



A XVII-a Conferință internațională – multidisciplinară  
„Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”  
SEBEȘ, 2017

## **DETERMINAREA PARAMETRILOR REALI DE FUNȚIONARE A HIDROAGREGATELOR DIN CENTRALELE DE MICĂ CĂDERE**

Cristian PURECE, Adrian ADAM, Valeriu Nicolae PANAITESCU

### **DETERMINATION OF THE ACTUAL OPERATING PARAMETERS OF THE HYDRO UNITS OF A LOW HEAD HYDRO POWER PLANT**

The paper presents the flow rate calculation and measurement methodology for a high flow/low head hydro power plant with upstream cofferdam recesses.

At the same time, the paper presents the results of the *in situ* measurements of the actual operating parameters of the hydropower units, especially of the flow rate measurements carried out on the hydropower units' no.1 and no. 2 of Robești HPP. The measurements have been carried out in agreement with the provisions of CEI 41/1991 [4].

Keywords: discharge, efficiency, current meter method, hydro unit

Cuvinte cheie: debit, randament, metoda moriștilor hidrometrice, hidroagregat

#### **1. Introducere**

Funcționarea optimă a unui hidroagregat/a unei centrale, sau a unei cascade de centrale, este echivalentă cu un spor de energie sau cu existența unor amenajări (teoretice) ce ar avea o producție de energie electrică suplimentară de minim 2 %.

În vederea obținerii unui maxim de producție de energie electrică este necesar ca o centrală hidroelectrică cu mai multe grupuri să funcționeze la parametri optimi. Aceasta înseamnă o funcționare a hidroagregatelor centralei în zonele de randament maxim (zone care de obicei nu se regăsesc la puterea maximă de funcționare a unui hidroagregat) astfel încât centrala să funcționeze cu pierderi de sarcină minime (cu un debit minim) în condițiile unei puteri impuse pe centrală.

Indicatorul primordial care dă o caracteristică generală a modului de funcționare a hidroagregatelor unei centrale hidroelectrice este randamentul hidroagregatului; pe baza acestuia se poate estima starea mașinii dând informații asupra gradului de uzură pentru diferitele componente ale mașinii (rotor, aparat director, ejector), se pot explica cauzele care determină nivelul vibrațiilor și zgomotului, fiind de asemenea factorul principal care stă la baza elaborării strategiilor optime de exploatare și un element important în analiza oportunității pentru schimbări sau adaptări ale anumitor echipamente, sau pentru reevaluarea performanțelor mașinii în vederea realizării unor oferte de energie cât mai realiste pe piața liberă de energie.

Urmărirea periodică a randamentului hidroagregatelor este necesară, deoarece reprezintă un factor dinamic cu o evoluție descrescătoare în timp. Cunoașterea acestei evoluții oferă o bază tehnică în estimarea calității reparațiilor efectuate.

Dintre parametrii unei amenajări hidroenergetice, sau ai unui hidroagregat, parametrul a cărui măsurare pune problemele cele mai dificile este debitul. Măsurarea acestui parametru necesită o metodologie de măsurare complexă.

## 1.1. Obiectivul măsurătorilor



Obiectivul încercărilor l-au constituit turbinele de la cele două hidroagregate HA1 și HA2 din cadrul CHE Robești.

Fig. 1 CHE Robești

Centrala hidroelectrică CHE Robești este o centrală de mică cădere tip baraj, situată în frontul de retenție, aliniată cu barajul deversor, echipată cu două turbine

Kaplan și nișe amonte pentru batardouri. Centrala este dotată cu un RAV digital, electrohidraulic, cu dublu reglaj, de tip REGAT 6S.

Date generale ale centralei [3]:

- anul punerii în funcțiune PIF: 2012;
- debitul instalat: 165 m<sup>3</sup>/s pe turbină, 330 m<sup>3</sup>/s pe centrală;
- căderea brută:  $H = 11$  m;
- puterea nominală: 17,5 MW pe turbină, 35 MW pe centrală;
- tipul turbinelor: Kaplan verticale, cu dublu reglaj.

