

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**PROYECTO DE TESIS 2**

**DISEÑO DE UN AEROGENERADOR VERTICAL MODELO  
DARRIEUS PARA ENSAYOS EN EL LABORATORIO DE  
ENERGÍA DE LA PUCP**

**ANEXOS**

**ALUMNO: LESLIE ROCÍO HERNÁNDEZ BRAVO**

**ASESOR: Dr. LUIS RICARDO CHIRINOS GARCÍA**

**Lima, abril del 2016**

## ANEXO 1. Coordenadas del perfil aerodinámico NACA 0018

FUENTE: [Consultado el 17 de noviembre del 2014]

<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>

Tabla 1: Coordenadas del perfil aerodinámico NACA 0018

X	Y
1.0000	0.00189
0.9500	0.01210
0.9000	0.02172
0.8000	0.03935
0.7000	0.05496
0.6000	0.06845
0.5000	0.07941
0.4000	0.08705
0.3000	0.09003
0.2500	0.08912
0.2000	0.08606
0.1500	0.08018
0.1000	0.07024
0.0750	0.06300
0.0500	0.05332
0.0250	0.03922
0.0125	0.02841
0.0000	0.00000
0.0125	-0.02841
0.0250	-0.03922
0.0500	-0.05332
0.0750	-0.06300
0.1000	-0.07024
0.1500	-0.08018
0.2000	-0.08606
0.2500	-0.08912
0.3000	-0.09003
0.4000	-0.08705
0.5000	-0.07941
0.6000	-0.06845
0.7000	-0.05496
0.8000	-0.03935
0.9000	-0.02172
0.9500	-0.01210
1.0000	-0.00189

## ANEXO 2. Ficha técnica del material ABS-M30

FUENTE: Hoja de especificaciones de ABS-M30

Consultado el 28 de agosto del 2015]

<[www.stratasys.com/es/materiales/fdm/abs-m30](http://www.stratasys.com/es/materiales/fdm/abs-m30)>

Mechanical Properties <sup>1</sup>	Test Method	English	Metric
Tensile Strength (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	5,200 psi	36 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	350,000 psi	2,400 MPa
Tensile Elongation (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4%	4%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,800 psi	61 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	336,000 psi	2,300 MPa
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.6 ft-lb/in	139 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	5.3 ft-lb/in	283 J/m

Thermal Properties <sup>2</sup>	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	204°F	96°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	180°F	82°C
Vicat Softening Temperature (Rate B/50)	ASTM D1525	210°F	99°C
Glass Transition (Tg)	DSC (SSYS)	226°F	108°C
Coefficient of Thermal Expansion (flow)	ASTM E831	4.9E-05 in/in/°F	8.82E-05 mm/mm/°C
Coefficient of Thermal Expansion (xflow)	ASTM E831	4.7E-05 in/in/°F	8.46E-05 mm/mm/°C
Melt Point	-----	Not Applicable <sup>2</sup>	Not Applicable <sup>2</sup>

Electrical Properties <sup>4</sup>	Test Method	Value Range
Volume Resistivity	ASTM D257	4.0x10e14 - 5.0x10e13 ohms
Dielectric Constant	ASTM D150-98	2.9 - 2.7
Dissipation Factor	ASTM D150-98	.0052 - .0049
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	370 - 71 V/mil

Other <sup>2</sup>	Test Method	Value
Specific Gravity	ASTM D792	1.04
Flame Classification	UL94	HB (0.09", 2.50 mm)
Rockwell Hardness	ASTM D785	109.5
UL File Number	-----	E345258

### ANEXO 3. Ejemplo de cálculo

El presente ejemplo de cálculo se basó en la teoría de Double Multiple Streamtube, el cual se describe en el documento de tesis.

Los datos de entrada empleados para este ejemplo fueron los que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de entrada

Parámetros de entrada	Símbolo	Valor
Velocidad del viento	$V_o$	6 m/s
Radio de la turbina	R	0.165 m
Número de palas	N	3
Longitud de cuerda	C	0.06 m
Altura de la pala	H	0.33 m
Velocidad angular	$\omega$	87 rad/s
Ángulo azimutal	$\theta$	40°

Se definió un rango de velocidad angular a la que girará el rotor del aerogenerador:

$$\omega = [76; 96] \text{ rad/s}$$

Dentro de este rango, se seleccionó el siguiente valor para realizar el ejemplo de cálculo:

$$\omega = 87 \text{ rad/s}$$

El Tip Speed Ratio (TSR) se define como:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V_o} = \frac{87 \cdot 0,165}{6} = 2,3925$$

Área de barrido:

$$S = 2 H \cdot R = 2 \cdot 0.33 \cdot 0.165 = 2,0545 \text{ m}^2$$

**Aguas arriba:**

Los ángulos de barrido que se presentan en la sección de aguas arriba, se encuentran entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$ . Para el presente ejemplo de cálculo se considera que el número de tubos de corriente es el siguiente:

$$n = 26$$

Eso quiere decir:

$$\theta = 40^\circ$$

Se definió un contador que comenzó en cero hasta el “n”, la cantidad de tubos de corriente.

$$i = 0 \text{ y } f = 1$$

Hasta que:

$$1 - f > 10^{-4}$$

Luego, se empleó el software Matlab como herramienta para la iteración de las siguientes ecuaciones. Para el cálculo de la función “g”, se utilizaron los valores de los coeficientes hallados posteriormente.

$$g = \int_{-90^\circ}^{90^\circ} |\sec \theta| \cdot (C_n \cdot \cos \theta - C_t \cdot \sin \theta) \cdot \left(\frac{W_u}{V_u}\right)^2 d\theta$$

$$u = \frac{N \cdot c \cdot g}{8 \cdot \pi \cdot R}$$

$$f = \frac{\pi}{u + \pi}$$

Como se sabe el valor de la velocidad incidente sufre una desaceleración y luego del proceso de iteración, se obtuvo el siguiente valor del factor.

$$f = 0,9894$$

El valor de la velocidad incidente aguas arriba ( $V_u$ ) es menor que la velocidad del viento ( $V_o$ ) producto de la desaceleración.

$$V_u = V_o \cdot f = 6 \cdot 0,9894 = 5,9364 \text{ m/s}$$

Local Tip Speed Ratio:

$$\lambda_L = \frac{\omega \cdot R}{V_u} = \frac{87 \cdot 0,165}{5,9364} = 2,4181$$

