

AUDITORIAS A ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS GERIDAS PELA INFRAQUINTA, E.M.

Relatório Final

Volume I – Estações elevatórias do sistema de abastecimento de água

Estudo realizado para Infraquinta, Empresa de Infraestruturas da Quinta
do Lago, E.M.

- Julho 2016 –

Relatório CERIS

EP nº 25/2016





AUDITORIAS A ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS GERIDAS PELA INFRAQUINTA, E.M.

Relatório Final

Volume I – Estações elevatórias do sistema de abastecimento de água

Estudo realizado para Infraquinta, E.M.

- Julho 2016 –

Relatório CERIS

EP nº 25/2016

Equipa Técnica

Professora Dídia Isabel Cameira Covas

Doutora Laura Pinto Monteiro

Doutor Nuno Miguel Martins

Eng.º João Nuno Delgado

Eng.ª Aisha Mamade



ÍNDICE

ÍNDICE	1
1 INTRODUÇÃO.....	3
2 METODOLOGIA	4
2.1 Etapas da metodologia	4
2.2 Levantamento de dados e trabalhos preparatórios (Etapa 1)	4
2.3 Realização de campanhas de medição (Etapa 2)	5
2.4 Processamento e análise das medições (Etapa 3)	10
2.5 Elaboração do relatório e das recomendações finais (Etapa 4)	11
3 ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS AUDITADAS	12
3.1 Introdução	12
3.2 Descrição da EE associada ao Reservatório Principal.....	13
3.3 Auditoria ao grupo eletrobomba de maior dimensão B3	15
3.4 Auditoria aos grupos de menor dimensão	19
Curvas do fabricante	19
Auditoria ao grupo eletrobomba B4.....	20
Auditoria ao grupo eletrobomba B6.....	23
Auditoria ao grupo eletrobomba B7	26
Comparação de resultados	29
4 APRECIÇÃO FINAL.....	31
Eficiência dos grupos eletrobomba	31
Configuração da estação elevatória.....	31

Reservatório de abastecimento	32
ANEXO 1 – FICHAS TÉCNICAS	33
Ficha Técnica 1. Estação elevatória associada ao reservatório principal	35
Ficha Técnica 2. Estação elevatória de Pinheiros Altos (AA).....	44

1 INTRODUÇÃO

O presente documento tem como objetivo apresentar os resultados do estudo “Auditoria a estações elevatórias geridas pela InfraQuinta, E.M.” relativos às estações elevatórias do sistema de abastecimento de água.

O sistema de abastecimento de água da InfraQuinta inclui duas estações elevatórias (EE): uma EE associada ao Reservatório Principal e a EE de Pinheiros Altos, também localizada no recinto do reservatório, mas em edifício autónomo. A EE do Reservatório Principal é constituída por sete grupos eletrobomba dispostos em paralelo, abastecendo a maior parte do sistema de distribuição da Infraquinta. A EE de Pinheiros Altos inclui quatro grupos eletrobomba, também instalados em paralelo. Apenas a EE do Reservatório Principal foi objeto de auditoria pelo Instituto Superior Técnico, uma vez que a EE de Pinheiros Altos será remodelada no curto prazo, não se justificando o aproveitamento dos grupos eletrobomba.

Os estudos consistiram na realização de campanhas de medição de diversos parâmetros de funcionamento dos grupos eletrobomba – caudal, pressões a montante e a jusante dos grupos eletrobomba, e potências ativa e reativa – e na posterior análise dos dados recolhidos. Os resultados permitiram determinar as curvas características das bombas auditadas, bem como as curvas de potência e de rendimento.

O documento inclui também fichas técnicas com as principais características das duas estações elevatórias. Nas fichas são apresentadas as características principais de cada EE e as curvas das bombas fornecidas pelo fabricante e as determinadas nesta auditoria.

2 METODOLOGIA

2.1 Etapas da metodologia

A metodologia adotada para o estudo das estações elevatórias de águas e águas residuais é constituída por quatro etapas conforme Figura 1.

A metodologia adotada baseia-se na realização de campanhas de medição *in situ* e na análise e processamento de dados *a posteriori*, sendo constituída pelas etapas principais que se descrevem nos parágrafos seguintes.

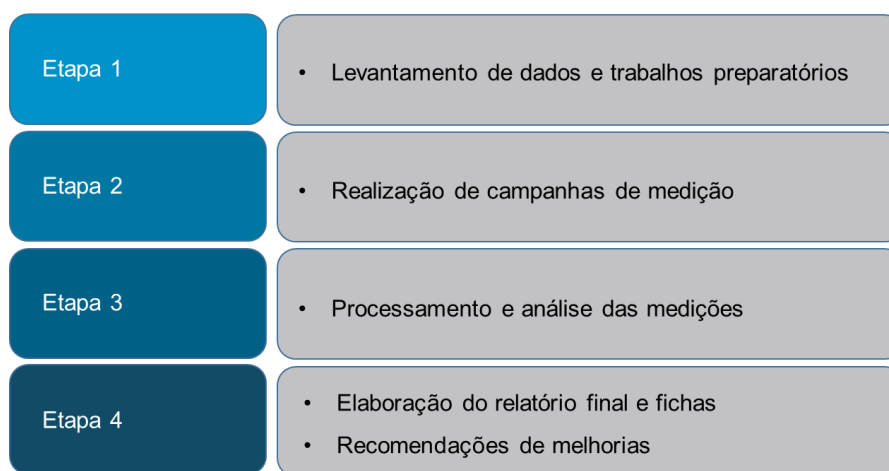


Figura 1. Metodologia adotada para o estudo das estações elevatórias da InfraQuinta E.M

2.2 Levantamento de dados e trabalhos preparatórios (Etapa 1)

Foi efetuado previamente um levantamento e verificação das características das estações elevatórias com base em informação disponibilizada pela Infraquinta, E.M, nomeadamente:

- Componentes do sistema elevatório e descrição dos esquemas de funcionamento hidráulico (número de grupos eletrobomba, instalação em paralelo ou série, modelo de cada grupo, características nominais e ano de instalação).
- Principais modos de funcionamento (número de grupos eletrobomba a funcionar em paralelo/série e velocidade(s) de rotação).
- Características dos poços de bombagem ou dos reservatórios (cotas, volumes, área e níveis de funcionamento).

Este levantamento foi seguido de uma visita técnica às EE, onde foram identificados os pontos para instalação de transdutores, caudalímetro e analisador de energia.

2.3 Realização de campanhas de medição (Etapa 2)

A campanha de medições realizada na estação elevatória associada ao reservatório principal consistiu na medição e aquisição de dados de caudal, pressão a montante e a jusante dos grupos eletrobomba e potências ativa e reativa consumidas relativos a cada grupo eletrobomba auditado, recorrendo a diferentes equipamentos. O sistema de medição e aquisição de dados é composto por:

- Instrumentação de medição, nomeadamente, um caudalímetro ultrassónico não intrusivo, um sensor ultrassónico de nível, dois transdutores de pressão e um transdutor de tensão e corrente elétrica (Figura 2).
- Uma plataforma portátil para aquisição de dados recebidos dos instrumentos de medição.
- Um computador portátil para monitorização e aquisição dos dados.



Figura 2. Equipamento utilizado nas campanhas de medição (a) caudalímetro ultrassónico, (b) transdutor de pressão, (c) analisador de potência e (d) pinças amperimétricas.

O caudal foi medido no ramal a montante de cada grupo com um caudalímetro ultrassónico não intrusivo Dynasonics DXN (Figura 2a). De acordo com o fabricante, este equipamento tem uma

incerteza na medição de 1%, para medições efetuadas de acordo com condições ideais indicadas pelo fabricante (Figura 3). Uma vez que nas EE a auditar não foram garantidas as condições ideais de instalação do caudalímetro, o IST estimou uma curva de incerteza, em condições laboratoriais, de acordo com a qual a incerteza associada à medição varia com o caudal (Figura 4). Esta curva foi posteriormente usada no tratamento dos dados recolhidos.

Piping Configuration and Transducer Positioning	Upstream Pipe Diameters	Downstream Pipe Diameters
	*	**
	24	5
	14	5
	10	5
	10	5
	10	5
	24	5

Figura 3. Condições ideais de medição do caudalímetro ultrassónico não intrusivo Dynasonics DXN.
Retirado do manual de operação do equipamento de medição.

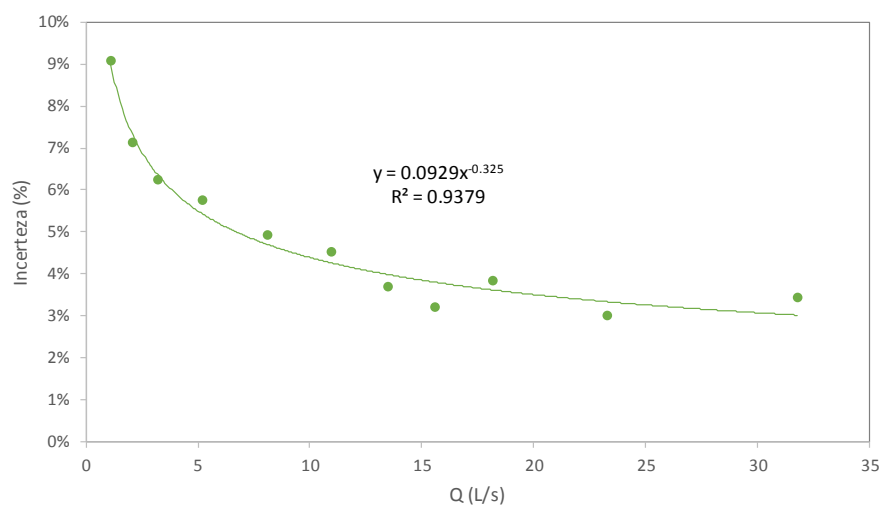


Figura 4. Incerteza do caudalímetro ensaiado em condições ideais de laboratórios
(intensidade do sinal 87%)

A pressão hidráulica foi medida a montante e a jusante das bombas usando dois transdutores de pressão Wika PDS-31 (Figura 2b), com uma escala de medição de 0.0-2.5 bar e 0.0-6.0 bar, respetivamente. Os transdutores foram instalados na conduta principal a montante de todos os grupos e na flange de jusante de cada grupo eletrobomba. A incerteza associada às medições de pressão é inferior a 0.5% da pressão máxima da escala de medição, ou seja 0.125 m e 0.30 m para os transdutores 2.5 bar e 6.0 bar, respetivamente.

As potências ativa e reativa foram medidas a montante do variador de velocidade de cada grupo utilizando um analisador de potência Lovato Electric DMG800 (Figura 2c). A obtenção destas grandezas foi efetuada através da medição da tensão composta no barramento das três fases e da medição da corrente em cada fase (L1, L2, L3) a montante do variador de velocidade ou das proteções térmicas dos grupos eletrobombas. A incerteza associada à medição de potência ativa e reativa é da ordem de 1% dos valores medidos.

Para cada grupo eletrobomba auditado o caudal bombeado foi regulado através do fechamento manual da válvula de seccionamento a jusante do grupo Figura 5b. Todas as medições relativas ao mesmo grupo eletrobomba foram realizadas em simultâneo durante um período de 30 s e com uma frequência de aquisição de 1000 Hz para cada caudal ensaiado, utilizando uma plataforma portátil de aquisição dos dados recebidos dos instrumentos de medição. Para cada medição efetuada, foram calculados os valores médios e desvios padrão, referente às condições de aquisição referidas.

Apresentam-se fotografias da realização da campanha na Figura 5, das medições de caudal e de pressão efetuadas nos ramais dos grupos na Figura 6 e de medições realizadas com o analisador de energia nos dois quadros elétricos na Figura 7.



Figura 5 – Campanha de medições na EE associada ao reservatório principal

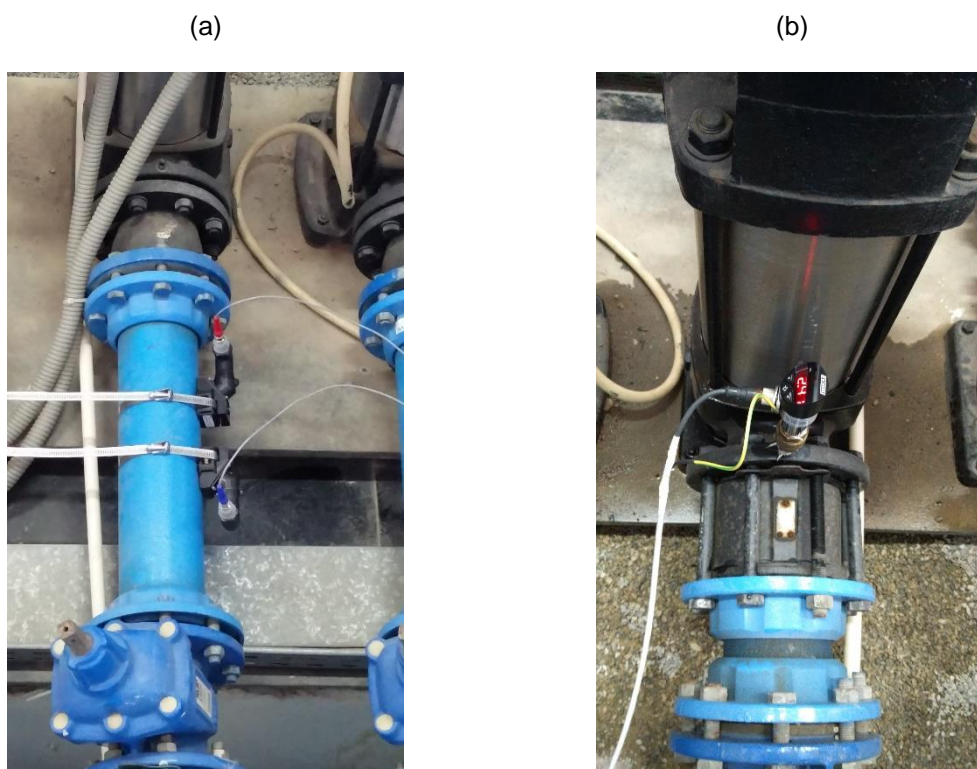


Figura 6 – Medições de: (a) caudal no ramal e (b) pressão a jusante do grupo eletrobomba

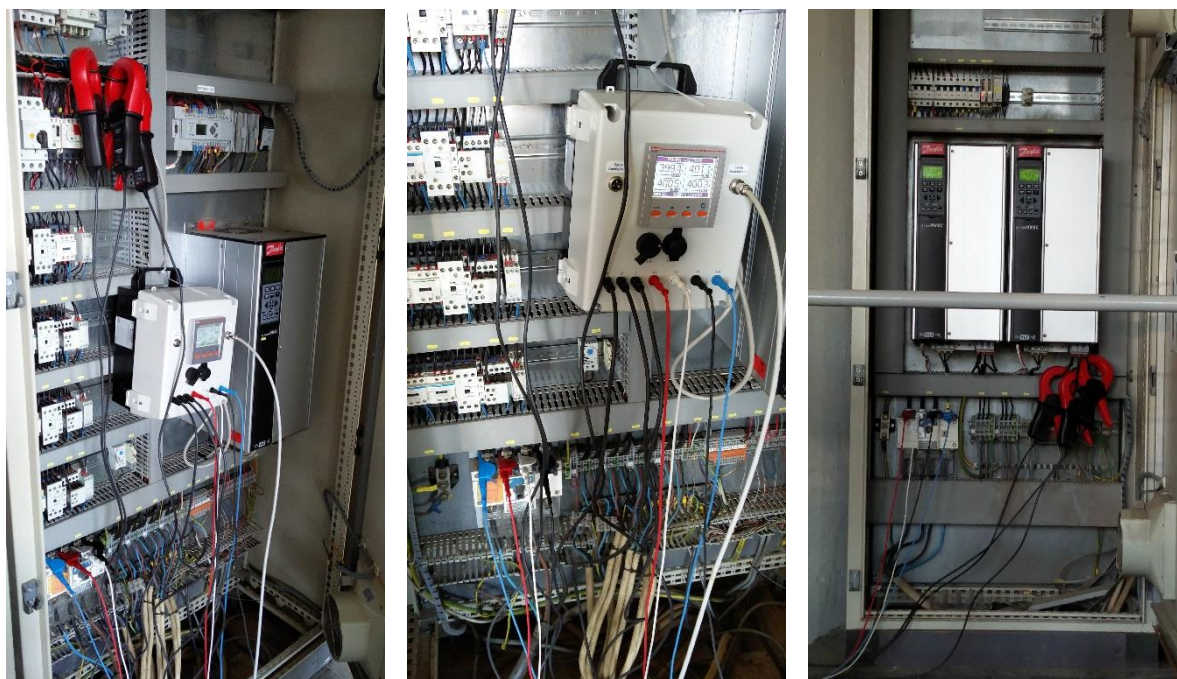


Figura 7 – Medições de potência nos quadros elétricos

2.4 Processamento e análise das medições (Etapa 3)

Conforme referido, durante as auditorias foram realizadas medições dos seguintes parâmetros:

- caudal no ramal do grupo eletrobomba, Q ;
- pressão a montante do grupo na conduta principal de alimentação, p_m ;
- pressão a jusante do grupo na flange de saída, p_j ;
- potência elétrica ativa, P_{el} ;
- potência elétrica reativa, Q_{el} .

