$ para os testes realizados. Como o IPT é o único laboratório prestador de serviço acreditado pelo Inmetro, nesta faixa, devemos analisar o porque desta incerteza junto com este Laboratório e estudarmos uma maneira para que possamos melhorar a capacidade de medição do master da bancada utilizada.