Velocidad local del aire, resultante de velocidad rotacional que depende la velocidad inducida y del TSR:

$$W_u = \sqrt{V_u^2 [(\lambda - \text{seno}^2\theta)^2 + \text{cos}^2\theta]}$$

$$W_u = 13,205 \text{ rad/s}$$

Ángulo de ataque:

$$\alpha = \text{arcoseno} \left( \frac{\text{cos } \theta \cdot \text{cos } \alpha_o - (\lambda - \text{seno}\theta) \cdot \text{seno}\alpha_o}{\sqrt{[(\lambda - \text{seno}^2\theta)^2 + \text{cos}^2\theta]}} \right)$$

$$\alpha = 19,831^\circ$$

Se interpolaron los valores de los coeficientes de arrastre y sustentación (mostrados en las Figuras 2.12 y 2.13) de acuerdo al ángulo de ataque y se obtuvieron los siguientes valores:

$$C_l = 0,4367$$

$$C_d = 0,2783$$

Entonces, los valores de los coeficientes normales y tangenciales aguas arriba son:

$$C_n = C_l \cdot \cos \alpha + C_d \cdot \sin \alpha = 1,04034 \cdot \cos 46,61^\circ + 1,12008 \cdot \sin 46,61^\circ = 0,5052$$

$$C_t = C_l \cdot \sin \alpha + C_d \cdot \cos \alpha = 1,04034 \cdot \sin 46,61^\circ + 1,12008 \cdot \cos 46,61^\circ = 0,4099$$

Fuerzas de arrastre y sustentación:

$$F_n = \frac{c \cdot H}{S} \cdot C_n \cdot \left(\frac{W_u}{V_o}\right)^2 = 0,02994 \text{ N}$$

$$F_t = \frac{c \cdot H}{S} \cdot C_t \cdot \left(\frac{W_u}{V_o}\right)^2 = 0,01862 \text{ N}$$

Torque promedio producido por la corriente aguas arriba del rotor:

$$T_{av} = \frac{N}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} Q(\theta) d\theta$$

Donde:

$$Q(\theta) = \frac{1}{2} \rho c R L C_t W^2$$

El coeficiente de torque promedio se calcula de la siguiente manera, en función de la ecuación anterior:

$$C_{par} = \frac{T_{av}}{\frac{1}{2} \rho V_o^2 S R}$$

**Aguas abajo:**

De la misma manera que se realizó el cálculo en la sección aguas arriba del rotor, se calculó para la sección aguas abajo del rotor.

Los ángulos de barrido que se presentan en la sección de aguas arriba, se encuentran entre  $90^\circ$  y  $270^\circ$ . Para el presente ejemplo de cálculo se considera el mismo valor de tubos de corrientes  $n = 26$ ; eso quiere decir:

$$\theta = 140^\circ$$

Se definió un contador que comenzó en cero hasta el "n", la cantidad de tubos de corriente.

$$j = 0 \text{ y } h = 1$$

Hasta que

$$1 - h > 10^{-4}$$

Para el cálculo de la función "g", se utilizaron los valores de los coeficientes hallados posteriormente.

$$g = \int_{-90^\circ}^{90^\circ} |\sec \theta| \cdot (C_n \cdot \cos \theta - C_t \cdot \sin \theta) \cdot \left(\frac{W_u}{V_u}\right)^2 d\theta$$

$$u = \frac{N \cdot c \cdot g}{8 \cdot \pi \cdot R}$$

$$h = \frac{\pi}{u + \pi} = 1,0107$$

Velocidad incidente aguas abajo:

$$V_d = V_o \cdot j = 6 \cdot 1,0107 = 6,0642 \text{ m/s}$$

Local Tip Speed Ratio:

$$\lambda_L = \frac{\omega \cdot R}{V_d} = \frac{87 \cdot 0,165}{6,0642} = 2,3672$$

Velocidad rotacional:



$$W_d = \sqrt{V_u^2 [(\lambda - \text{seno}^2\theta)^2 + \text{cos}^2\theta]}$$

$$W_d = 6,4185 \text{ rad/s}$$

Ángulo de ataque:

$$\alpha = \text{arcoseno} \left( \frac{\cos \theta \cdot \cos \alpha_o - (\lambda - \text{seno}\theta) \cdot \text{seno}\alpha_o}{\sqrt{[(\lambda - \text{seno}^2\theta)^2 + \text{cos}^2\theta]}} \right)$$

$$\alpha = -19,831^\circ$$

Como se observa, el ángulo de ataque es negativo. En ese caso, se trabajó con el valor absoluto:

$$\alpha = 19,831^\circ$$

Luego de interpolar los valores de los coeficientes de arrastre y sustentación (mostrados en las Figuras 2.12 y 2.13) se obtuvieron los siguientes valores:

$$C_l = 0,4367$$

$$C_d = 0,2783$$

Coficiente normal y tangencial aguas abajo:

$$C_n = C_l \cdot \cos \alpha + C_d \cdot \sin \alpha = 1,04034 \cdot \cos 46,61^\circ + 1,12008 \cdot \sin 46,61^\circ = 0,5052$$

$$C_t = C_l \cdot \sin \alpha + C_d \cdot \cos \alpha = 1,04034 \cdot \sin 46,61^\circ + 1,12008 \cdot \cos 46,61^\circ = 0,4099$$

Fuerzas de arrastre y sustentación:

$$F_n = \frac{c \cdot H}{S} \cdot C_n \cdot \left( \frac{W_u}{V_o} \right)^2 = 0,00557 \text{ N}$$

$$F_t = \frac{c \cdot H}{S} \cdot C_t \cdot \left(\frac{W_u}{V_o}\right)^2 = 0,00452 N$$

Torque promedio producido por la corriente aguas abajo del rotor:

$$T_{av} = \frac{N}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} Q(\theta) d\theta$$