Com base nas medições de pressão a montante e a jusante, determinou-se a altura de elevação do grupo eletrobomba ensaiado através de:

$$H_t = \frac{p_j - p_m}{\gamma} \quad (1)$$

sendo H_t , a altura de elevação do grupo (m c.a.), p_m , a pressão a montante (Pa), p_j , a pressão a jusante (Pa), e γ , o peso volúmico da água (9800 N/m³). De salientar que se desprezaram os termos cinéticos da carga hidráulica assim como a diferença de cotas dos transdutores de pressão, face à incerteza na medição dos transdutores (0.125 e 0.30 m para os transdutores de montante e de jusante, respetivamente).

Com base na medição de caudal e na altura de elevação do grupo eletrobomba, obteve-se a potência hidráulica do escoamento:

$$P_h = \gamma Q H_t \quad (2)$$

sendo P_h , a potência hidráulica do escoamento (W) e Q , o caudal (m³/s).

A potência elétrica aparente pode ser calculada por:

$$S_{el} = \sqrt{P_{el}^2 + Q_{el}^2} \quad (3)$$

sendo S_{el} , a potência elétrica aparente (VA), P_{el} , a potência elétrica ativa (W), Q_{el} , a potência elétrica reativa (VAR).

O rendimento global do grupo eletrobomba pode ser calculado por:

$$\eta = \frac{P_h}{P_{el}} \quad (4)$$

O fator de potência pode ser obtido através de:

$$\cos \varphi = \frac{P_{el}}{S_{el}} \quad (5)$$

sendo $\cos \varphi$, o fator de potência (-).

Admitindo que a tensão fase a fase tem o valor constante de 400 V, pode-se determinar a corrente elétrica do grupo eletrobomba através de:

$$I_{RMS} = \frac{P_{el}}{\sqrt{3}U_{RMS} \cos \varphi} \quad (6)$$

sendo I_{RMS} , o valor eficaz da corrente elétrica (A) e U_{RMS} , o valor eficaz da tensão fase a fase (diferença de potencial) (V).

Os dados recolhidos nas campanhas foram tratados e analisados. Foram obtidas as curvas características caudal-altura de elevação, caudal-potência elétrica e caudal-rendimento de cada grupo eletrobomba auditado.

Aos dados de caudal foi aplicada uma curva de incerteza, previamente determinada em laboratório. Por essa razão, a curva característica caudal-altura de elevação inclui uma banda de incerteza. Contudo, as condições locais de instalação do equipamento também influenciam a qualidade da medição, pelo que a incerteza associada aos valores apresentados poderá ser superior.

As curvas obtidas foram comparadas com as fornecidas pelo fabricante. Foi obtida uma função de regressão para cada uma das curvas obtidas experimentalmente.

2.5 Elaboração do relatório e das recomendações finais (Etapa 4)

A etapa final deste estudo consiste na elaboração do presente relatório, onde se inclui uma descrição da estação elevatória auditada bem como toda a informação relevante obtida, nomeadamente as curvas características, de potência elétrica e de rendimento obtidas durante as auditorias.

É efetuada uma apreciação das características de cada grupo eletrobomba através da comparação das medições efetuadas com as características fornecidas pelo fabricante. Incluem-se, ainda, recomendações finais sobre o esquema hidráulico e as prioridades de intervenção.

As fichas técnicas em anexo contêm uma síntese dos dados relativos às EE e aos grupos eletrobomba instalados.

3 ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS AUDITADAS

3.1 Introdução

O presente estudo tinha como objetivo a auditoria de duas estações elevatórias do sistema de abastecimento água da Infraquinta, nomeadamente, a EE associada ao Reservatório Principal e a EE de Pinheiros Altos, no entanto esta última EE não foi auditada pelas razões que se passam a explicar. Está prevista a remodelação a curto prazo das duas EE atrás referidas por forma a alterar a configuração da rede de distribuição, dividindo-a em dois setores com pressões distintas.

Atualmente, a EE de Pinheiros Altos é constituída por três grupos eletrobomba (+1 de reserva) iguais, instalados em paralelo, com variador de frequência e com altura de elevação nominal igual a 57.2 m. Para as novas condições de funcionamento será necessária uma altura de elevação nominal de 15 m, atingível com o variador de frequência, mas não com as melhores eficiências dos grupos. Neste contexto, a InfraQuinta decidiu substituir os quatro grupos existentes, sendo a configuração e constituição da EE de Pinheiros Altos completamente remodeladas entre 2016 e 2017. Uma vez que os grupos eletrobomba atuais têm características muito diferentes dos necessários para as condições de funcionamento pretendidas, não sendo aproveitados para a nova EE, foi decidido pela equipa do IST em conjunto com a Infraquinta não auditar esta EE.

A EE associada ao Reservatório principal também será objeto de remodelação, no entanto, pretende-se avaliar a possibilidade de manter os grupos eletrobomba com melhor eficiência. Assim, procedeu-se à auditoria de quatro dos sete grupos desta EE, considerando que estes seriam representativos dos restantes grupos instalados.

Apresenta-se no Quadro 1 a síntese das características das duas EE de abastecimento de água.

Quadro 1. Características das estações elevatórias (dados do fabricante)

Designação	N.º de grupos	ID do grupo	Marca/Modelo	Q_N^1 (l/s)	H_N^1 (m)	Rendimento nominal ³ (%)	P_N^1 (kW)	Data da auditoria
EE associada ao Reservatório principal	(2+1) (3+1)	B1	Grundfos CR 90-3-2 ²	25	48.08	60.1	18.5	31 maio e 1 junho
		B2 e B3	Grundfos CR 90-2-2	25	27.0	61.4	11.0	
		B4 a B7	Grundfos CR 60-30	16.7	30.2	60.0	7.5	
		B8	Grundfos CR60-30	17.8	29.1	62.5	7.5	
EE de Pinheiros Altos	3+1	1 a 4	Grundfos CRE 45-2 AFAE-HQQE	15.0	57.2	68	15.0	Não foi auditada

Nota: ¹ As características nominais referem-se a cada grupo eletrobomba.

² Foi removido um impulsor deste grupo eletrobomba.

³ Não corresponde ao rendimento máximo.

3.2 Descrição da EE associada ao Reservatório Principal

A EE associada ao Reservatório Principal foi auditada pela equipa do IST nos dias 31 de maio e 1 de junho de 2016. A equipa da InfraQuinta acompanhou e colaborou na realização da referida auditoria. Na Figura 8 apresenta-se uma vista geral do exterior e interior do edifício da EE que se encontra associado às duas células do reservatório Principal.



Figura 8 – Vista geral da EE associada ao Reservatório Principal

A EE é constituída por dois conjuntos de grupos eletrobomba instalados em paralelo (Figura 9 e Figura 10) e um de reserva:

- Grupos eletrobomba B1 a B3 (2+1) de maior potência, modelo CR 90 (B2,B3) e CR 90-2 (B1);
- Grupos eletrobomba B4 a B7 (3+1) de menor potência, modelo CR 60-30;
- Grupo eletrobomba 8 (não instalado, de reserva).

A companhia de medições consistiu na auditoria a quatro dos sete grupos eletrobomba instalados, nomeadamente um grupo eletrobomba representativo dos grupos de maior potência (B3) e três dos grupos de menor potência (B4, B6 e B7). Os grupos foram ensaiados para o funcionamento em modo manual (i.e., variador de frequência desligado) e com a velocidade de rotação nominal. Não foi possível auditar o grupo B2, uma vez que não se conseguia controlar o variador de velocidades, passando a modo manual. O impulsor do grupo B1 foi alterado porque estava a ocorrer cavitação, não sendo

representativo dos grupos de maior dimensão, razão pela qual também não foi auditado. Apresentam-se os resultados das auditorias nas secções seguintes.

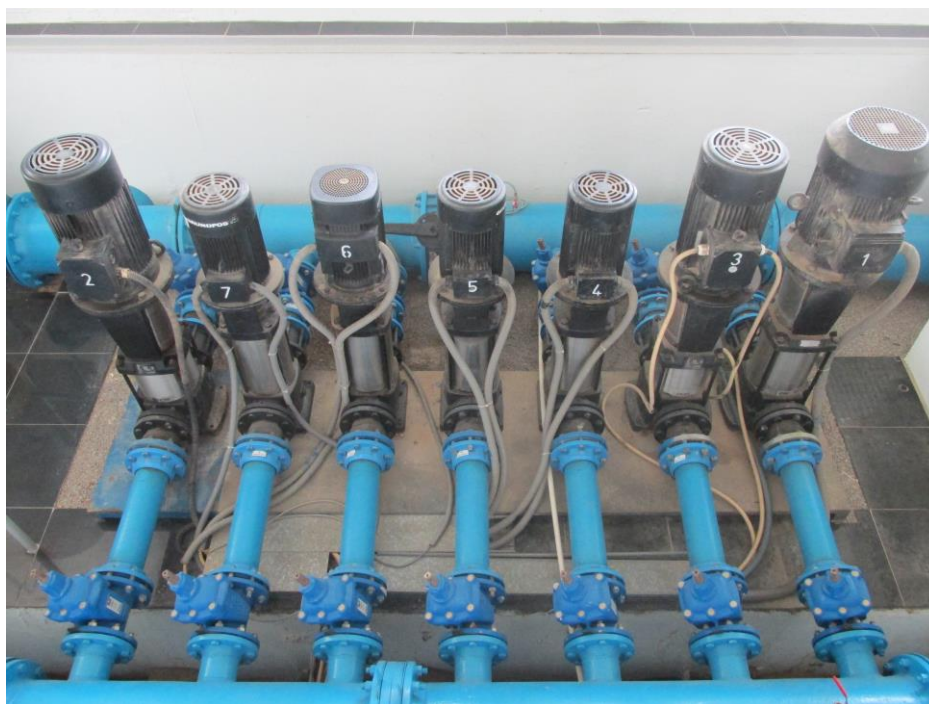
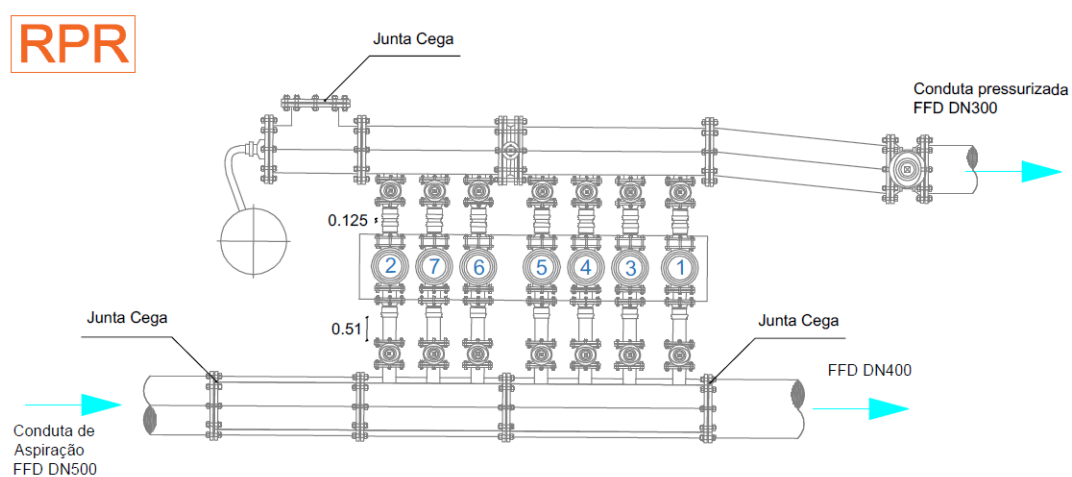


Figura 9 – Disposição geral dos grupos eletrobomba



S/Esc

Figura 10. Esquema hidráulico da EE associada ao reservatório principal

3.3 Auditoria ao grupo eletrobomba de maior dimensão | B3

A auditoria realizada permitiu obter as curvas características caudal-altura de elevação (Q-H), caudal-rendimento (Q- η) e caudal-potência (Q-P) para o grupo eletrobomba B3 (Figura 11a,b), assim como as curvas do fator de potência e da corrente em função da potência elétrica ativa (Figura 11c). As curvas medidas foram comparadas com as fornecidas pelo fabricante para grupos novos, apresentando-se os resultados na Figura 12. Todas as figuras incluem as curvas de regressão que melhor descrevem os valores medidos (polinómios do 2º e 3º grau para Q-H, Q- η e Q-P, e do 1º grau para fator de potência e corrente em função da potência elétrica ativa). A análise dos resultados obtidos permite tecer as seguintes considerações.