## 1.2. Parametrii măsuțați

Principalele obiectivele ale lucrării au constau în:

- determinarea performanțelor reale ale hidroagregatelor în cazul camelor combinatorice m<sup>3</sup>/s actuale;
- determinarea experimentală a camelor combinatorice optime;
- determinarea valorilor absolute ale debitului turbinat și a coeficientului debitmetric pentru prizele de presiune de pe camera spirală.

În cadrul acestor probe de performanță energetică, efectuate pentru determinarea randamentului real de funcționare ale celor două hidroagregate de la CHE Robești, au fost măsurate următoarele mărimi electrice și hidraulice: puterea activă la bornele generatorului  $P_G$ ; curentul statoric  $I_{st}$ ; tensiunea statorică  $U_{st}$ ; curentul de excitație  $I_{ex}$ ; debitul turbinat  $Q$ ; nivelul aval  $\nabla_{av}$ ; nivelul amonte  $\nabla_{am}$ ; diferența de presiune pe perechile de prize de pe camera spirală  $\Delta h$ ; deschiderea palelor rotorice  $S_{ad}$ ; deschiderea aparatului director  $S_r$ .

Probele au fost realizate în conformitate cu prevederile codului CEI 41/1991 [4] (în prezent transformat în SR EN 60041), ale codurilor CEI 62006/2010 [5] și ASME PCT-18/2002 [1], efectuate cu o periodicitate reglementată de prescripția PE-301/93 [8]. Aceste probe de performanță energetică oferă o imagine a performanțelor reale de funcționare ale unui hidroagregat comparativ cu cele de proiect ale hidroagregatelor supuse probelor.

## 2. Metoda utilizată pentru determinarea debitelor și etalonarea camerelor spirale

### 2.1. Principiul teoretic al metodei

În mod frecvent determinarea debitului în cazul centralelor de mică cădere dotate cu nișe de batardou se face cu metoda explorării

câmpului de viteze cu moriști hidrometrice, metodă cunoscută și sub denumirea de *metoda moriștilor hidrometrice* [9], acesta fiind de altfel singura metodă recomandată în CEI 41/1991 [4] pentru determinarea debitelor absolute pentru acest tip de centrală hidroelectrică. Metoda are ca scop determinarea distribuției vitezelor într-o secțiune transversală a curentului de apă în vederea determinării debitului supus măsurării. Încercarea are caracter expeditiv și este aplicabilă pentru apă suficient de curată pentru ca particulele dizolvate sau în suspensie să nu afecteze acuratețea măsurătorilor.

Debitul se calculează ca produs între viteza medie și aria secțiunii,

$$Q = v \times S. \quad (1)$$

Viteza punctuală a apei în puncte de măsură se calculează pe baza ecuației de etalonare a moriștilor hidrometrice

$$v = a N + b, \quad (2)$$

unde:

- $a, b$ , coeficienții ecuației;
- $N$ , turația moriștii determinată prin relația  $N = \lambda n / t$ ;
- $n$  este numărul de impulsuri înregistrat în perioada de măsură  $t$ ,  $\lambda$  o constantă ce reprezintă numărul de impulsuri ale palei ce corespund unei rotații complete a moriștii.

Vitezele punctuale măsurate într-o secțiune trebuie să reprezinte componenta normală a vitezei apei (figura 2) [7].

Componenta normală a vitezei în funcție de viteza reală a apei are expresia

$$v_n = v_w \cos \alpha, \quad (3)$$

unde  $\alpha$  este unghiul de curgere, adică unghiul dintre vectorul vitezei reale a apei și perpendiculara la secțiunea de măsură.

Relația de calcul între viteza măsurată de o morișcă și modulul vectorului vitezei reale a apei este

$$v = k_m v_w \cos(\alpha - \beta), \quad (4)$$

unde:

- $\beta$  este unghiul dintre axa moriștii și perpendiculara la secțiunea de măsură;
- $k_m$  este coeficientul de corecție datorat tipului de morișcă și se determină experimental în laborator.