Donde:

$$Q(\theta) = \frac{1}{2} \rho c R L C_t W^2$$

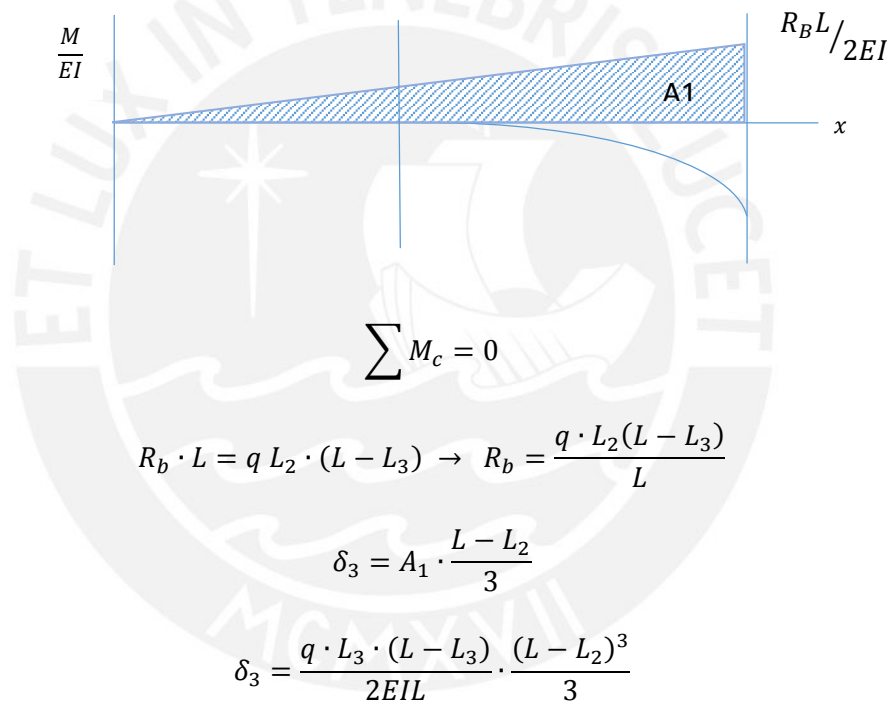
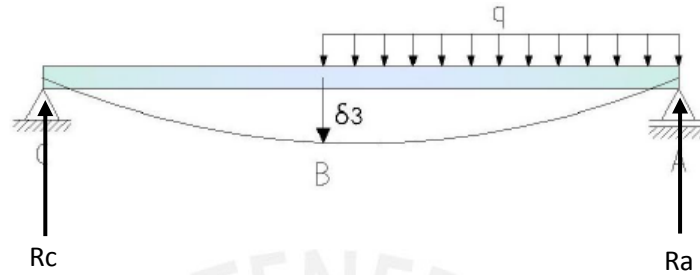
Coefficiente de potencia promedio aguas abajo:

$$C_{p_{ab}} = \frac{T_{av}}{\frac{1}{2} \rho V_o^2 S R}$$

Finalmente, El coeficiente de potencia se calcula de la siguiente manera:

$$C_p = C_{p_{ar}} + C_{p_{ab}} = 0,3619$$

**ANEXO 4.** Procedimiento para hallar la ecuación de desplazamiento en la sección B

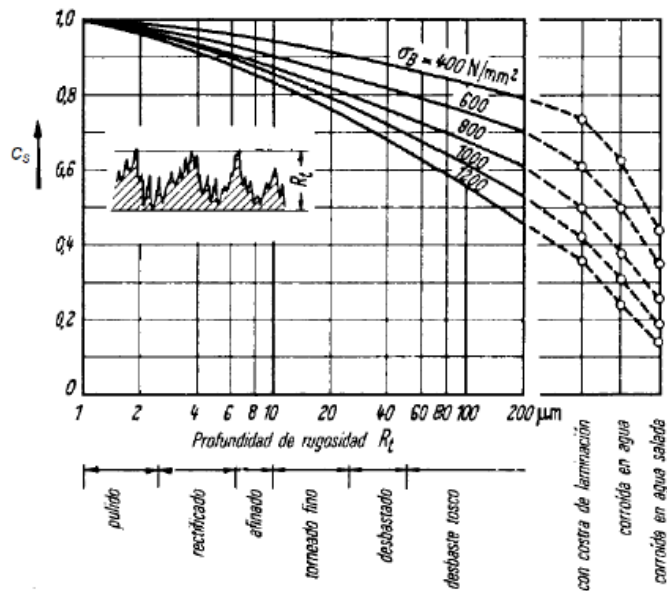


**ANEXO 5.** Coeficientes usados para el cálculo a fatiga

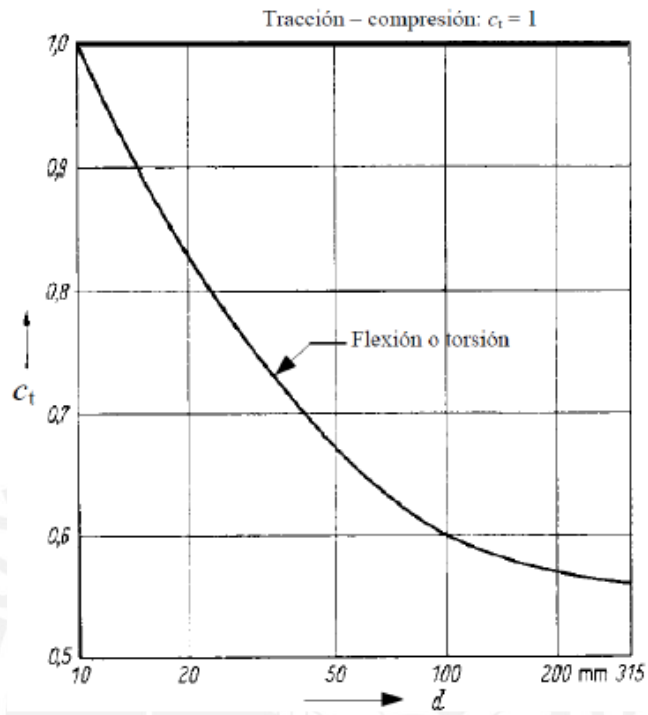
FUENTE: Apuntes de clase RODRIGUEZ H, 2006. Resistencia de materiales 2. Lima: PUCP.