- i. A incerteza associada às medições do caudalímetro introduz uma incerteza pouco significativa na curva de caudal-altura de elevação (Figura 11a); a incerteza aumenta com o aumento do caudal. Nesta análise, desprezou-se a incerteza associada aos transdutores assim a associada ao fator de potência e da corrente elétrica, uma vez que são inferiores a 0.5% dos valores medidos. É expectável que a incerteza associada às restantes curvas (Figura 11b,c) seja inferior ou igual à observada para a curva Q-H.
- ii. A variação do fator de potência e da intensidade de corrente em função da potência elétrica ativa consumida encontra-se com o comportamento esperado: o fator de potência varia linearmente entre 0.8 e 0.88; e a intensidade de corrente varia linearmente entre 12 e 18 A (Figura 11c).
- iii. Os valores medidos para a altura de elevação são inferiores aos do fabricante para praticamente toda a gama de caudal (Figura 12a), exceto para caudais muito baixos para os quais as medições efetuadas têm maior incerteza associada. Esta diminuição da capacidade de elevação da bomba poderá dever-se ao desgaste da mesma com o tempo de funcionamento. A bomba B3 tem 15 anos, tendo atingido praticamente o fim da sua vida útil (i.e., 16-17 anos).
- iv. A curva de potência elétrica ativa medida é praticamente coincidente com a do fabricante (Figura 12b) na medida em que a diminuição da altura de elevação para o mesmo caudal é acompanhada por uma diminuição também de eficiência, que se tendem a compensar $P = \gamma QH / \eta$.
- v. A curva de caudal-rendimento mostra uma diminuição da eficiência da bomba em comparação com a do fabricante para grupos novos; esta diminuição é particularmente relevante para os caudais entre 10 e 25 l/s (Figura 12c). O rendimento máximo registado foi de 62% para um caudal de 19.5 l/s, o que representa uma diminuição de 6 pp (68-62) em relação ao valor do fabricante para o mesmo caudal (68%), e corresponde a uma perda de eficiência de 9% (6/68) em relação à eficiência inicial.

- vi. O valor máximo de caudal ensaiado (24 l/s) corresponde praticamente às condições nominais de funcionamento sem variador de frequência (caudal de 25 l/s, altura de elevação de 27 m e rendimento de 61%), tendo-se observado uma perda de eficiência neste ponto de 5 pp (61-56), ou seja, de 8% (5/61) em relação à eficiência inicial (Figura 12c).

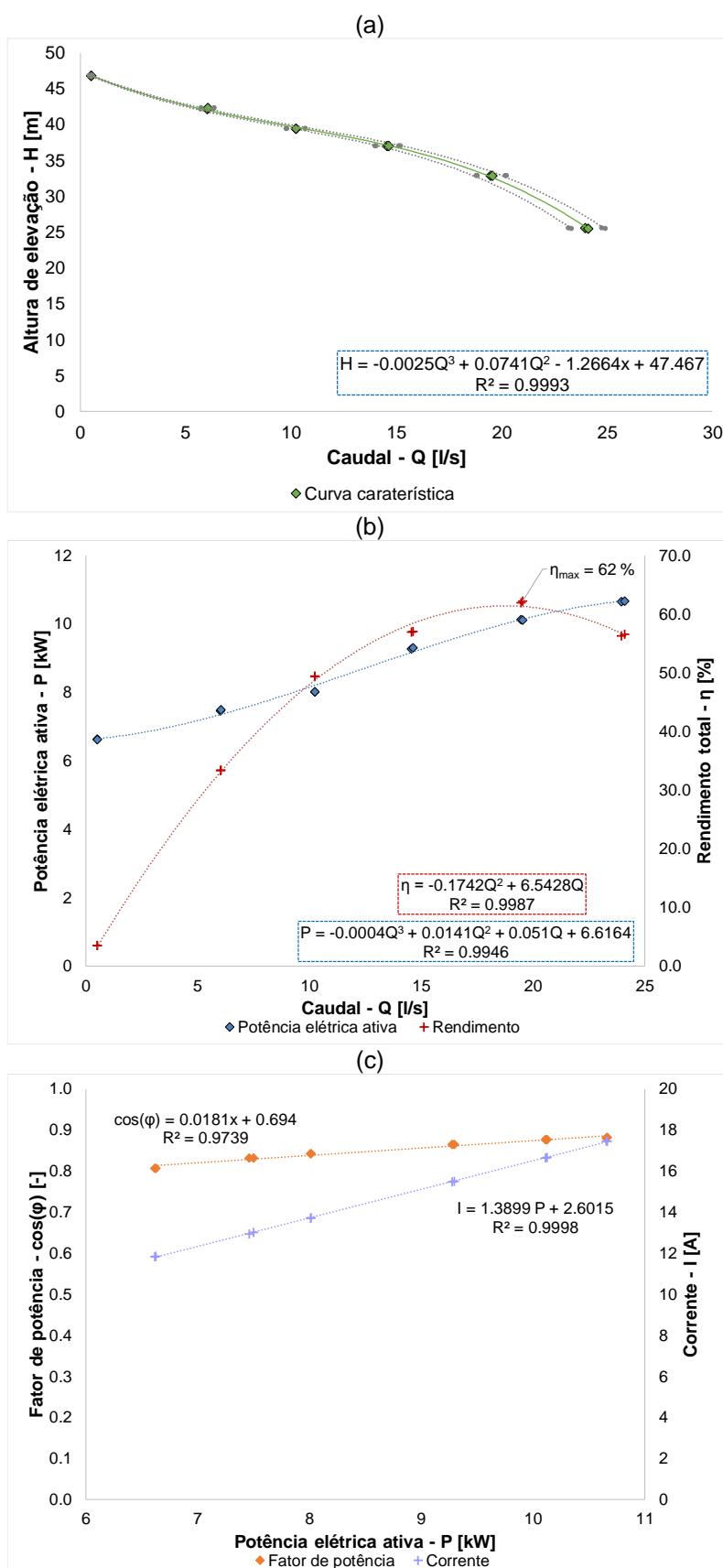


Figura 11. Grupo eletrobomba B3 | Curvas características medidas (a) Q-H, (b) Q-P e Q-η. (c) Curvas do fator de potência e da corrente em função da potência elétrica ativa.

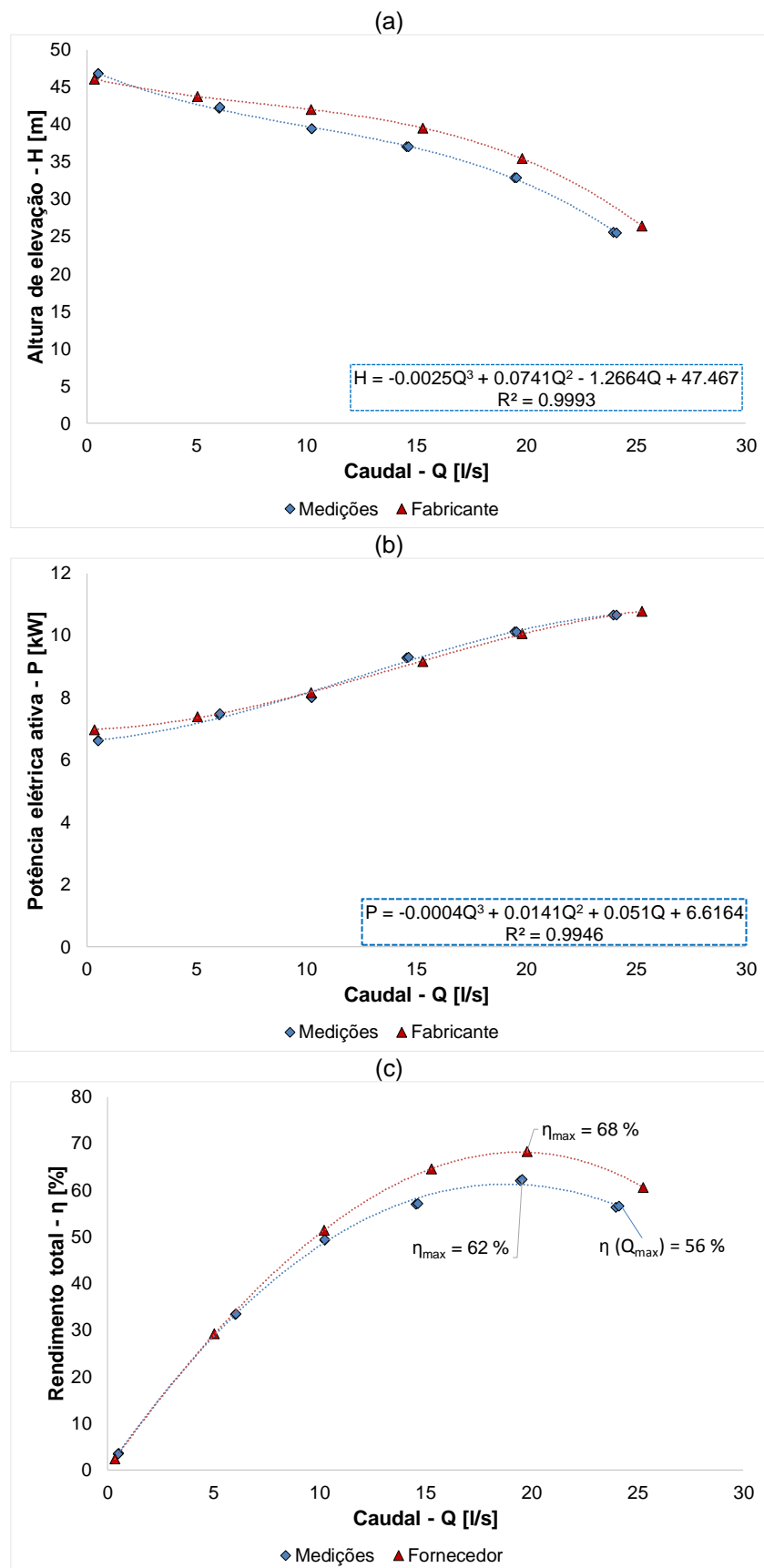


Figura 12. Grupo eletrobomba B3 | Curvas medidas vs curvas do fabricante: (a) Q-H, (b) Q-P, (c) Q-η

3.4 Auditoria aos grupos de menor dimensão

Curvas do fabricante

O grupo eletrobomba B4, bem como as dos grupos B5, B6 e B7, são do modelo CR 60-30 da Grundfos. Por se tratar de um modelo descontinuado, as curvas características destas bombas não são disponibilizadas no website da Grundfos, existindo apenas em gráficos em papel, digitalizados e de difícil leitura que foram disponibilizados pela Grundfos (ver Figura 25 da Ficha Técnica 1).

O novo modelo CR 64-2-2 da mesma marca foi dado como equivalente ao anterior pela Grundfos. Contudo, as curvas características e de rendimento das duas bombas não são coincidentes (Figura 13), pelo que os gráficos que se apresentam, de seguida, para as bombas dos grupos B4 a B7 incluem as curvas de ambos os modelos.

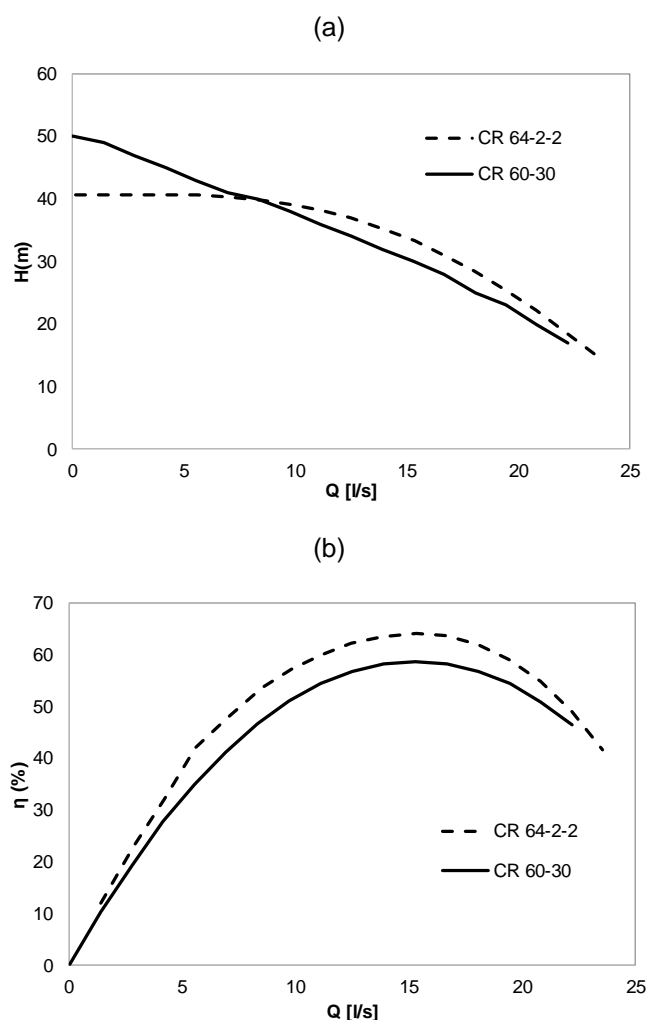


Figura 13. Comparação das curvas características (a) Q-H e (b) Q- η para os dois modelos de grupos eletrobomba

Auditoria ao grupo eletrobomba B4

A auditoria realizada permitiu obter as curvas características caudal-altura de elevação, caudal-rendimento e caudal-potência para o grupo eletrobomba B4 (Figura 14a,b,c), assim como as curvas do fator de potência e da corrente em função da potência elétrica ativa (Figura 14d). As figuras incluem as curvas de regressão que melhor descrevem os valores medidos. As curvas medidas foram comparadas com as fornecidas pelo fabricante apresentando-se os resultados na Figura 15. A análise dos resultados obtidos permite tecer as seguintes conclusões.

- i. A incerteza associada às medições do caudalímetro introduz uma incerteza pouco significativa na curva de caudal-altura de elevação (Figura 14a); a incerteza aumenta com o aumento do caudal. É expectável que a incerteza associada às restantes curvas Figura 14b,c) seja inferior ou igual à observada para a curva Q-H.
- ii. A variação do fator de potência e da intensidade de corrente em função da potência elétrica ativa consumida encontra-se com o comportamento esperado: o fator de potência varia linearmente entre 0.82 e 0.86; e a intensidade de corrente varia linearmente entre 11 e 12 A (Figura 14c).
- iii. A curva característica caudal-altura de elevação medida situa-se abaixo da curva do fabricante, apresentando uma curvatura idêntica à do grupo eletrobomba modelo CR 60-30, mas sendo muito diferente da do grupo modelo CR 64-2-2 (Figura 15a).
- iv. A potência elétrica medida é superior à do fabricante para o grupo eletrobomba modelo CR 60-30, o que indicia que a perda eficiência é superior à perda de altura de elevação (Figura 15b).
- v. O rendimento máximo registado foi de 54% para um caudal de 15.5 l/s, o que representa uma diminuição de 6 pp (i.e., 60–54) em relação ao valor do fabricante para o grupo eletrobomba modelo CR 60-30 (60%), e corresponde a uma perda de eficiência de 10% (i.e., 6 pp/60) em relação à eficiência inicial (Figura 15c).
- vi. Às condições nominais de funcionamento (caudal de 16.7 l/s, altura de elevação de 30.2 m e rendimento de 60%) observou-se uma perda de eficiência de 7 pp, ou seja, de 12% em relação à eficiência inicial (Figura 15c).