Din ecuațiile (3) și (4) rezultă expresia componentei normale a vitezei apei,

$$v_n = v \frac{1}{k_m} \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha - \beta)} \quad (5)$$

- linia de curent
- axa moriști hidrometrice
- normala la secțiunea de măsură

- $v$  - viteza reală a apei
- $v_w$  - viteza măsurată de o morișcă
- $v_n$  - componenta normală a vitezei
- $H$  - înălțimea secțiunii de măsură
- $L$  - lungimea secțiunii de măsură

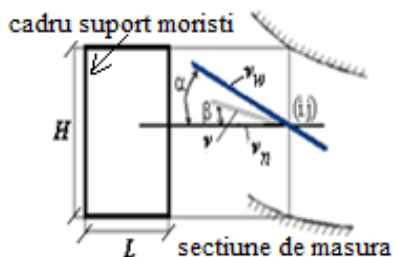


Fig. 2 Reprezentarea curgerii într-un punct  $(i,j)$  al secțiunii de măsură

Relația de calcul a componentei normale a vitezei apei pentru o morișcă situată pe orizontala  $i$  și verticala  $j$   $v_n(i,j)$  conform figurii 2 este,

$$v_n(i,j) = (a(i,j) \cdot N(i,j) + b(i,j)) \cos \alpha(i) / k_m \cdot \cos(\alpha(i) - \beta(i)) \quad (6)$$

## 2.2. Modul de calcul al debitului

Debitul de apă într-o secțiune trapezoidală sau rectangulară pentru o suprafață elementală  $dL \cdot dh$  se poate scrie sub forma

$$dQ = v(l,h) dL dh \quad (7)$$

Pentru întreaga suprafață de măsură debitul se calculează astfel

$$Q = \iint_S v(l,h) dL dh \cong \sum_i v_i \Delta L_i \Delta h_i \quad (8)$$

Ecuația (8) se poate exprima sub forma unei integrale simple în două moduri

$$Q = \int_0^L \left( \int_0^H v dh \right) dL \quad ; \quad Q = \int_0^H \left( \int_0^L v dL \right) dh \quad (9)$$

Calculul integralei (9) se poate face cu ajutorul funcției de interpolare Spline [10], cu polinoame de interpolare Lagrange, cu metoda Simpson [11], cu metoda de integrare din ISO 3354 [2].

Pentru trasarea distribuției de viteze în zona de frontieră se poate utiliza legea de distribuție a vitezelor a lui Kármán, relația (10) [6].

$$v_x = v_a \left( \frac{x}{a} \right)^{1/m} \quad (10)$$

unde:  $v_x$  este viteza în zona de extrapolare la distanța  $x$  față de peretele secțiunii,  $v_a$  viteza în punctul de măsură  $a$  situat la distanța cea mai apropiată față de peretele secțiunii de măsură, iar  $m$  este un coeficient care ține seama de rugozitatea peretelui și de condițiile de curgere.

### 3. Măsurarea debitului turbinat la CHE Robești

#### 3.1. Metodologia de măsură utilizată



Aspecte din timpul măsurării debitului în nișele amonte ale hidroagregatelor de la CHE Robești sunt redată în figura 3.

Fig. 3 Lansare cadru semi-mobil cu moriști hidrometrice în nișele batardourilor amonte de la CHE Robești

Numărul de puncte de măsură a vitezelor necesare determinării debitului turbinat pentru secțiunea de măsură de  $70 \text{ m}^2$  a fost stabilit conform CEI 41/1991 și a fost cuprins între 98 și 148 puncte de măsură. Pentru a respecta această prevedere a codului de măsurători s-au efectuat măsurători pe 12 paliere cu 9 moriști amplasate pe cadru semi-mobil, rezultând 108 puncte de măsură a vitezelor [3].