**Coeficiente de superficie ( $C_s$ )**

Valor medio de la rugosidad:  $R_a \cong 0,1 R_z^{1,15}$  (donde  $R_z \cong R_t$ )



### Coeficiente de tamaño ( $C_t$ )



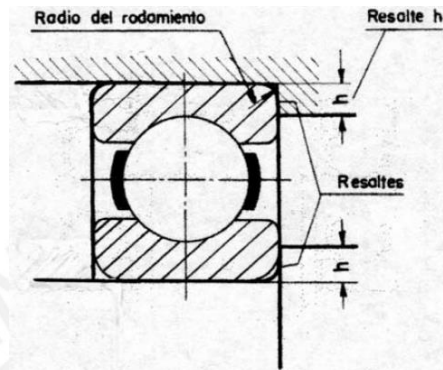
### Coeficiente de carga ( $C_{carga}$ )

Tipo de carga	$C_{carga}$
Flexión	1,0
Axial	0,85
Torsión	1,00

[Ref.: Ch. Lipson & R. Juvinal: Handbook of Stress and Strength]

**ANEXO 6.** Resaltes en los ejes y en los alojamientos para rodamientos

FUENTE: Curso de Dibujo Mecánico 2

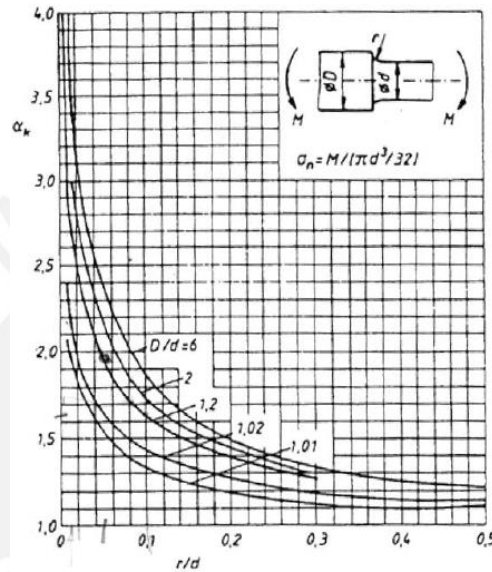


**RESALTES EN LOS EJES Y EN LOS ALOJAMIENTOS PARA RODAMIENTOS**

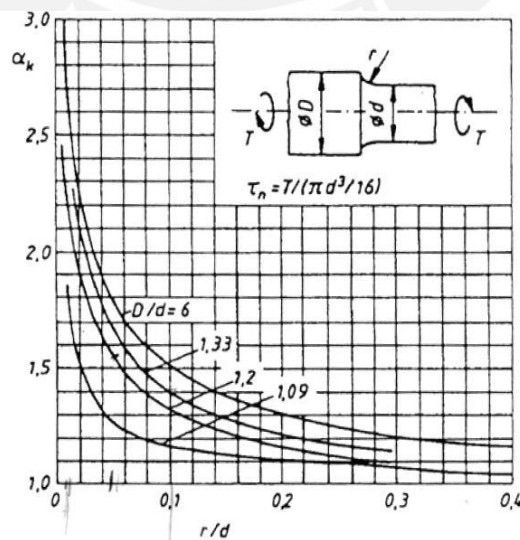
Radios		Altura del resalte h		
r	r <sub>1</sub>	Serie extra ligera	Ligera y media	Serie pesada
0,5	0,3	1,5	1,5	—
0,8	0,5	2	2	—
1	0,6	2,5	2,5	—
1,2	0,8	3	3	—
1,5	1	3	3	—
2	1	3,5	3,5	4,5
2,5	1,5	4,5	4,5	5
3	2	5	5	5,5
3,5	2	6	6	6,5
4	2,5	7	7	7,5
5	3	9	9	9,5
6	4	11	11	12
8	5	14	14	15
10	6	—	—	—

**ANEXO 7.** Factor geométrico de concentración de esfuerzos ( $\alpha_K$ )

FUENTE: Apuntes de clase RODRIGUEZ H, 2006. Resistencia de materiales 2. Lima: PUCP.



Factor geométrico de concentración de esfuerzos  $\alpha_K$  para ejes con reducción de sección para cargas de flexión



Factor geométrico de concentración de esfuerzos  $\alpha_K$  para ejes con reducción de sección para cargas de torsión





## ANEXO 8. Pesos de los elementos

FUENTE: Propia

Tabla 3: Pesos de los elementos

Elemento	Cantidad	Peso(kg)	Peso total (kg)
Álabe	3	0.281	0.843
Eje	1	1.394	1.394
Rodamiento con chumacera	2	0.43	0.86
Rodamiento con brida	1	0.3	0.3
Brazo	3	0.039	0.117
Disco	1	0.501	0.501
Base	1	0.274	0.274
Triángulo	2	0.042	0.084
Acoplamiento	2	0.1361	0.2722
Sensor	1	0.83	0.83
T	1	4.97	4.97
Peso total			10.4452

**ANEXO 9.** Valores recomendados para el asentamiento entre pares de superficies

FUENTE: Apuntes de clase PAULSEN K, 2012. Elementos de máquinas 1. Lima: PUCP.

Tabla 4: Valores recomendados para el asentamiento entre superficies

Altura promedio de la rugosidad $R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	Carga	Valores para el asentamiento $\delta_{as}$ Por par de superficies. ( $\mu\text{m}$ )		
		En los hilos	Cabeza o tuerca	Entre placas
$R_z < 10$	Normal	3,0	2,5	1,5
	Transversal (corte)	3,0	3,0	2,0
$10 \leq R_z < 40$	Normal	3,0	3,0	2,0
	Transversal (corte)	3,0	4,5	2,5
$40 \leq R_z < 160$	Normal	3,0	2,0	3,0
	Transversal (corte)	3,0	2,5	3,5

$R_z$ : promedio de la profundidad de la rugosidad. Promedio aritmético de cinco profundidades significativas consecutivas en la longitud de medición.