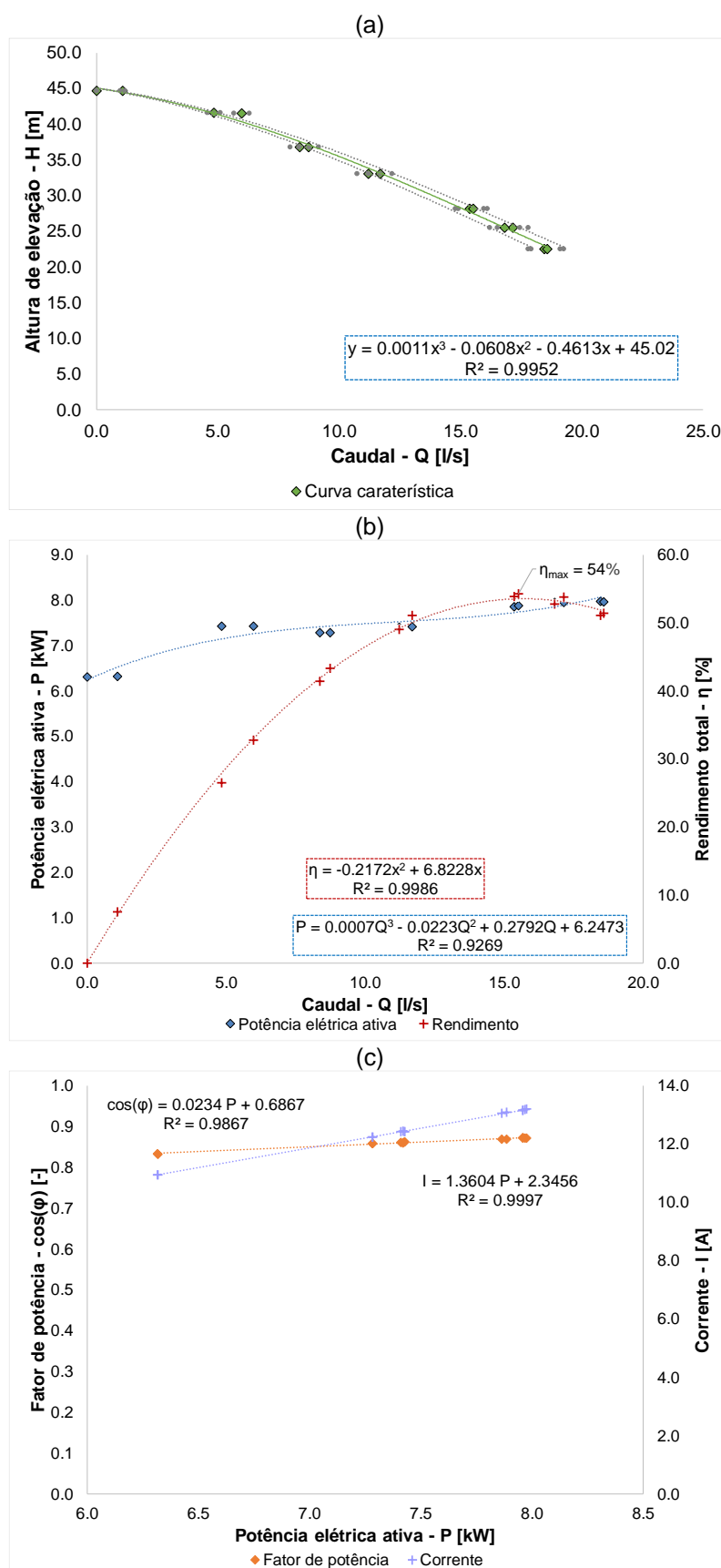


Figura 14. Grupo eletrobomba B4 | Curvas características medidas (a) Q-H, (b) Q-P e Q- η . (c) Curvas do fator de potência e da corrente em função da potência elétrica ativa.

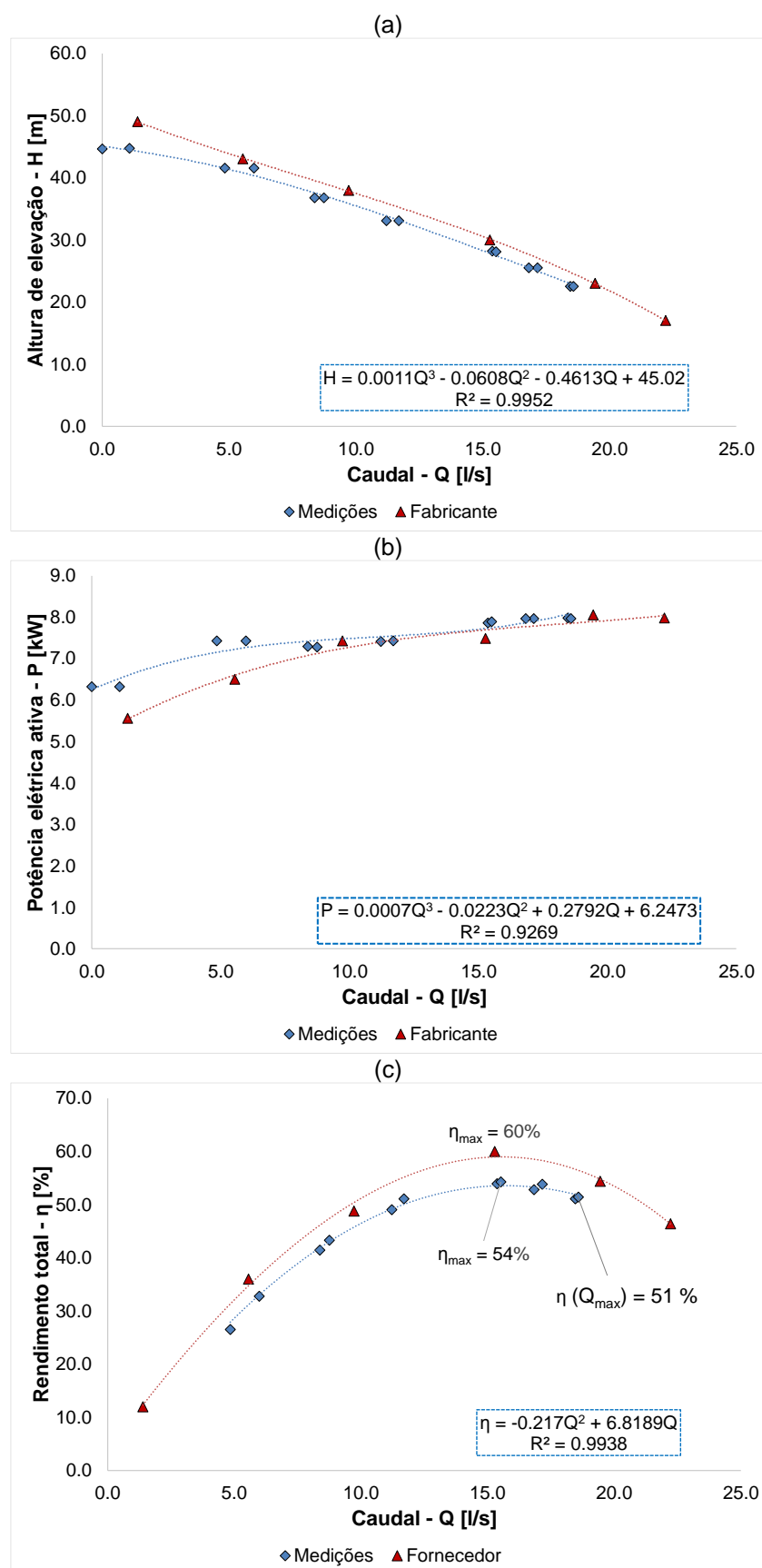


Figura 15. Grupo eletrobomba B4 | Curvas medidas vs curvas do fabricante: (a) Q-H, (b) Q-P, (c) Q-η

Auditoria ao grupo eletrobomba B6

A auditoria realizada permitiu obter as curvas características caudal-altura de elevação, caudal-rendimento e caudal-potência para o grupo eletrobomba B6 (Figura 16a,b,c), assim como as curvas do fator de potência e da corrente em função da potência elétrica ativa (Figura 16d). As figuras incluem as curvas de regressão que melhor descrevem os valores medidos. As curvas medidas foram comparadas com as fornecidas pelo fabricante apresentando-se os resultados na Figura 17. A análise dos resultados obtidos permite tecer as seguintes conclusões.

- i. A incerteza associada à medições do caudalímetro introduz uma incerteza pouco significativa na curva de caudal-altura de elevação (Figura 16a); a incerteza aumenta com o aumento do caudal.
- ii. A variação do fator de potência e da intensidade de corrente em função da potência elétrica ativa consumida encontra-se com o comportamento esperado: o fator de potência varia linearmente entre 0.8 e 0.86; e a intensidade de corrente varia linearmente entre 11 e 13 A (Figura 16c).
- iii. A curva característica caudal-altura de elevação determinada situa-se abaixo da curva do fabricante, apresentando uma curvatura idêntica à facultada para o grupo eletrobomba modelo CR 60-30.
- iv. A potência elétrica medida é superior à do fabricante, o que indicia que a perda eficiência é superior à perda de altura de elevação.
- v. O rendimento máximo registado foi de 44% para um caudal de 12.2 l/s, o que representa uma diminuição de 16 pp (i.e., 60-44) em relação ao valor do fabricante grupo eletrobomba modelo CR 60-30 (60%), e corresponde a uma perda de eficiência de 27% (i.e. 16 pp/60) em relação à eficiência inicial.
- vi. O valor máximo de caudal ensaiado (15 l/s) corresponde praticamente às condições nominais de funcionamento (caudal de 16.7 l/s, altura de elevação de 30.2 m e rendimento de 60%) tendo-se observado uma perda de eficiência neste ponto de 18 pp (i.e. 60-42), ou seja, de 30 % em relação à eficiência inicial.

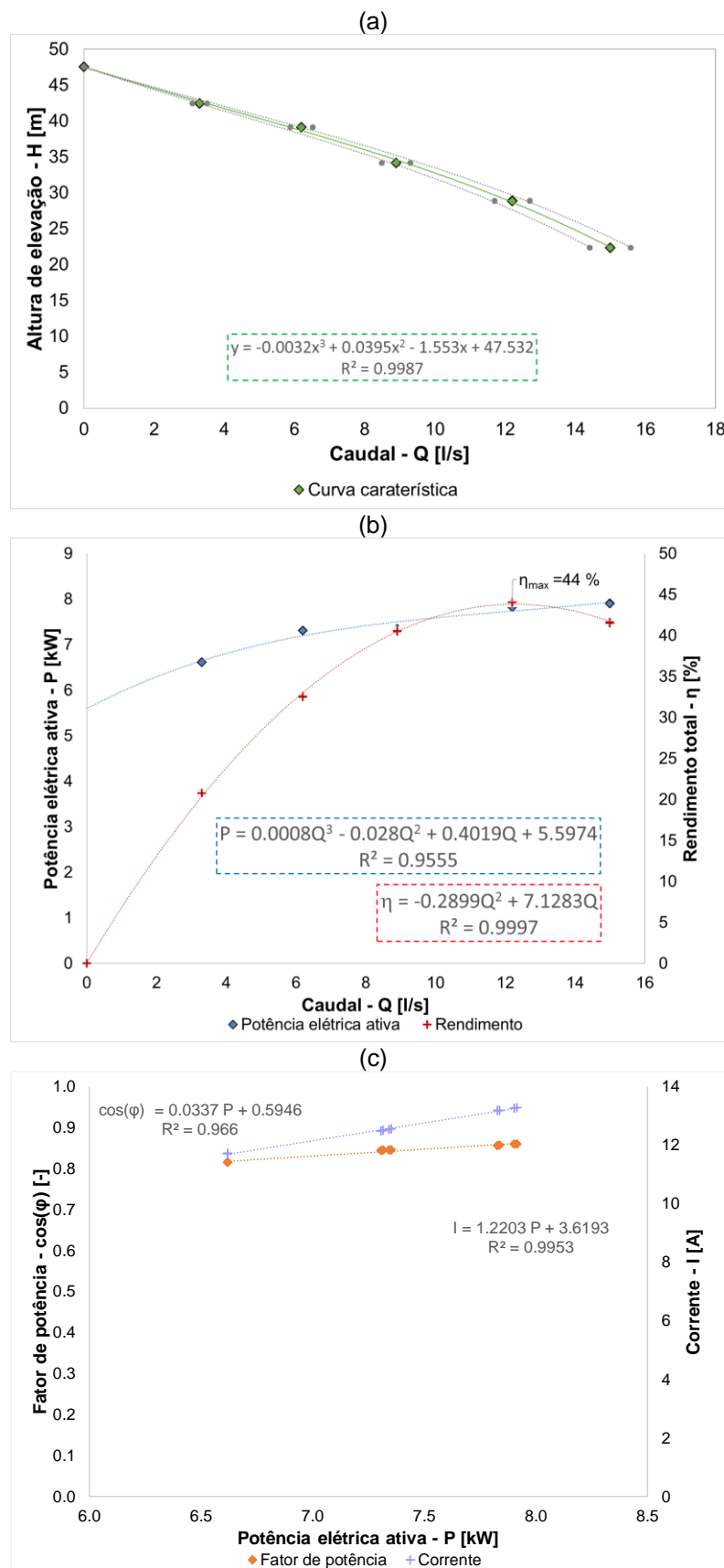


Figura 16. Grupo eletrobomba B6 | Curvas características medidas (a) Q-H, (b) Q-P e Q-η. (c) Curvas do fator de potência e da corrente em função da potência elétrica ativa.