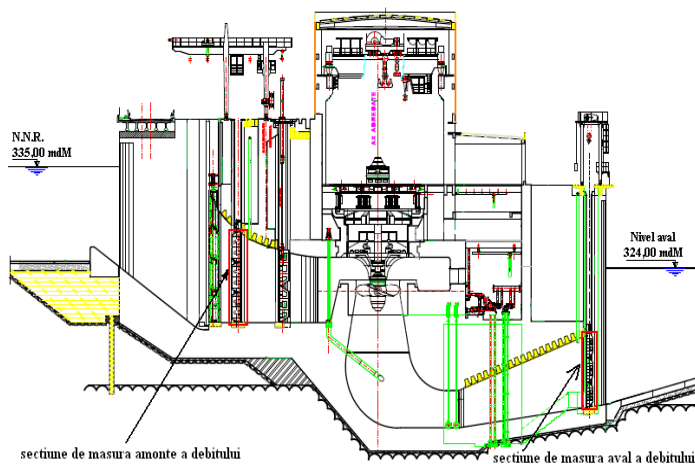
Viteza medie în secțiunea de măsură din nișa batardourilor amonte de la CHE Robești (figura 4) s-a determinat prin integrare

numerică a vitezelor măsurate, cu ajutorul programului de calcul

*Debit.m.*

Fig. 4

Secțiune transversală prin CHE Robești



Unghiul mediu de amplasare al moriștilor hidrometrice pe cadrul semi-mobil a fost de 20°.

Fiecare dintre vitezele în punctele măsurare trebuie să reprezinte componenta normală a vitezelor în secțiunea de măsură. De aceea fiecare dintre vitezele punctuale măsurate pe cele 12 paliere s-au înmulțit cu raportul  $\cos \alpha / \cos(\alpha - \beta)$ .

Unghiurile  $\alpha$  și  $\beta$  pentru care s-au efectuat măsurătorile debitmetrice s-au determinat prin construirea spectrului de curgere în secțiunea de măsură.

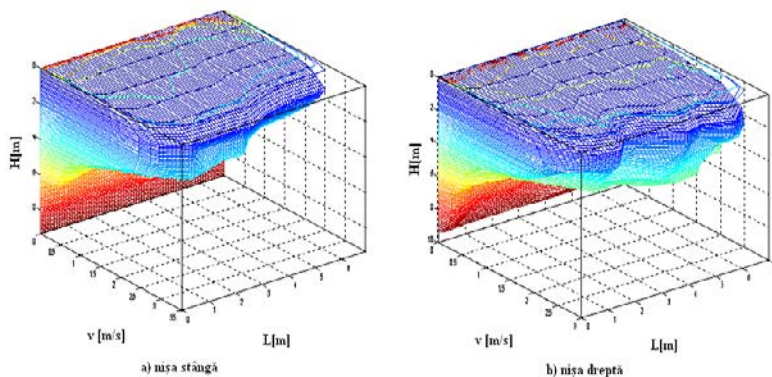
### 3.2. Rezultatele obținute în urma măsurărilor efectuate

În urma efectuării măsurătorilor debitmetrice în nișele de la hidroagregatele HA1 și HA2 s-au obținut următoarele debite medii:

- pentru HA1 de la CHE Robești:
  - $Q_{m11} = 57,1 \text{ m}^3/\text{s}$  pentru nișa stângă,
  - $Q_{m12} = 60,3 \text{ m}^3/\text{s}$  pentru nișa dreaptă.
- pentru HA2 de la CHE Robești:
  - $Q_{m21} = 54,7 \text{ m}^3/\text{s}$  pentru nișa stângă,
  - $Q_{m22} = 57,4 \text{ m}^3/\text{s}$  pentru nișa dreaptă.

O distribuție 3D în funcție de înălțimea ( $H$ ) și lungimea ( $L$ ) secțiunii de măsură a vitezelor măsurate cu cadru semi-mobil în cele două nișe de la HA1 este redată în figura 5 [3].