**ANEXO 10.** Presión superficial admisible del Aluminio 6061

FUENTE: WITTEL H, 2011. Roloff/Matek Maschinenele. Italy: Vieweg + Teubner

Consultado el 31 de octubre del 2015

Tabla 5: Presión superficial admisible

Werkstoffgruppe	Werkstoff der gedrückten Teile	Zugfestigkeit $R_m$ N/mm <sup>2</sup>	Grenzflächenpressung <sup>1)</sup> $p_G$ N/mm <sup>2</sup>
Unlegierte Baustähle	S235	360	490
	E295	490	710
	S355	510	760 <sup>2)</sup>
Niedriglegierte Vergütungsstähle	C45E	700	630
	34CrMo4	1000	870 <sup>2)</sup>
	34CrNiMo6	1200	1080
	16MnCr5	1000	900
Sintermetalle	SINT-D30	510	450
Nichtrostende Stähle	X5CrNi18-12	500	630
	X5CrNiMo17-12-2	520	460
	X5NiCrTi26-15	960	860
Nickel-Basis-Legierungen	NiCr20ZiAl	1000	700 <sup>2)</sup>
	MP35N	1580	1500 <sup>2)</sup>
Gusseisen	GJL-250	250	850
	GJL-260Cr	260	600
	GJS-400-15	400	600
	GJS-500-7	500	750
	GJS-600-3	600	900
Aluminium-Knetlegierungen	AlMgSi1F31 (ENAW-6082)	290	260
	AlMgSi1F28	280	230
	AlMg4,5MnF27 (ENAW-5083)	260	230
	AlZnMgCu1,5 (ENAW-7075)	540	410 <sup>2)</sup>
Aluminium-Gusslegierungen	GK-ALSi9Cu3	180	220
	GD-ALSi9Cu3	240	290
	GK-ALSi7Mg wa	250	380
Magnesiumlegierungen	AZ91	310	280 <sup>2)</sup>
	GD-AZ91 (MgAl9Zn1)	200	180
	GK-AZ91-T4	240	210
Titanlegierung	TiAl6V4	890	890

<sup>1)</sup> Beim motorischen Anziehen können die Werte der Grenzflächenpressung bis zu 25 % kleiner sein.

<sup>2)</sup> Nach VDI 2230, Ausgabe 2001.



**ANEXO 11:** Verificación de la unión multitorneillos de la base de la estructura

**1.1.1.1. Unión multitorneillos sometida a momento flector:**

La unión multitorneillos está sometida a un momento flector producto del peso del rotor del aerogenerador, este momento genera sobre los tornillos una fuerza exterior a tracción. La zona que tiende a comprimirse tiene una dimensión  $Z$ , el valor de  $Z$  es la distancia del borde inferior al centroide de las áreas de los tornillos a tracción y del área de la placa sometida a compresión. Se calcula a continuación:

$$d_s = \frac{d_2 + d_3}{2} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$d_s = \frac{5.35 + 4.773}{2} = 5.0615 \text{ mm}$$

$$A_{\text{comprimida}} \cdot \frac{Z}{2} = A_{\text{tracción}} \cdot (H - Z) \quad (\text{Ec. 2})$$

$$18 \cdot Z \cdot \frac{Z}{2} = 4 \cdot \frac{d_s^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{[(21 - Z) + (43 - Z)]}{2}$$

$$Z = 16.68 \text{ mm}$$

Para calcular las fuerzas sobre los tornillos se realiza equilibrio de momentos en el punto de aplicación de la reacción:

$$\sum n_i \cdot F_i \cdot \left( H_i - \frac{Z}{3} \right) = M \quad (\text{Ec. 3})$$

$$2F_1 \cdot \left( H_1 - \frac{Z}{3} \right) + 2F_2 \cdot \left( H_2 - \frac{Z}{3} \right) = 37 \cdot 53.71$$

Además:

$$\frac{F_1}{H_1 - Z} = \frac{F_2}{H_2 - Z} \quad (\text{Ec. 4})$$

Luego de resolver las ecuaciones (3) y (4), se obtiene que  $F_1 = 0.93 \text{ N}$  y  $F_2 = 2.53 \text{ N}$ .

### 1.1.1.2. Cálculo de la constante de rigidez del tornillo ( $C_{tor}$ )

El cálculo de basa en la norma VDI 2230, las dimensiones del tornillo se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Longitudes características del tornillo ISO 40182 M6X20

Tramo	Comentario	D1 [mm]	A1 [mm]	L [mm]
I	Cabeza	6	28.2744	3
II	Tramo sin rosca	6	28.2744	1
IV	Tramo roscado libre	5.0615	20.120992	12
V	Tramo roscado dentro de la tuerca	5.0615	20.120992	2.53
VI	Filetes en contacto	6	28.2744	2.4

La constante de rigidez se obtiene sumando la constante de cada tramo, se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{C_{tor}} = \sum_i^n \frac{1}{c_i} = \frac{1}{E} \cdot \sum_i^n \frac{L_i}{A_i} \quad (Ec. 5)$$

Donde:

$C_i$ : Constante de rigidez del tramo  $i$ -ésimo [N/mm]

El módulo de elasticidad "E" es  $2 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>, luego, reemplazando los valores de la tabla 1 en la ecuación 5, se obtiene  $C_{tor}$  igual a 273 750.79 N/mm.

### 1.1.1.3. Cálculo de la constante de rigidez de las placas ( $C_p$ )

Se conocen los siguientes datos:

Longitud entre placas:  $L_p$ : 6.763 mm

Diámetro de la cabeza del tornillo:  $d_1 = s = 10$  mm

Diámetro de la circunferencia igual al menor ancho de las placas:  $D_{ext} = 10$  mm

Para determinar el caso en el que se encuentra la configuración, se debe conocer el diámetro máximo ( $D_{max}$ ).

$$D_{max} = d_1 + L_p \cdot \tan \gamma \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde, para una unión con tornillo y tuerca se cumple:

$$\tan \gamma = 0.36 + 0.032 \cdot \ln \left( \frac{\beta_L}{2} \right) + 0.153 \cdot \ln \varepsilon \quad (\text{Ec. 7})$$

y

$$\beta_L = \frac{L_p}{d_1} = 0.6763 \quad \text{y} \quad \varepsilon = \frac{D_{ext}}{d_1} = 1$$

Reemplazando los valores de  $\beta_L$  y  $\varepsilon$  en la ecuación 79 y luego en la ecuación 6, se obtiene que el  $D_{max}$  es 12.2 mm.

Caso 3:  $D_{max} = 12.2 > D_{max} = 10$  mm por lo que el área de presión sobre las placas tiene la forma de dos troncos de cono y un cilindro.