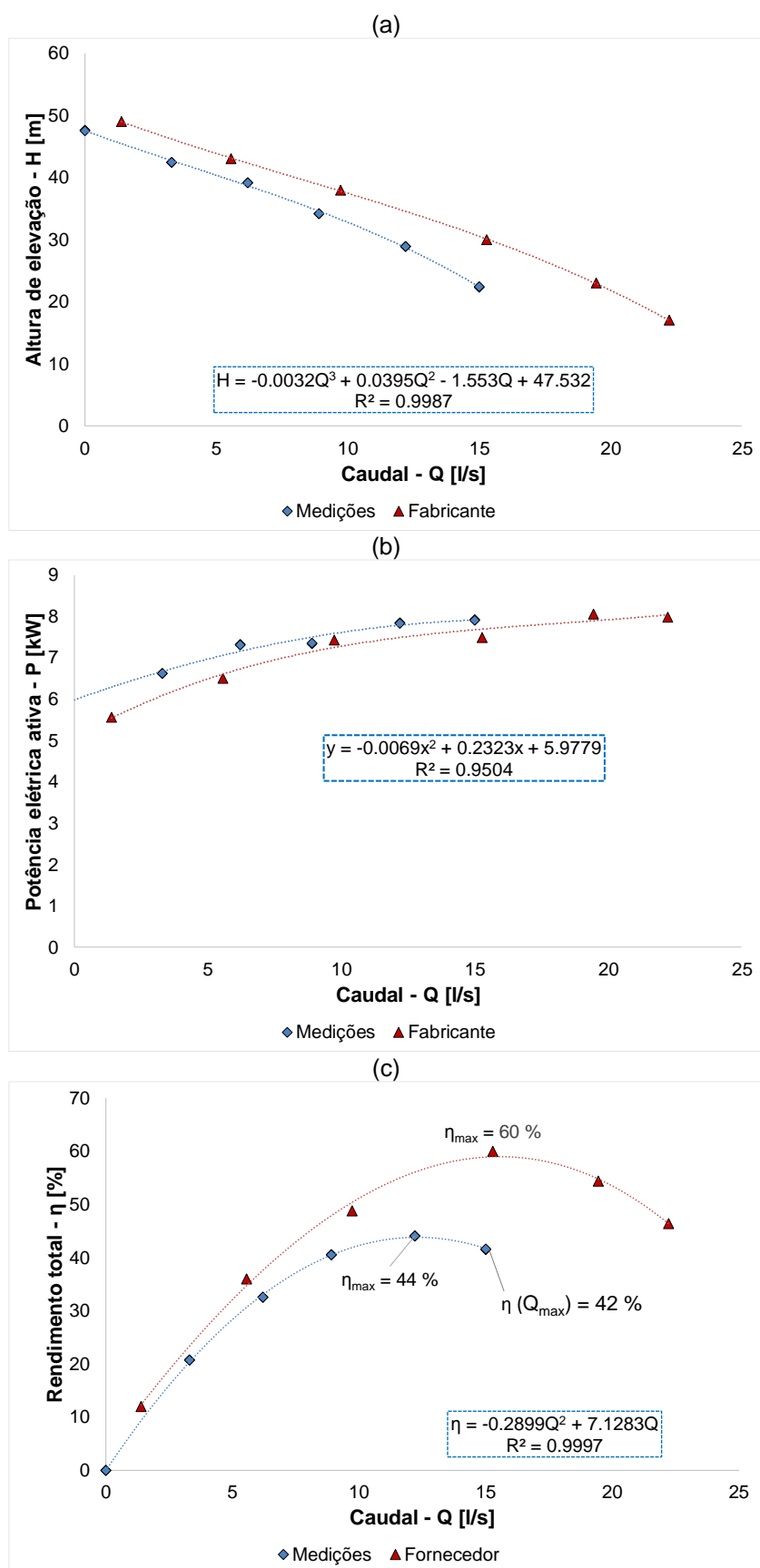


Figura 17. Grupo eletrobomba B6 | Curvas medidas vs curvas do fabricante: (a) Q-H, (b) Q-P, (c) Q-η

Auditoria ao grupo eletrobomba B7

A auditoria realizada permitiu obter as curvas características caudal-altura de elevação, caudal-rendimento e caudal-potência para o grupo eletrobomba B7 (Figura 18a,b,c), assim como as curvas do fator de potência e da corrente em função da potência elétrica ativa (Figura 18d). As figuras incluem as curvas de regressão que melhor descrevem os valores medidos. As curvas medidas foram comparadas com as fornecidas pelo fabricante apresentando-se os resultados na Figura 19. A análise dos resultados obtidos permite tecer as seguintes conclusões.

- I. A incerteza associada à medições do caudalímetro introduz uma incerteza pouco significativa na curva de caudal-altura de elevação (Figura 18a); a incerteza aumenta com o aumento do caudal.
- II. A variação do fator de potência e da intensidade de corrente em função da potência elétrica ativa consumida encontra-se com o comportamento esperado: o fator de potência varia linearmente entre 0.83 e 0.87; e a intensidade de corrente varia linearmente entre 11 e 13 A (Figura 18c).
- III. A curva característica caudal-altura de elevação medida situa-se abaixo da curva do fabricante, apresentando uma curvatura idêntica à correspondente ao grupo eletrobomba modelo CR 60-30 (Figura 19a).
- IV. A potência elétrica medida é superior à do fabricante, o que indicia que a perda eficiência é superior à perda de altura de elevação (Figura 19b).
- V. O rendimento máximo registado foi de 54% para um caudal de 15 l/s, o que representa uma diminuição de 6 pp (i.e., 60–54) em relação ao valor do fabricante para o mesmo caudal (60%), e corresponde a uma perda de eficiência de 10% (6pp/60) em relação à eficiência inicial (Figura 19c).
- VI. O valor máximo de caudal ensaiado (18.5 l/s) observou-se um rendimento de 51%, inferior em 4 pp (55-51) em relação ao do fabricante para o mesmo caudal.

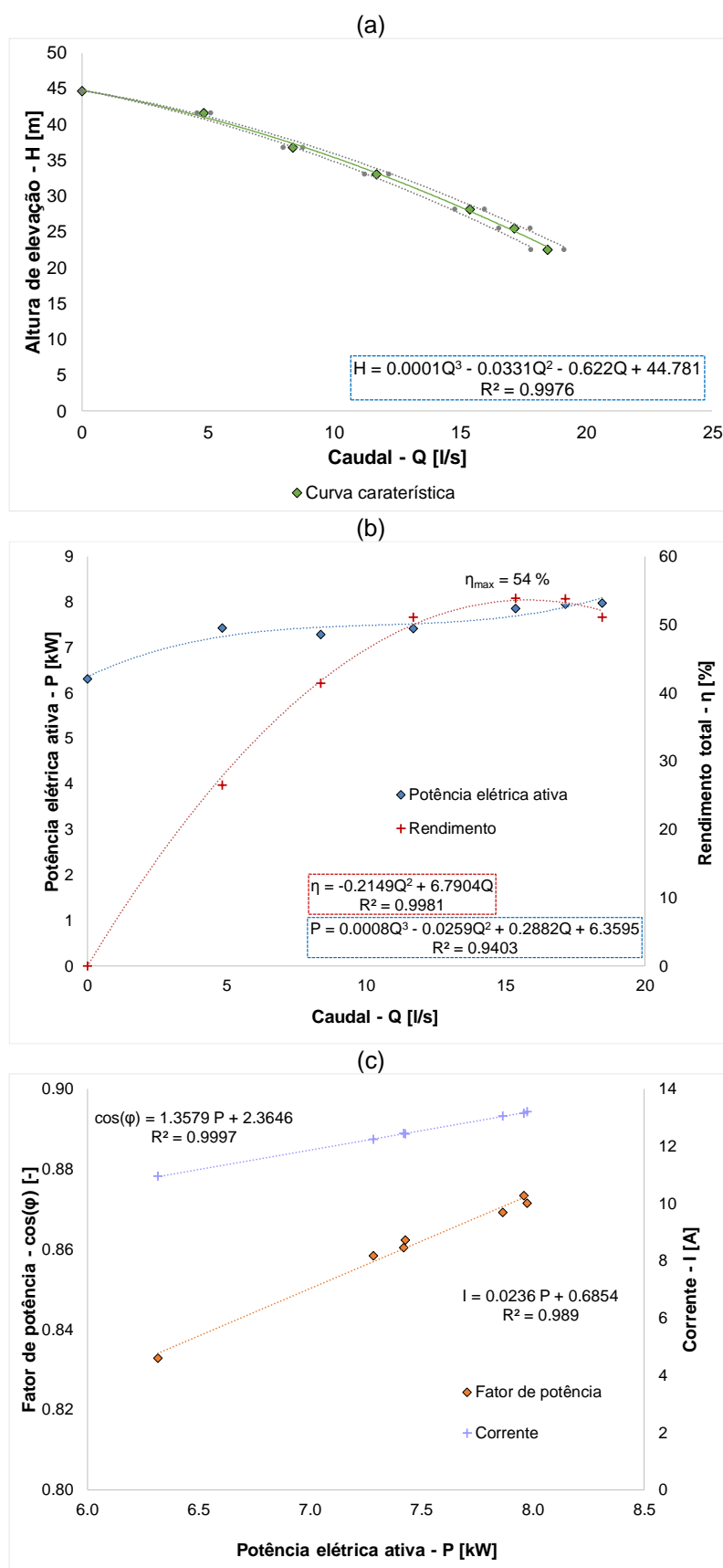


Figura 18. Grupo eletrobomba B7 | Curvas características medidas (a) Q-H, (b) Q-P e Q-η. (c) Curvas do fator de potência e da corrente em função da potência elétrica ativa.

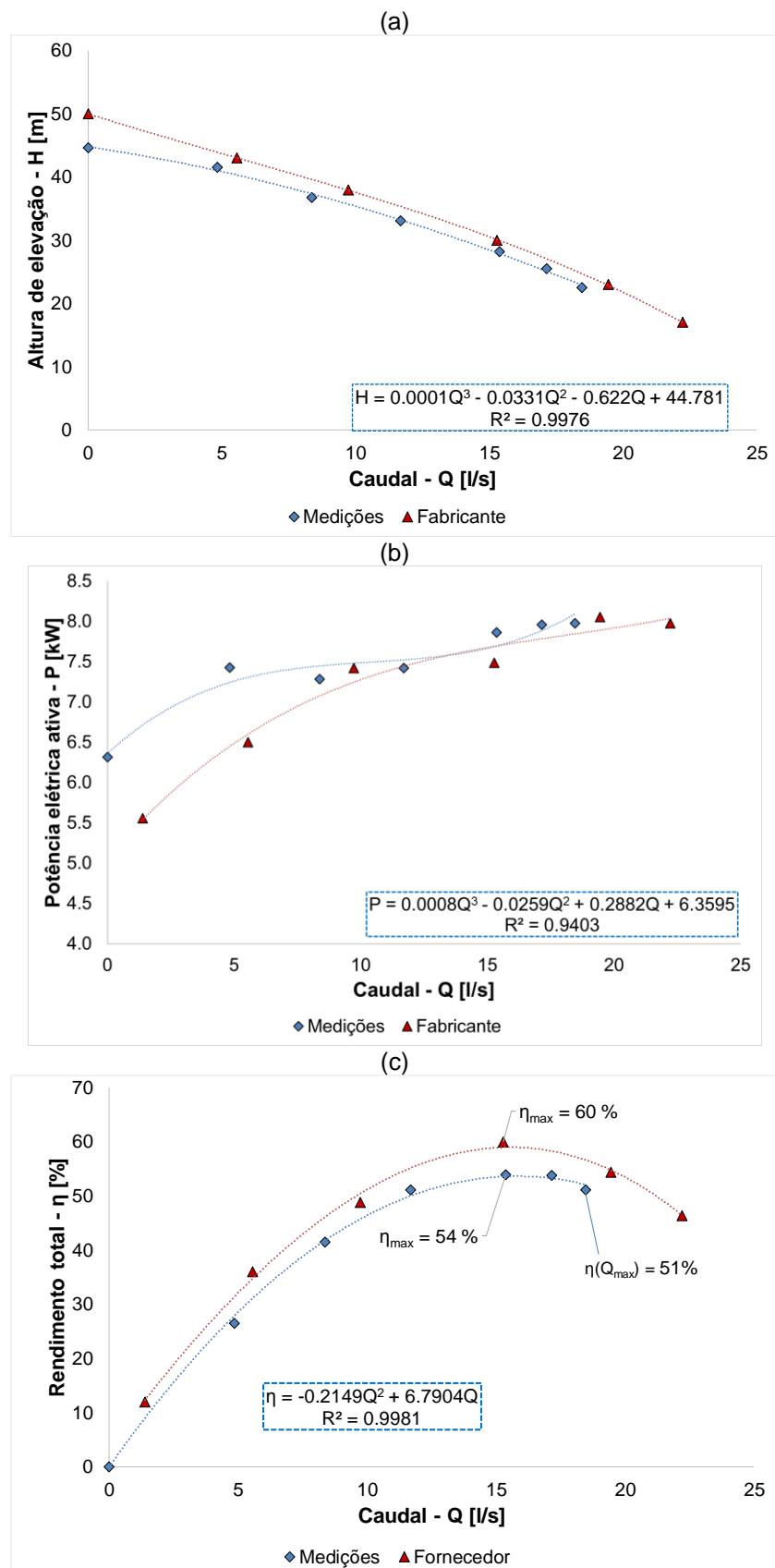


Figura 19. Grupo eletrobomba B7 | Curvas medidas vs curvas do fabricante: (a) Q-H, (b) Q-P, (c) Q- η

Comparação de resultados

Os valores máximos de rendimento medidos e disponibilizados pela Grundfos para o grupo eletrobomba modelo CR 60-30 são apresentados no Quadro 2. Os resultados mostram decaimentos de rendimento similares nos grupos eletrobomba B4 e B7 da ordem dos 6 pp em relação aos valores máximos do fabricante para grupos novos, o que corresponde a uma perda de eficiência de cerca de 10% do valor inicial. No entanto, o grupo B6 mostra uma perda de eficiência superior (16 pp), sendo o rendimento máximo observado para um caudal inferior (12.2 l/s) ao inicial (15.5 l/s). O decaimento do rendimento do grupo B6 pode dever-se a um maior desgaste da roda e do motor decorrente de um maior número de arranques ou de um tempo de funcionamento superior desde a sua instalação. Sugere-se que estes dois fatores sejam analisados pela equipa da InfraQuinta.

Quadro 2 | Síntese das características dos grupos de menor dimensão

Grupo	Rendimento máximo Medido, $\eta_{\max M}$ (caudal)	Rendimento máximo Fabricante, $\eta_{\max F}$ (caudal)	$\Delta\eta$ = $\eta_{\max M} - \eta_{\max F}$ (pp)	$\Delta\eta / \eta_{\max F}$ (%)
B4	54% (15.5 l/s)	60% (15.5 l/s)	6	10
B6	44% (12.2 l/s)	60% (15.5)	16	27
B7	47% (15.5 l/s)	60% (15.5)	6	10

A comparação das curvas característica, de potência e de rendimento das três bombas idênticas (B4, B6 e B7) com a do fabricante são apresentadas na Figura 20. As curvas que se situam mais próximas da do fabricante são as do grupo eletrobomba B4 e B7 e as que mais se afastam são as do grupo B6. Conforme referido, estes resultados indiciam um desgaste diferente das bombas apesar de serem do mesmo modelo e idade. Uma vez que as bombas operam todas no mesmo local e bombeiam a mesma água, a diferença no desgaste deverá estar relacionada com o tempo de funcionamento e/ou o número de arranques. Assim, as diferenças observadas no rendimento das bombas deverão ser consequência das regras do controlo que comandam o funcionamento da EE.