O distribuție 3D în funcție de înălțimea ( $H$ ) și lungimea ( $L$ ) secțiunii de măsură a vitezelor măsurate cu cadrul semi-mobil în cele



două nișe de la HA2 este redată în figura 6 [3].

Fig. 5 Reprezentarea 3D a distribuției vitezelor în nișele de la HA1

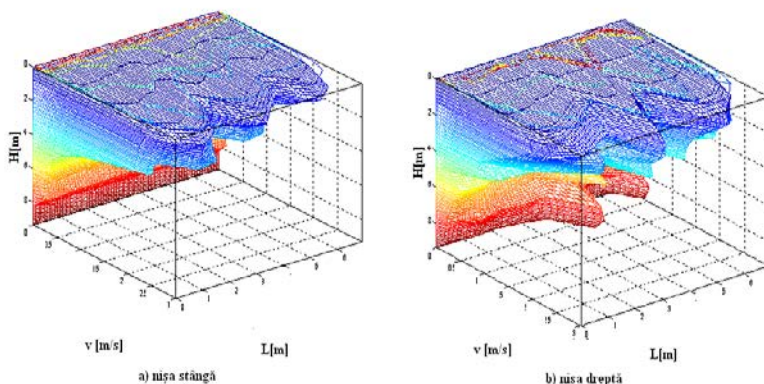


Fig. 6 Reprezentarea 3D a distribuției vitezelor în nișele de la HA2

Prin însumarea debitului de pe nișa stângă cu debitul de pe nișa dreaptă s-a obținut debitul total pentru fiecare hidroagregat.

$Q_{total1} = 117,4$  mc/s debitul pentru HA1;

$Q_{total2} = 112,1$  mc/s debitul pentru HA2.

În timpul probelor debitmetrice, debitul a fost menținut constant pe centrală, funcționând pe rând cu câte un hidroagregat pentru a evita efectul interinfluenței între hidroagregate.



Atât hidroagregatul HA1 cât și HA2 au funcționat în timpul probelor cu o putere la bornele generatorului de 10 MW.

Utilizând în formula Winter-Kennedy (11) cu ajutorul acestor debite măsurate *in situ* s-au etalonat prizele de presiune de pe camerele spirale ale celor două hidroagregate,

$$Q = K\sqrt{\Delta h}, \quad (11)$$

unde:

$K$  - coeficientul debitmetric al prizei de presiune;

$\Delta h$  - diferența de presiune măsurată pe prizele de presiune.

Eroarea de măsură a metodei moriștilor hidrometrice pentru dispozitivele de admisie cu racord de intrare (cum este cazul centralelor de mică cădere dotate cu nișe de batardou în amonte) conform CEI 41/1991 este de  $\pm 1,5\%$ .

#### 4. Concluzii

În conformitate cu rezultatele măsurătorilor efectuate, caracteristicile putere - randament (figura 8) ale celor două turbine se înscriu în cea mai mare parte a domeniului de funcționare în banda de incertitudine de  $\pm 2\%$  față de caracteristica garantată.

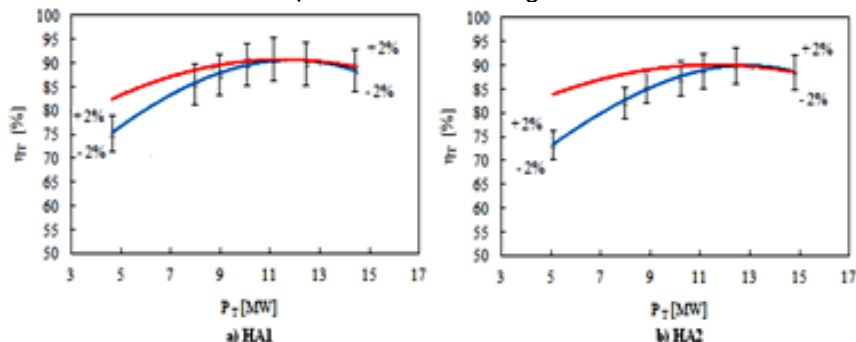


Fig. 8 Caracteristicile putere - randament ale turbinelor de la hidroagregatele HA1 a) și HA2 b) din CHE Robești

Încercările confirmă realizarea de către cele două hidroagregate ale CHE Robești a garanțiilor de randament pentru căderile la care s-au efectuat măsurătorile.