Para un tronco de cono:

$$C_{cono} = \frac{\pi \cdot E_{cono} \cdot d_{ag} \cdot \tan \gamma}{\ln \left( \frac{(d_{max} - d_{ag}) \cdot (d_1 + d_{ag})}{(d_{max} + d_{ag}) \cdot (d_1 - d_{ag})} \right)} = 3\,087\,436.192 \text{ N/mm} \quad (\text{Ec. 8})$$

Por geometría se obtiene la  $L_{cil} = 0.003$  mm

$$C_{cil} = \frac{\pi \cdot E \cdot (D_{cil}^2 - D_{ag}^2)}{4 \cdot L_{cil}} = 280\,387\,144.3 \text{ N/mm}$$

$$\frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_{Al}} + \frac{1}{C_{Acero}}$$

$$C_p = 1\,542\,868.64 \text{ N/mm}$$

#### 1.1.1.4. Cálculo de la fuerza de asentamiento

El asentamiento se producirá en todos los pares de superficie en contacto, en esta sección se procedió a calcular la fuerza de asentamiento  $F_{as}$ . Para el cálculo se consideró una rugosidad promedio de 25  $\mu\text{m}$ ; además, se sabe que el tipo de carga es transversal y de corte.

$$\delta_{as} = \delta_{en\ los\ hilos} + \delta_{cabeza} + \delta_{entre\ placas} \quad (\text{Ec. 9})$$

Valores recomendados para el asentamiento de acuerdo al Anexo 11:

$$\delta_{as} = 3 + 4.5 + 2 \cdot 2.5 = 12.5 \mu m$$

$$F_{as} = \frac{C_{tor} \cdot C_p}{C_{tor} + C_p} \cdot \delta_{as} \tag{Ec. 10}$$

$$F_{as} = \frac{273\,750.79 \cdot 1\,542\,868.64}{273\,750.79 + 1\,542\,868.64} \cdot \frac{12.5}{1000} = 2\,906.23\, N$$

Como se vio en la sección 1.10.1.1, el tornillo se encuentra sometido a una carga transversal de  $53.71/4 = 13.43\, N$  (el peso del rotor), esto conlleva a que se debe hallar el torque de ajuste necesario al momento del montaje para asegurar que las placas no deslicen entre sí cumpliendo la siguiente ecuación:

$$\mu \cdot F_{res} > F_{transversal} \tag{Ec. 11}$$

Donde se considera que el coeficiente de fricción entre las placas es  $\mu = 0.15$  la fuerza residual debe ser mayor que  $89.52\, N$ .

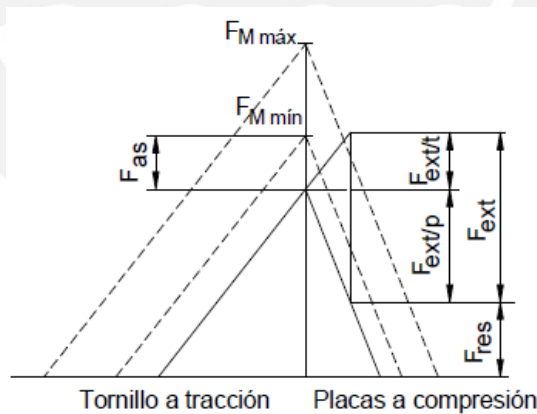


Figura 2. Diagrama de fuerza-deformación de una unión atornillada [13]

La figura 2 se puede expresar como la siguiente ecuación:

$$FM_{min} = F_{res} + F_{ext/p} + F_{as} \tag{Ec. 12}$$

$$FM_{min} = 89.52 + 2.53 \frac{C_p}{C_t + C_p} + 2236.2 = 2\,997.89\, N \cdot mm$$

$$FM_{max} = FM_{min} \cdot \alpha_A \quad (Ec. 13)$$

Para el montaje se hará uso de un torquímetro al cual le corresponde un coeficiente de ajuste ( $\alpha_A$ ) de 1.5. Resolviendo la ecuación (13) se obtuvo una fuerza de montaje máxima ( $FM_{max}$ ) igual a 4 496.85 N.

#### 1.1.1.5. Verificación de falla por fluencia

El momento torsor de ajuste  $M_{tM}$  se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$M_{tM} = FM_{max} \cdot \tan(\rho + \varphi) \cdot \frac{d_2}{2} \quad (Ec. 14)$$

Donde:

$$\tan \varphi = \frac{P}{\pi \cdot d_2} = \frac{1}{\pi \cdot 5.35} \quad ; \quad \varphi = 1.285^\circ$$

$$\tan \rho = \frac{\mu}{\cos 30^\circ} = \frac{0.15}{\cos 30^\circ} \quad ; \quad \rho = 9.826^\circ$$

Luego de reemplazar los valores en la ecuación (14), se obtuvo un momento torsor de ajuste igual a 2 827.15 N.mm

Se sabe que el diámetro  $d_3 = 4.019$  mm; entonces,  $d_0 = \frac{d_2 + d_3}{2} = \frac{5.35 + 4.773}{2} = 5.062$  mm

La carga exterior produce esfuerzos en el tornillo durante el trabajo

$$\sigma_M = \frac{4 \cdot FM_{max}}{\pi \cdot d_0^2} \quad (Ec. 15)$$

$$\tau_{tM} = \frac{16 \cdot M_{tM}}{\pi \cdot d_0^3} \quad (Ec. 16)$$

Se obtuvo como resultado que  $\sigma_M = 223.5$  N/mm<sup>2</sup> y  $\tau_{tM} = 111.04$  N/mm<sup>2</sup>.

De acuerdo con Von Mises el esfuerzo equivalente es:

$$\sigma_{eqM} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3 \cdot \tau_{tM}^2} \quad (Ec. 17)$$



Los valores de las ecuaciones (15) y 16) se reemplazaron en la ecuación (17) y se obtuvo que el esfuerzo equivalente es 294.85 N/mm<sup>2</sup>.

El esfuerzo de fluencia ( $\sigma_F$ ) para un tornillo de grado 5.8 es 500 N/mm<sup>2</sup>. Para que el tornillo no falle por fluencia se debe cumplir lo siguiente:

$$\begin{aligned}\sigma_{eqM} &\leq 0.9 \cdot \sigma_F & (Ec. 18) \\ 294.85 &\leq 450\end{aligned}$$

Se cumple la relación (18) por lo que el tornillo allen ISO 4762 M6x20 de grado 5.8 no fallará.