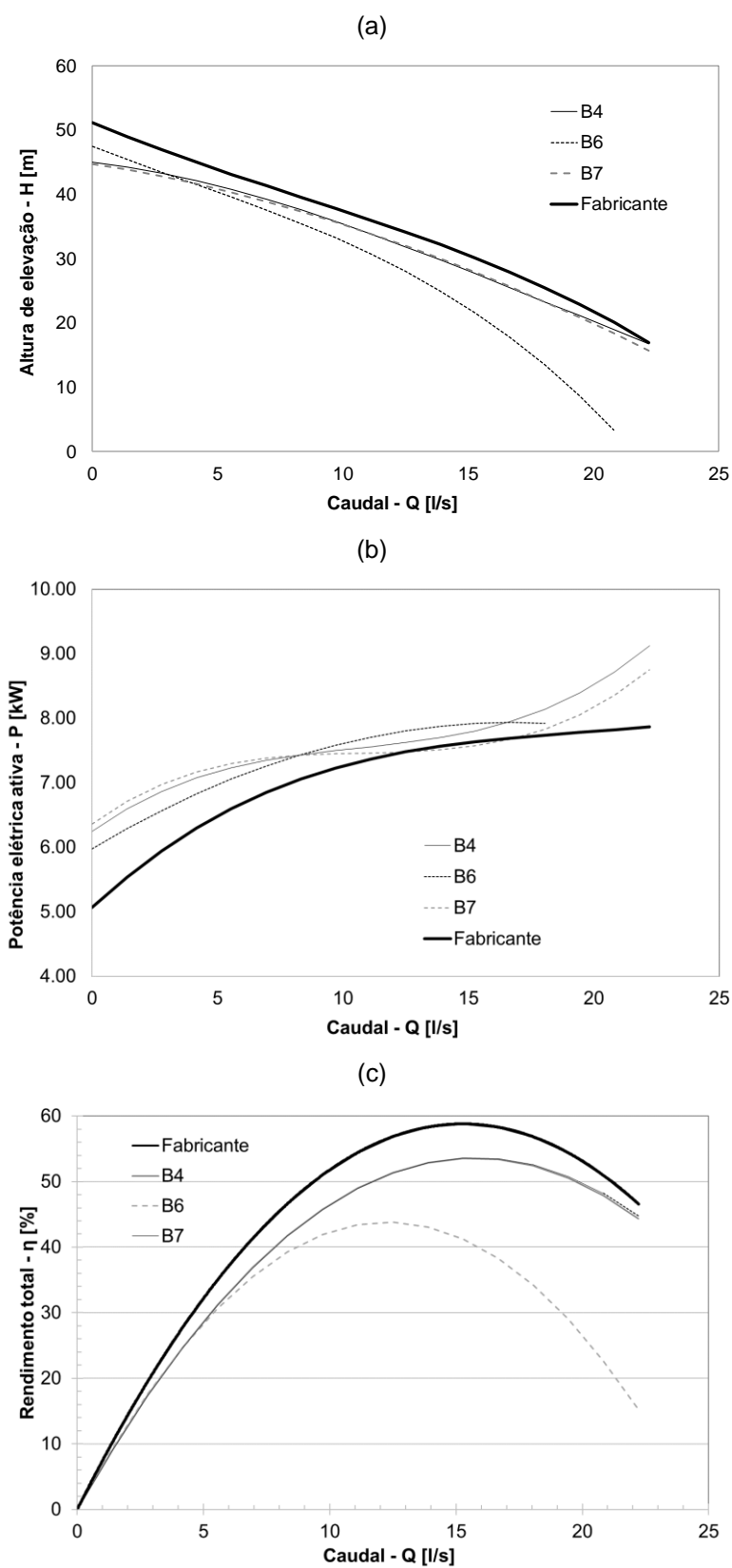


Figura 20. Grupo eletrobomba B6 | Curvas medidas vs curvas do fabricante: (a) Q-H, (b) Q-P, (c) Q- η

4 APRECIACÃO FINAL

Eficiência dos grupos eletrobomba

- Os grupos eletrobomba foram instalados há cerca de 15 anos (em 2001), estando a chegar ao fim da sua vida útil (16-20 anos). Neste contexto, será de esperar um decaimento geral do seu rendimento e, consequentemente, uma diminuição da capacidade de elevação dos grupos (i.e., menor altura de elevação para o mesmo caudal) e um aumento do consumo de energia elétrica. Registaram-se reduções de rendimento máximo de 6 pp nos grupos eletrobomba de menor potência (B4 e B7) e no grupo de maior potência (B3), e de 16 pp no grupo B6, em relação a grupos homólogos novos (de acordo com informação fornecida pelo fabricante). O decaimento mais acentuado do rendimento no grupo B6 pode dever-se a um maior desgaste da roda e/ou do motor decorrente, por exemplo, de um maior número de arranques, de um tempo de funcionamento superior desde a sua instalação, ou da operação em condições anormais (e.g., a ocorrência de uma sobretensão elétrica que tenha danificado o motor). Sugere-se que os dois primeiros fatores sejam analisados pela equipa da InfraQuinta, efetuando um levantamento do tempo de funcionamento e número de arranques de cada grupo num período de pelo menos 1 ano.
- Aquando da construção da EE em 2011, os grupos escolhidos e instalados apresentavam eficiências globais (motor+bomba) máximas relativamente baixas para grupos eletrobomba de águas de abastecimento. Refira-se, por exemplo, os grupos de maior potência (B1-B3) têm eficiências globais máximas previstas pelo fabricante de 68% e os grupos menores (B4-B7) eficiências de 60%, ambas para a velocidade de rotação nominal. A velocidades de rotação inferiores correspondem eficiências máximas menores ou iguais às referidas. Sugere-se, aquando da remodelação da EE, a escolha de grupos mais eficientes, de preferência com rendimentos globais máximos (motor+bomba) acima dos 75%, como, por exemplo, grupos eletrobomba centrífugos com entrada axial.

Configuração da estação elevatória

Face aos valores dos rendimentos globais máximos fornecidos pelo fabricante e registados na presente auditoria, recomenda-se a remodelação da EE que deverá incluir:

- Análise detalhada do número de grupos a instalar em paralelo face à gama de variação do caudal na época de verão e na época de inverno, e à pressão mínima necessária na rede. Não fazer uma substituição igual ao existente (*like for like*).
- Remodelação da configuração da EE de forma a minimizar as perdas de carga localizadas e a garantir uma distribuição uniforme de caudal pelos grupos eletrobomba. Por exemplo, instalar os grupos em ramais que façam um ângulo de 45° com as condutas de alimentação e de compressão, em vez dos 90° atuais.

- Escolha de grupos eletrobomba para águas de abastecimento com rendimentos globais máximos acima dos 75%.
- Possibilidade de instalação de variadores de velocidade independentes, uma para cada grupo eletrobomba.

Reservatório de abastecimento

- A estação elevatória é alimentada a partir de duas células do reservatório Principal através de um circuito hidráulico não simétrico e que propicia a alimentação preferencial de uma das células. Recomenda-se uma análise detalhada das ligações existentes entre as duas células do reservatório e entre estas e os grupos eletrobomba, assim como dos circuitos hidráulicos de alimentação das células a partir do sistema de abastecimento da Águas do Algarve.

Lisboa, 29 de julho de 2016

Dídia Isabel Cameira Covas

Dídia Isabel Cameira Covas

Professor Associado com Agregação do IST

ANEXO 1 – FICHAS TÉCNICAS



Ficha Técnica 1. Estação elevatória associada ao reservatório principal

Sistema	Abastecimento de água																														
Descrição	A EE localiza-se no edifício do reservatório principal.																														
Características Técnicas	N.º de grupos eletrobomba: <ul style="list-style-type: none">– 2+1 de reserva (instalados em paralelo) – grupos 1 a 3– 3+1 de reserva (instalados em paralelo) – grupos 4 a 7– 1 de reserva (não instalado) – grupo 8 Características de cada grupo:																														
	<table><tr><th>Grupo</th><th>Marca/ID</th><th>Q_N (l/s)</th><th>H_N (m)</th><th>P1 (kW)</th><th>P2 (kW)</th></tr><tr><td>1</td><td>Grundfos CR 90-3-2</td><td>25</td><td>48.1</td><td>19.6</td><td>18.1</td></tr><tr><td>2 a 3</td><td>Grundfos CR 90-2-2 AFAE HQQE</td><td>25</td><td>27.1</td><td>10.76</td><td>9.9</td></tr><tr><td>4 a 7</td><td>Grundfos CR 60-30 AFA BBUE</td><td>16.7</td><td>30.2</td><td></td><td>7.5</td></tr><tr><td>8</td><td>Grundfos CR 64-2-2 AFAE EUBE</td><td>17.8</td><td>29.1</td><td>8.1</td><td>7.3</td></tr></table>	Grupo	Marca/ID	Q _N (l/s)	H _N (m)	P1 (kW)	P2 (kW)	1	Grundfos CR 90-3-2	25	48.1	19.6	18.1	2 a 3	Grundfos CR 90-2-2 AFAE HQQE	25	27.1	10.76	9.9	4 a 7	Grundfos CR 60-30 AFA BBUE	16.7	30.2		7.5	8	Grundfos CR 64-2-2 AFAE EUBE	17.8	29.1	8.1	7.3
	Grupo	Marca/ID	Q _N (l/s)	H _N (m)	P1 (kW)	P2 (kW)																									
	1	Grundfos CR 90-3-2	25	48.1	19.6	18.1																									
	2 a 3	Grundfos CR 90-2-2 AFAE HQQE	25	27.1	10.76	9.9																									
	4 a 7	Grundfos CR 60-30 AFA BBUE	16.7	30.2		7.5																									
8	Grundfos CR 64-2-2 AFAE EUBE	17.8	29.1	8.1	7.3																										
Existem no edifício do reservatório principal dois quadros elétricos. O 1º quadro controla as bombas B1 e B2, ambas com variadores de frequência. O 2º quadro controla as restantes bombas (B3 a B7), existindo um só variador de frequência que pode estar associado a qualquer uma das 4 bombas.																															
Ano de construção	2001: Edifício; 2001: Equipamento																														



Figura 21 – Disposição dos grupos eletrobomba da EE associada ao Reservatório Principal.

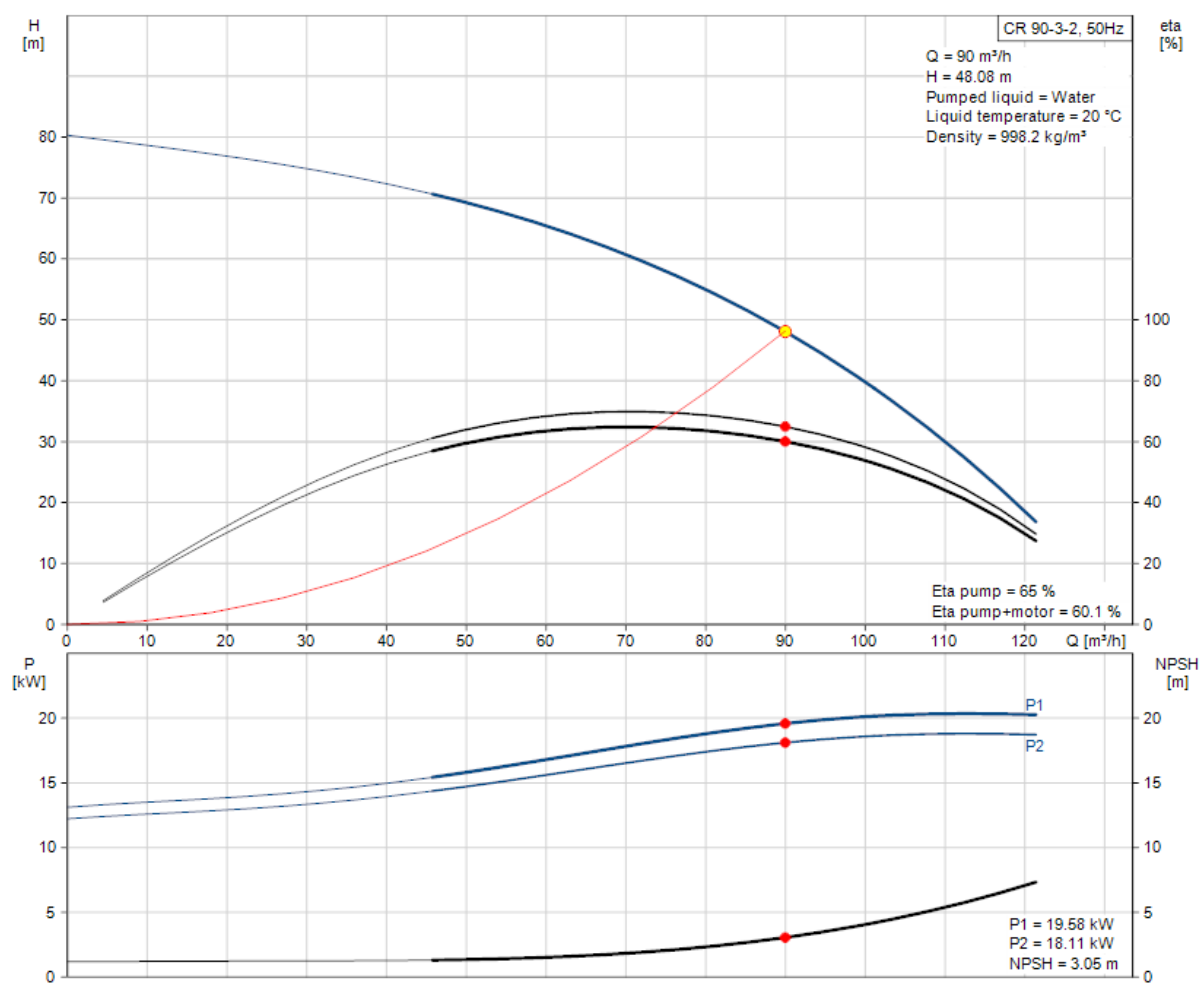


Figura 22. Grupo eletrobomba B1 | Curvas características fornecidas pelo fabricante (Grundfos 90-3-2 AFAE HQQE). Ponto correspondente às condições nominais de funcionamento (disponível em <http://product-selection.grundfos.com>).

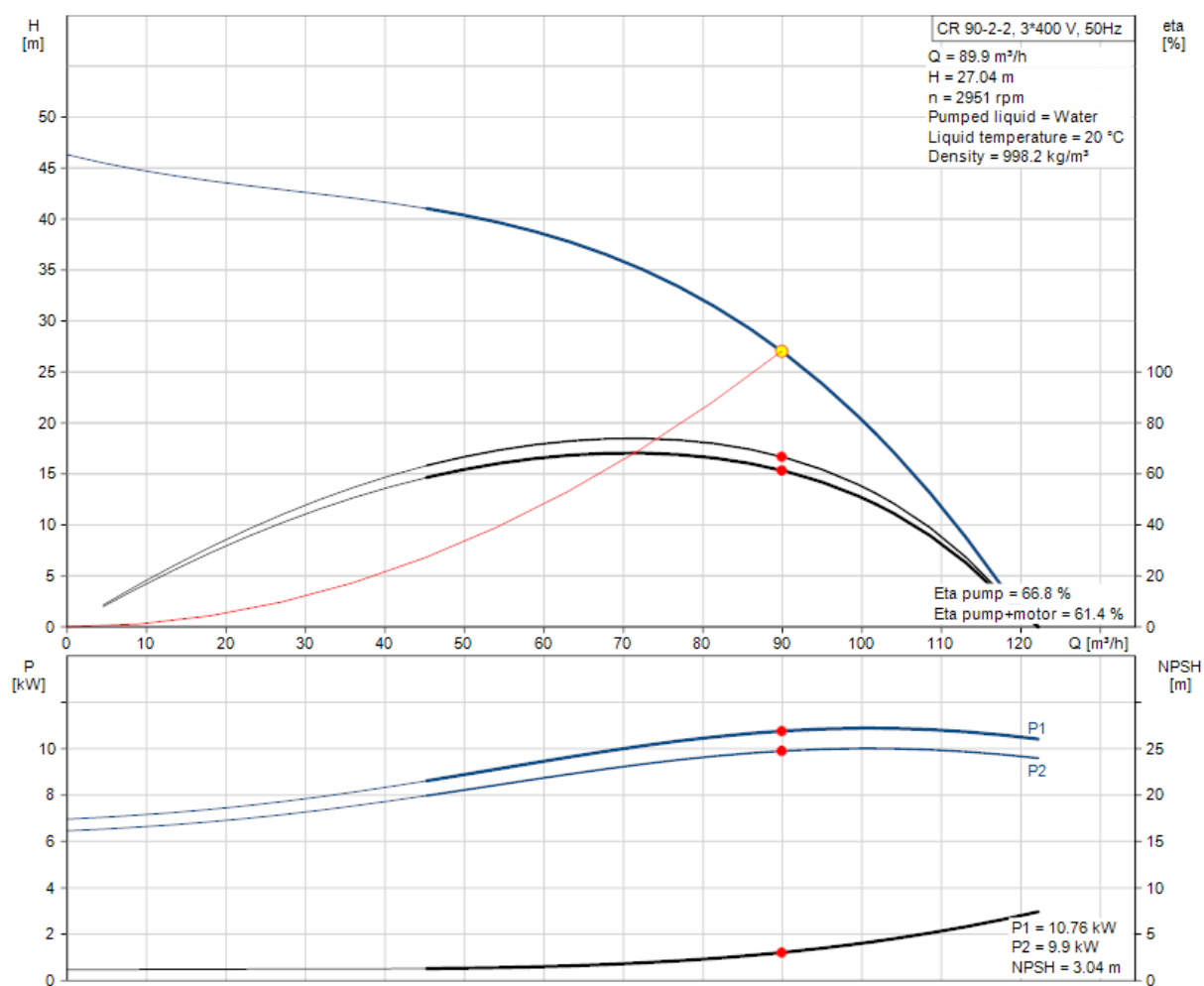


Figura 23. Grupos eletrobomba B2-B3 | Curvas características fornecidas pelo fabricante (Grundfos 90-2-2 AFAE HQQE). Ponto correspondente às condições nominais de funcionamento (disponível em <http://product-selection.grundfos.com>).