Maximul de randament pe caracteristica randament turbină funcție de puterea la cupla turbinei determinată cu datele din măsurători este: 90,78 % pentru 11,11 m - HA1 la  $H_{nc} = 10,4$  m și 90,60 % pentru 12,36 m - HA2 la  $H_{nc} = 10,1$  m. Măsurătorile

debitmetrice din prezenta lucrare au fost efectuate în nișele batardourilor amonte. Se propune ca într-o viitoare lucrare măsurătorile debitmetrice să se efectueze în nișele batardourilor aval și să se compare rezultatele obținute cu cele două metodologii de măsurare a debitului turbinat la o centrală de mică cădere.

#### BIBLIOGRAFIE

- [1] \* \* \* ASME PTC 18, American National Standard, *Hydraulic turbines and pump-turbine performance test codes*. New York, USA, ASME 2002 (consolidation of ASME PTC 18-1992 and ASME PTC 18.1-1978).
- [2] \* \* \* ISO 3354 – (2008). *Measurements of clean water in closed conduits. Velocity-area method using current-meters in full conduits and under regular flow conditions*. ISO 3<sup>rd</sup> edition 2008.
- [3] \* \* \* INCDE ICEMENERG, *Determinarea curbelor combinatorice și a performanțelor energetice ale hidroagregatelor CHE Robești*, Contr. 1180/2016, București 2016.
- [4] \* \* \* CEI 41, *Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pumps-turbines*. Geneva, Switzerland, CEI 3<sup>rd</sup> edition, 1991
- [5] \* \* \* CEI 62006, *Hydraulic machines. Acceptance tests of small hydroelectric installations*. Geneva, Switzerland, CEI 1<sup>st</sup> edition, 2010.
- [6] Gonzales, D., Murciaccia, F., *Turbine acceptance tests at Frieira HPP, Mino River, Spain with Acoustic Scintillation Flow Meters and current meters*. Proc. HydroVision, Denver USA 2013 .
- [7] Purece, C., Cernica, I., Dumitrescu, S., *Improvement of measurements for the assessment of operationalefficiency of the hydropower plants*. Online in Journal of Hydraulic Engineering (ISH), doi:10.1080/09715010.2015.1103200, în dec. 2015.
- [8] \* \* \* PE 301, *Regulament de exploatare a instalațiilor de turbine hidraulice din centralele hidroelectrice*, Editura ICEMENERG, București 1994.
- [9] Skripalle, J., *Method to measure flow rates accurately in a short intake Kaplan turbines*. Proc. of Inter. Conference Hydro 2010 Lisbon, Portugal, 26 Sept. 2010.
- [10] Spielbauer, M., Müller, W.F.O., *Numerisches Integrations verfahren zur Auswertung von Flügelmessungen*. Die Wasserwirtschaft 11,1969, pp 313-320.
- [11] Staubli, T., Abgottsporn, A., *Integration of current meter measurements in general flow cross sections*. Proc., 10<sup>th</sup> International Conference on Innovation in Hydraulic Efficiency Measurement, Itajubá, Brasil, July 2014.
- [12] Bejan, M., *În lumea unităților de măsură*, ediția a doua revăzută și adăugită, Editura Academiei Române, București 2005 și Editura AGIR, București, 2005.

Dr. Ing. Cristian PURECE  
e-mail: cristianicemenerg@yahoo.com

Dr. Ing. Adrian ADAM

e-mail: adam@icemenerg.ro  
INCDE ICEMENERG București

Profesor universitar emerit Dr. Ing. Valeriu Nicolae PANAITESCU,  
UPB București, Facultatea de Energetică  
e-mail: valeriu.panaitescu@yahoo.com