#### 1.1.1.6. Verificación del esfuerzo de aplastamiento en las superficies de contacto

El área en contacto se calcula según la geometría del caso:

$$\begin{aligned}A_c &= \frac{\pi \cdot (d_1^2 - d_{ag}^2)}{4} & (Ec. 19) \\ A_c &= 40.06 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

La presión en los filetes se halla con la ecuación (3.62):

$$P_{tor} = \frac{FM_{max}}{A_c} \quad (Ec. 20)$$

$$P_{tor} = 112.26 \text{ N/mm}^2$$

Se debe cumplir:

$$P_{tor} \leq P_{Adm} \quad (Ec. 21)$$

La presión admisible superficial para el acero es 260 N/mm. Por lo tanto, se cumple la relación (21).

#### 1.1.1.7. Momento de ajuste durante el montaje $M_{ajuste}$

La fricción entre la placa y la cabeza del tornillo se debe vencer durante el montaje para lo cual se aplica el momento  $M_p$ .

$$M_p = \mu \cdot FM_{max} \cdot \frac{d_1 + d_{ag}}{4} \quad (\text{Ec. 22})$$
$$M_p = 4\,777.9 \text{ mm}$$

El momento de ajuste se calcula según la ecuación (23):

$$M_{ajuste} = M_{tM} + M_p \quad (\text{Ec. 23})$$
$$M_{ajuste} = 7\,605 \text{ N.mm}$$



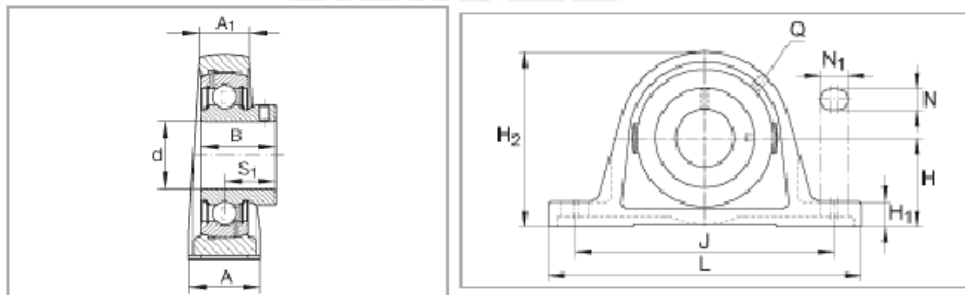
**ANEXO 12.** Rodamiento autoalineable PASEY15

FUENTE: Hoja de datos

Consultado 30 de setiembre del 2015

< [http://medias.schaeffler.de/medias/es!hp.ec.br.pr/PASEY\\*PASEY15](http://medias.schaeffler.de/medias/es!hp.ec.br.pr/PASEY*PASEY15)>

d	15 mm
L	125 mm
H <sub>2</sub>	57 mm
A	30 mm
A <sub>1</sub>	18 mm
B	22 mm
H	30,2 mm
H <sub>1</sub>	10 mm
J	95 mm
N	11 mm
N <sub>1</sub>	19 mm
Q	M6
S <sub>1</sub>	16 mm
m	0,43 kg Peso
C <sub>r</sub>	10100 N Capacidad de carga dinámica, radial
C <sub>0r</sub>	4750 N Capacidad de carga estática, radial
GG.ASE03	Denominación del soporte
GAY15-NPP-B	Denominación del rodamiento



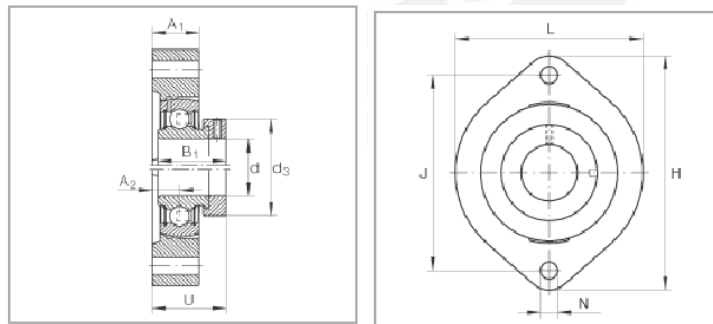
### ANEXO 13. Rodamiento soporte-brida

FUENTE: Hoja de datos

Consultado 30 de setiembre del 2015

<[http://medias.schaeffler.de/medias/es!hp.ec.br.pr/FLCTEY\\*FLCTEY12](http://medias.schaeffler.de/medias/es!hp.ec.br.pr/FLCTEY*FLCTEY12)>

d	12 mm
H	81 mm
U	30,5 mm
A <sub>1</sub>	15 mm
A <sub>2</sub>	8,4 mm
B <sub>1</sub>	28,6 mm
d <sub>3</sub>	28 mm
max	
J	63,5 mm
L	58,7 mm
N	6,6 mm
m	0,3 kg Peso
Cr	10100 N Capacidad de carga dinámica, radial
Cor	4750 N Capacidad de carga estática, radial
	GG.LCTE03 Denominación del soporte
	RAE12-NPP-B Denominación del rodamiento



### ANEXO 14. Hoja técnica del transductor de torque

FUENTE: Especificaciones y guía de instalación

Laboratorio de Energía

M425 shaft stiffness and load parameters

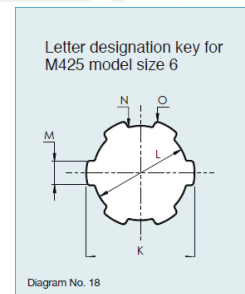
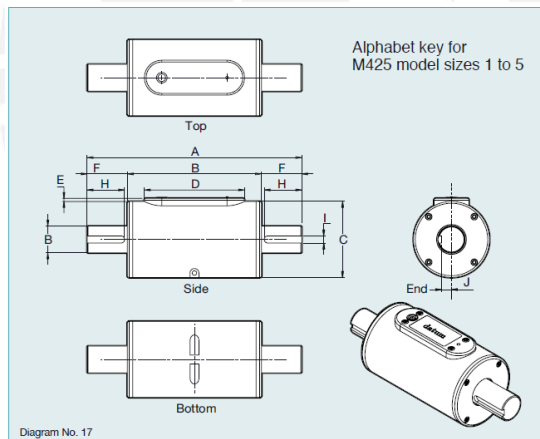
Table No. 8