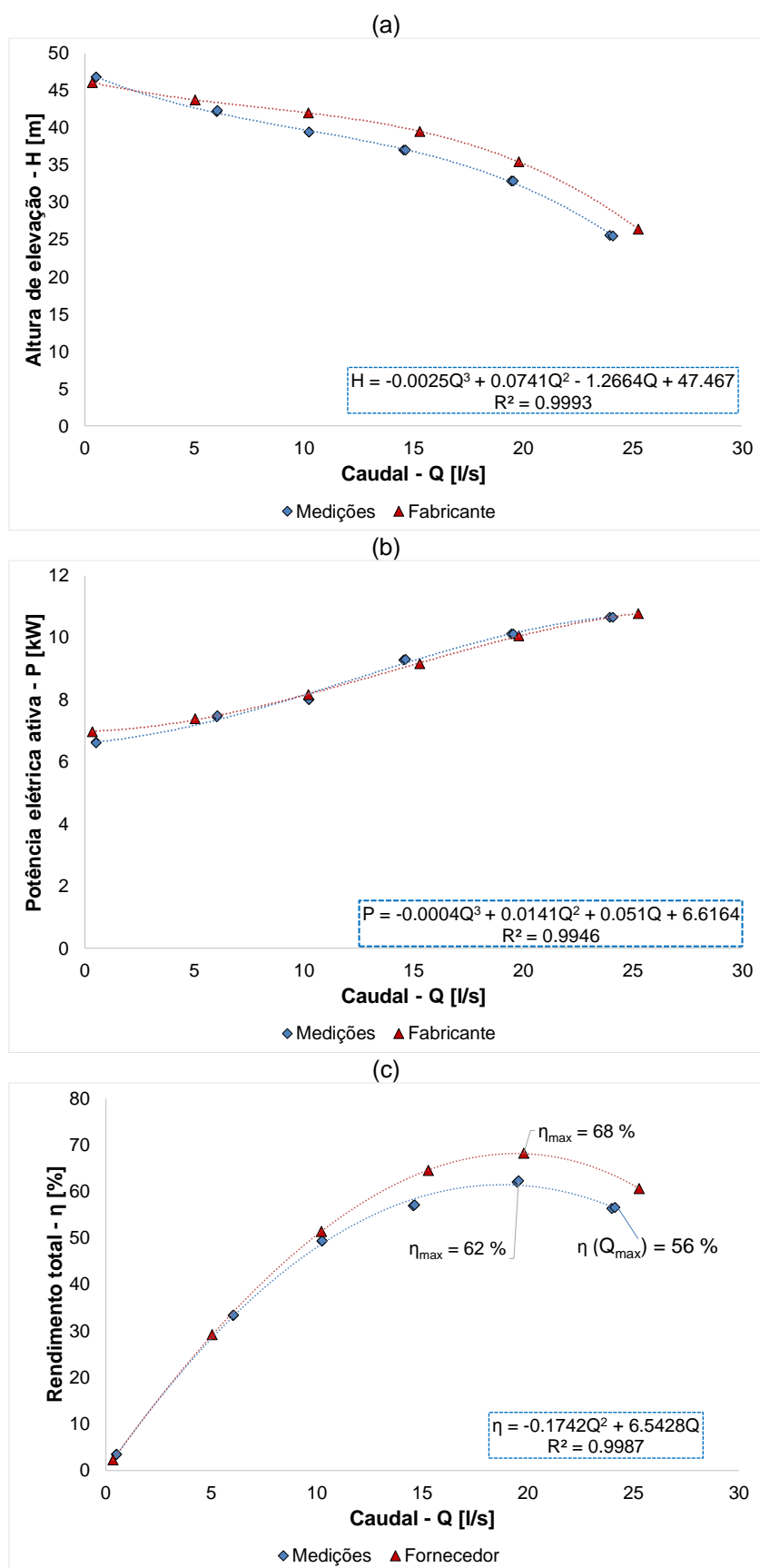


Figura 24. Grupo eletrobomba B3 | Curvas medidas vs curvas do fabricante: (a) Q-H, (b) Q-P, (c) Q- η

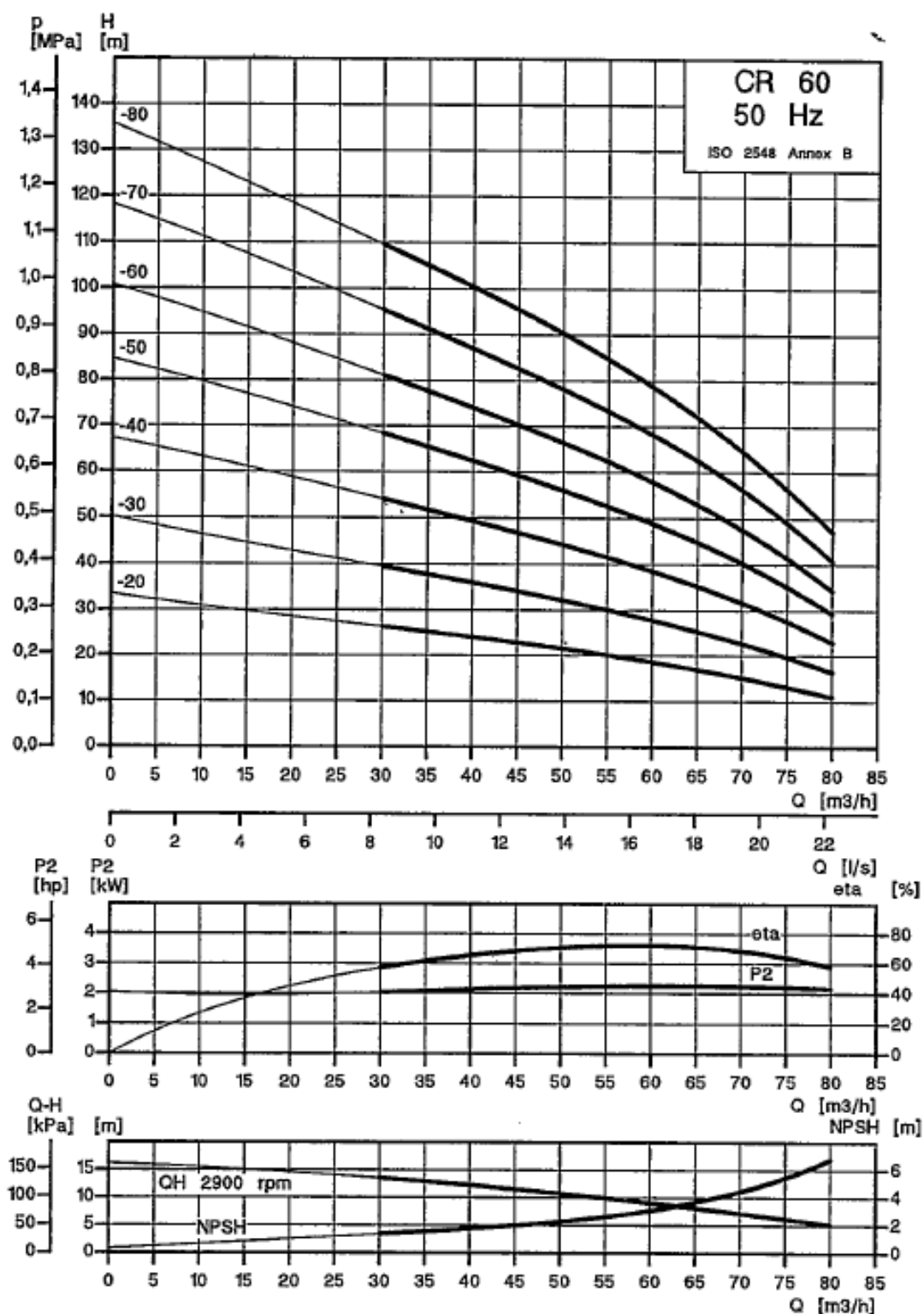


Figura 25. Grupos eletrobomba B4-B7 | Curvas características fornecidas pelo fabricante (Grundfos CR 60-30 AFA BBUE).

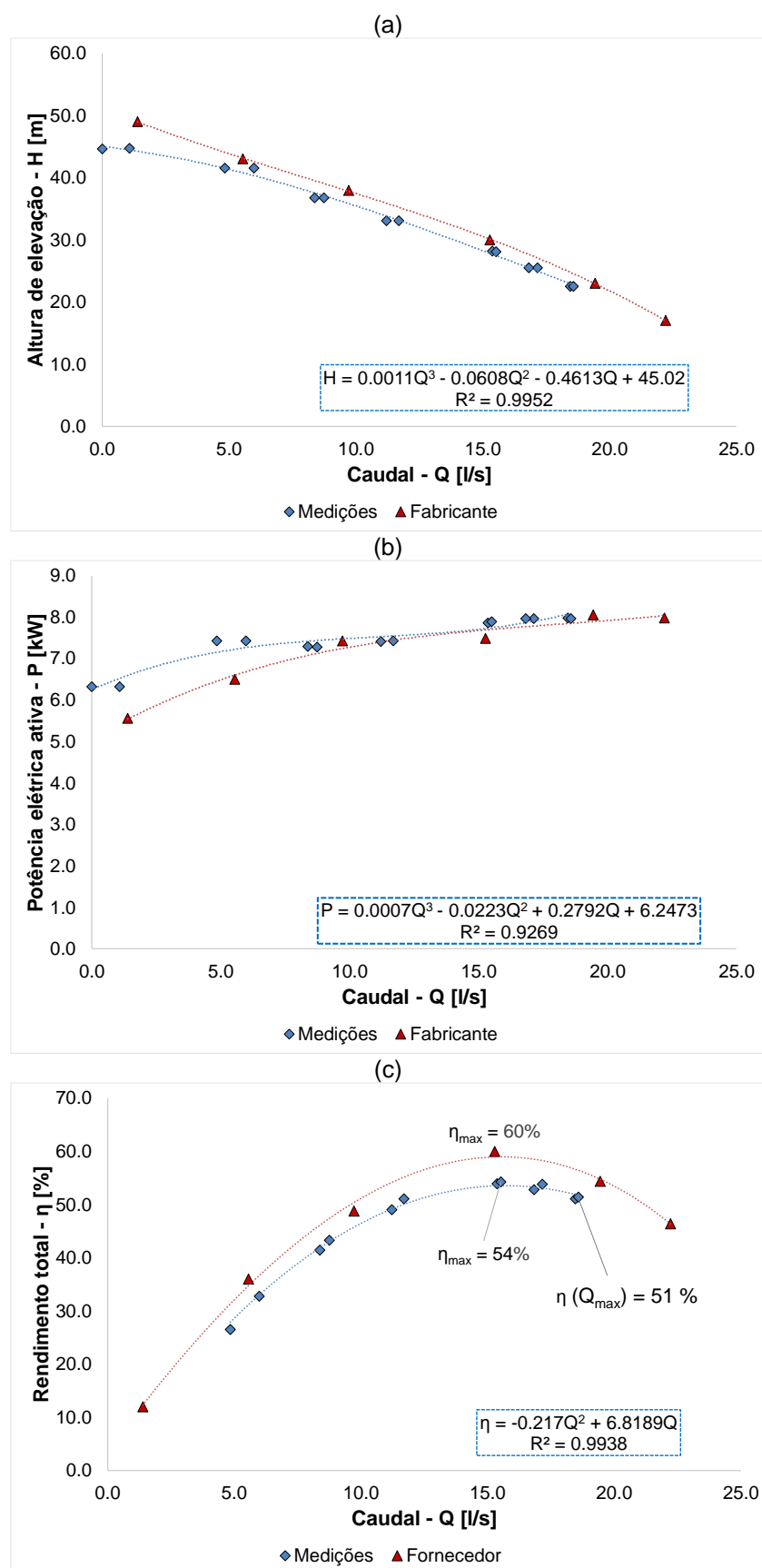


Figura 26. Grupo eletrobomba B4 | Curvas medidas vs curvas do fabricante: (a) Q-H, (b) Q-P, (c) Q-η

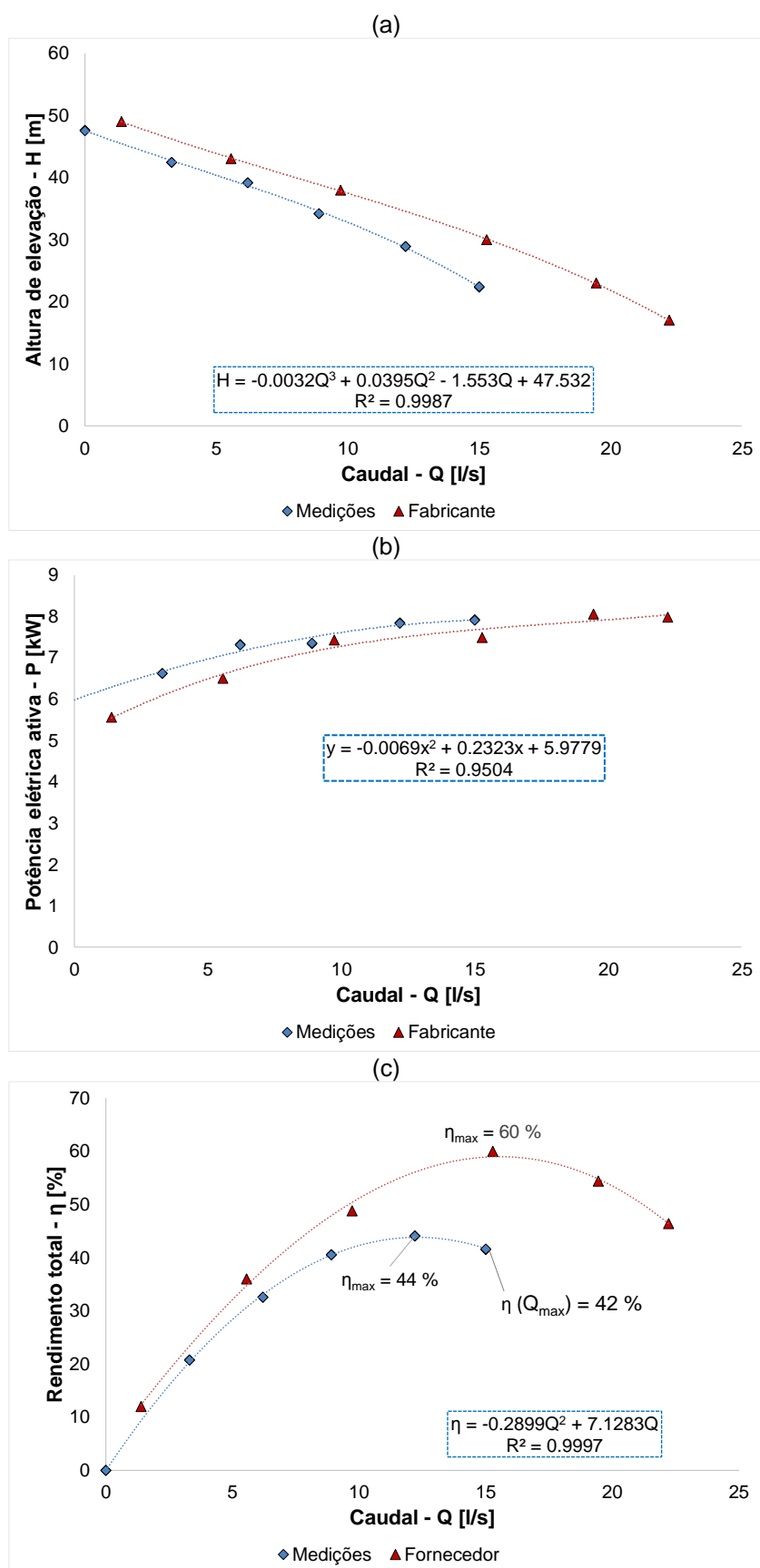


Figura 27. Grupo eletrobomba B6 | Curvas medidas vs curvas do fabricante: (a) Q-H, (b) Q-P, (c) Q-η

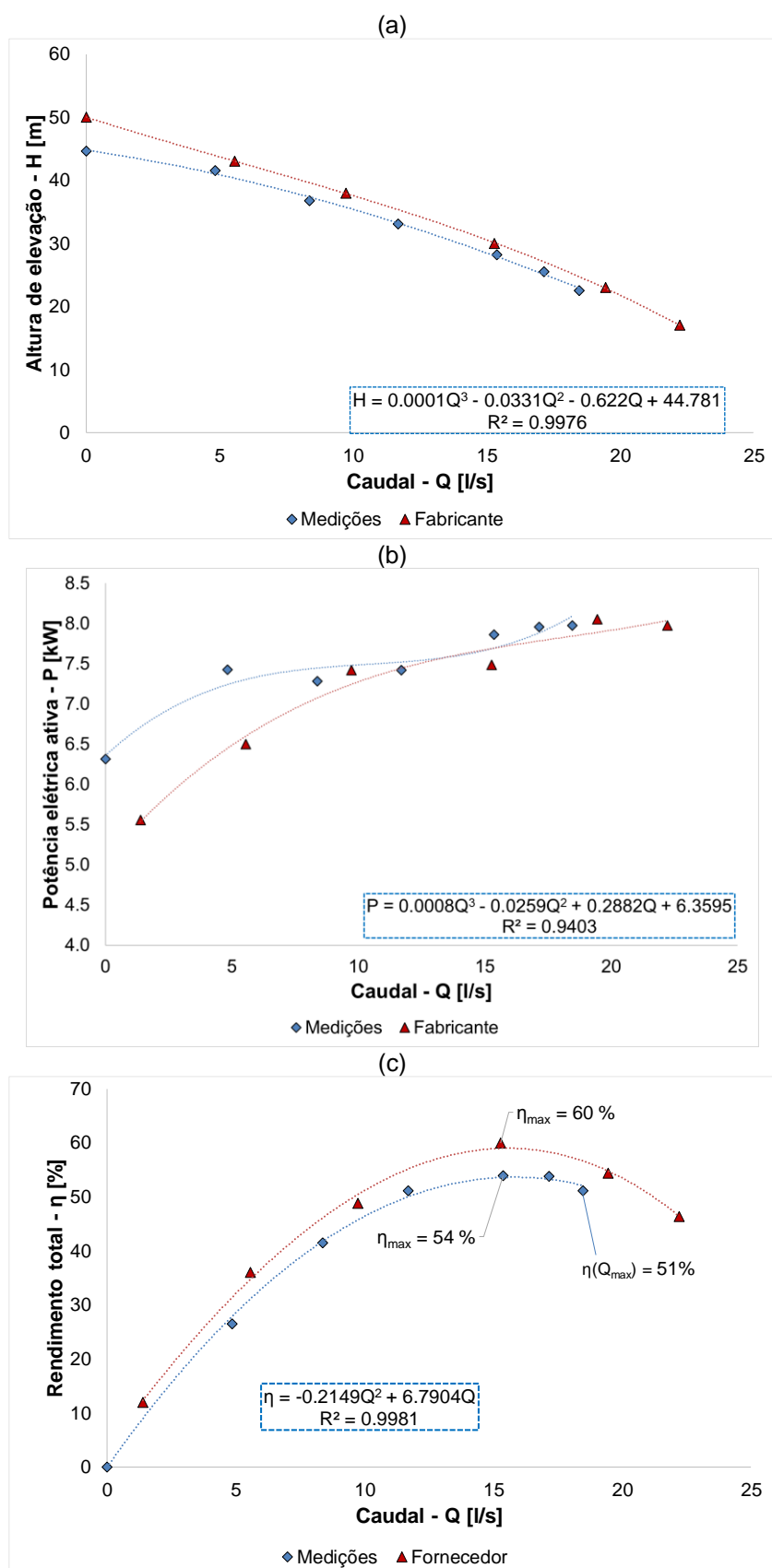


Figura 28. Grupo eletrobomba B7 | Curvas medidas vs curvas do fabricante: (a) Q-H, (b) Q-P, (c) Q- η

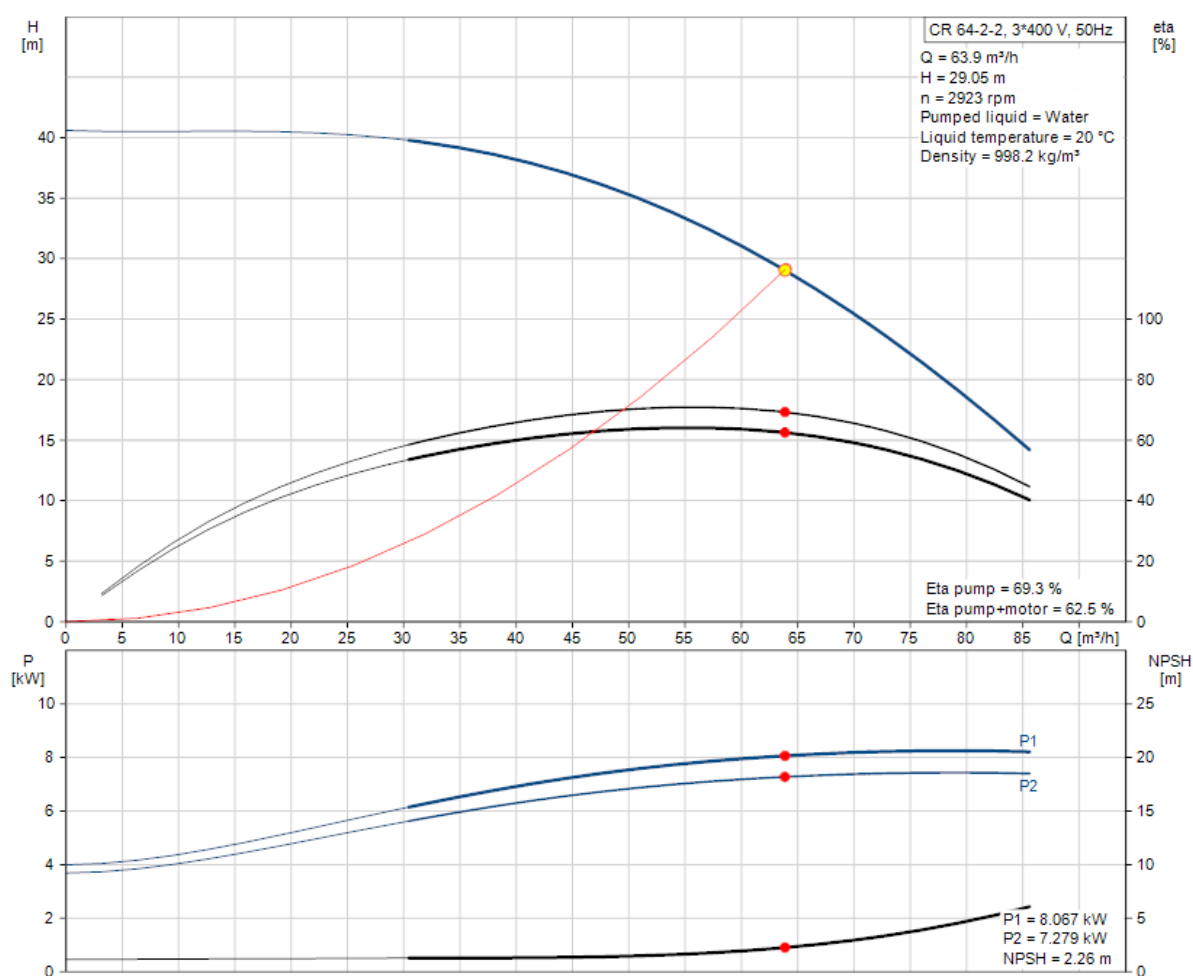


Figura 29. Grupo eletrobomba B8 | Curvas características fornecidas pelo fabricante (Grundfos CR 64-2-2 A-F-A-E EUBE). Ponto correspondente às condições nominais de funcionamento (disponível em <http://product-selection.grundfos.com>).

Ficha Técnica 2. Estação elevatória de Pinheiros Altos (AA)

Sistema	Abastecimento de água					
Descrição	A EE localiza-se em edifício independente dentro do recinto do reservatório principal.					
Características Técnicas	N.º de grupos eletrobomba: 3+1 de reserva (instalados em paralelo)					
	Características de cada grupo:					
	Grupo	Marca/ID	Q _N (l/s)	H _N (m)	P1 (kW)	P2 (kW)
	1 a 4	Grundfos CRE 45-2 AFAE-HQQE	15	57.2	12.3	11.2
Ano de construção	2012: Edifício; 2014: Equipamento					



Figura 30 – Estação elevatória de Pinheiros Altos

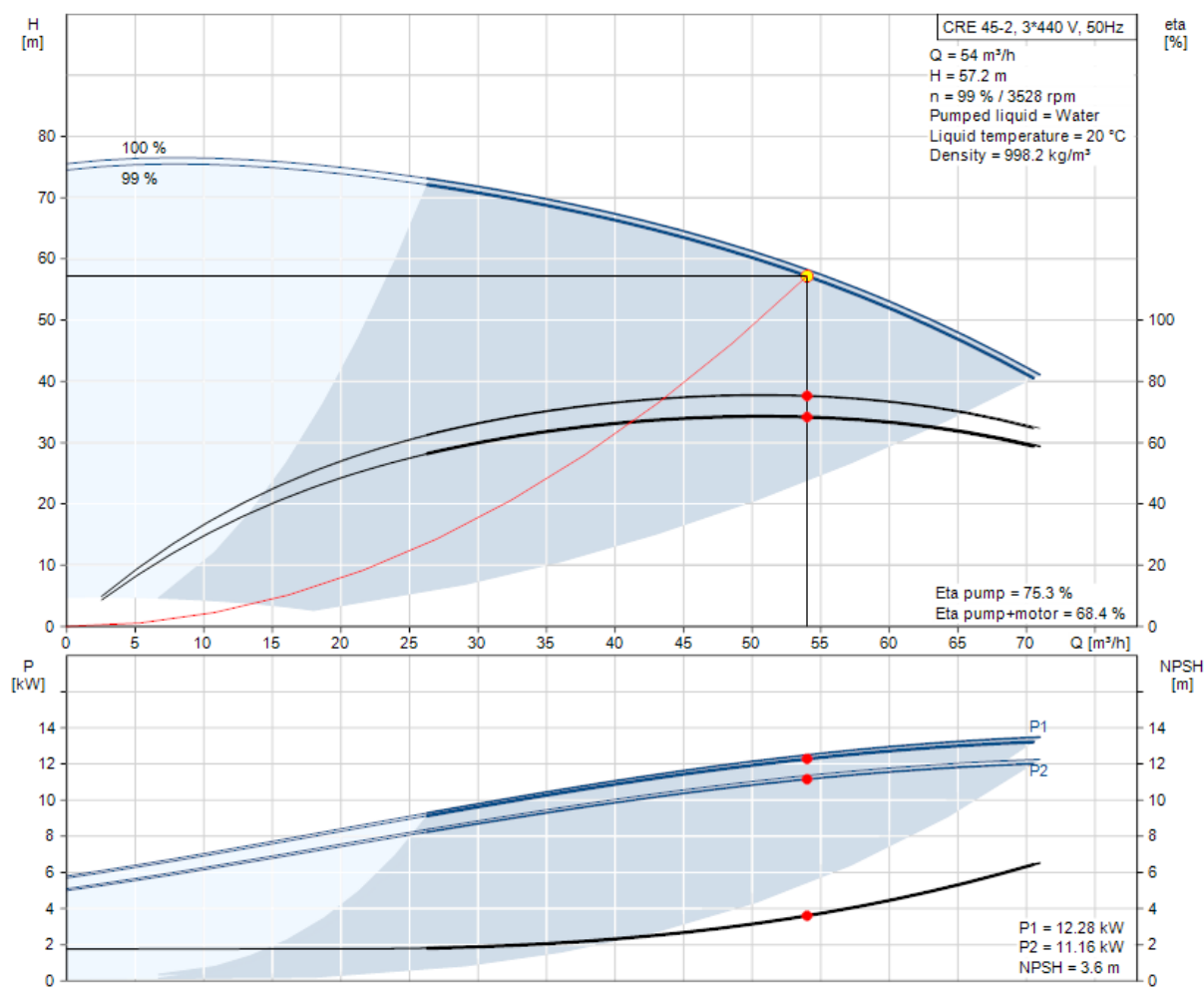


Figura 31 – Curvas da bomba Grundfos CRE 45-2 A-F-A-E-HQQE fornecidas pelo fabricante (disponível em <http://product-selection.grundfos.com>).