M425 model size	Rated load (Nm)	Rated load (Lbft)	Standard max RPM	Overall length (mm)	Moment length	Bending loads at the moment length (N)	Shaft proof load (Nm)	Shaft ultimate (breaking) load (Nm)	Axial loads (N)	Total stiffness (Rad/Nm)	Total stiffness (Nm/Rad)
Size 1 - A	10	7.4	0-10000	184	154	8	18	32	442	2.06E-03	485
Size 1 - B	20	14.8	0-10000	184	154	14	31	55	636	1.12E-03	891
Size 1 - C	50	36.9	0-10000	184	154	33	74	131	1131	5.25E-04	1904
Size 1 - D	100	73.8	0-10000	184	154	65	144	257	1767	3.62E-04	2761

M425 mass and dimensions (mm)

Table No. 9

M425 model size	Total mass Kgs	Rotor mass Kgs	Overall length	Body length	Body dia.	Output module length	Output module height	Exposed shaft length	Shaft dia. G6 fit	Keyway length	Keyway width	Keyway depth off centre
Size 1 - A	0.83	0.246	184	130	66	112	3.5	27	15	22.5	5	4.3
Size 1 - B	0.83	0.253	184	130	66	112	3.5	27	15	22.5	5	4.3
Size 1 - C	0.83	0.269	184	130	66	112	3.5	27	15	22.5	5	4.3
Size 1 - D	0.83	0.291	184	130	66	112	3.5	27	15	22.5	5	4.3



3D models and STEP files are available from Datum Electronics to assist project planning. Please contact Datum Electronics for more information.

### ANEXO 15. Especificaciones del acoplamiento

FUENTE: Catálogo de acoplamientos de mordaza

Consultado el 8 de octubre del 2015

< [http://catalog.lovejoy-inc.com/item/standard-jaw-couplings-l-type/l-type-coupling-hubs-w-keyway-metric/68514441451?>](http://catalog.lovejoy-inc.com/item/standard-jaw-couplings-l-type/l-type-coupling-hubs-w-keyway-metric/68514441451?)



where the world turns for  
**Lovejoy**  
Coupling Solutions

Table of Contents

**Jaw**  
L Type Metric Bore / Keyway  
Item Selection

The L Type coupling consists of two standard L Type hubs and one spider. Refer to pages JW-10, JW-12, and JW-10.



L Type Hub - Metric Bore and Keyway UPC Number Selection Table

Bore	Keyway	L035	L050	L070	L075	L090	L095	L099	L100	L110	L150	L190	L225	L276
4	No Keyway	41850	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	No Keyway	47419	46214	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	No Keyway	45872	50351	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	No Keyway	60679	10215	58803	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	No Keyway	55169	41460	46151	—	60945	—	—	—	—	—	—	—	—
9	3 x 1.4	—	41313	56177	44298	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	No Keyway	—	10216	41452	41456	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	3 x 1.4	—	41450	49870	41457	52828	—	—	—	—	—	—	—	—
11	4 x 1.8	—	41314	41453	50811	—	49424	—	—	—	—	—	—	—
12	No Keyway	—	48510	51562	—	48276	—	—	—	—	—	—	—	—
12	4 x 1.8	—	41315	41454	44153	44329	44832	—	55195	—	—	—	—	—
14	No Keyway	—	58036	47505	—	41461	41465	—	—	—	—	—	—	—
14	5 x 2.3	—	41316	41317	41321	51231	41466	60094	45101	—	—	—	—	—
15	No Keyway	—	60708	—	10693	—	48561	52697	41469	—	—	—	—	—
15	5 x 2.3	—	41451	41455	41454	52096	45778	46972	47123	—	—	—	—	—
16	5 x 2.3	—	56176	41318	41322	49198	41325	52098	55534	52092	52471	—	—	—

**Specifications**

Description	L050 HUB 15MM 5X2.3MM KW
Hub Style	1
Coupling Type	Jaw
Material	Sintered Iron
Color	Metallic
# of Jaws	2
Elastomeric Member	SOX (NBR) Rubber
Weight	0.10 lb
Weight (Complete Coupling w/ Min. Bores)	0.20 lb
Weight (Complete Coupling w/ Max. Bores)	0.30 lb

## ANEXO 15. Especificaciones del acoplamiento

FUENTE: Propia

Cotización perfiles en L Recibidos x

---

**Leslie Rocío Hernández Bravo** <leslie.hernandez@pucp.pe> 26 nov. ☆  
para eflores ▾

Estimado Sr. Flores:

Como se conversó hace un rato, le envío un correo para que me pueda indicar los precios de los siguientes perfiles en L:

2"x2"x3/16"  
2.5"x2.5"x3/26"

Gracias por su atención.

Saludos,  
...

---

**Enrique Flores** 26 nov. ☆  
para mí ▾

2"x2"x3/16" .....US\$12.09 + IGV (INGRESO FINES DE DICIEMBRE)  
2.5"x2.5"x3/16" .....US\$15.31 + IGV (INGRESO 10 DE DICIEMBRE)

---

**De:** Leslie Rocío Hernández Bravo [mailto:[leslie.hernandez@pucp.pe](mailto:leslie.hernandez@pucp.pe)]  
**Enviado el:** jueves, 26 de noviembre de 2015 11:59 a.m.  
**Para:** [eflores@aasa.com.pe](mailto:eflores@aasa.com.pe)  
**Asunto:** Cotización perfiles en L

---


**Leslie Rocío Hernández Bravo** <leslie.hernandez@pucp.pe> 12 nov. ☆  
para JULIOR.CHIRINOS ▾

Buenas tardes,

Como conversamos ayer, te envío el dibujo del álabes en formato STL para que puedas realizar la cotización.

Gracias de antemano.

Saludos,  
Leslie Hernández



Álabes STL.stl

---

**Julio Ricardo Chirinos Bustillos** 12 nov. ☆  
Estimada Leslie, te adjunto las fichas técnicas de los materiales

---

**Julio Ricardo Chirinos Bustillos** 18 nov. ☆  
para Dci, mí ▾

Estimada Leslie, los 3 alabes tiene tiene 2 costos de fabricación y dependerá de la orientación, y también dará origen a la rugosidad generada por el mismo proceso de impresión 3D, el costo de imprimir horizontalmente es de S/. 546 y verticalmente es de S/. 646.