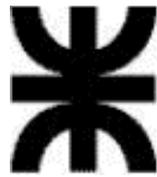


Mario Alberto Ros



Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Reconquista

Seguidor Solar Fotovoltaico a dos ejes con  
una fuerza motriz

Proyecto Final presentado en cumplimiento de las  
exigencias de la carrera Ingeniería Electromecánica de la  
Facultad Regional Reconquista.

Asesor: Prof. Ing. Alejandro Gregoret

Reconquista – Santa Fe  
República Argentina  
Año: 2019



## Índice

<b>Contenido</b>	<b>Página</b>
<b>Fundamentación</b>	
1. Objetivos	
1.1 Objetivo general	
1.2 Objetivos específicos	6
2. Planteamiento del problema	
2.1 Planteamiento del problema general	7
2.2 Planteamiento del problema específico	9
2.2.1 Estudio del movimiento del Sol	10
2.2.2 Tipo de instalaciones fotovoltaicas	12
3. La energía solar como fuente de energía	
3.1 Que es la energía solar	13
3.2 Radiación solar extraterrestre, constante solar	
3.3 Radiación solar terrestre	14
3.4 Aprovechamiento de la energía solar	
3.5 Niveles de radiación en la República Argentina	16
3.6 Niveles de radiación en la Provincia de Santa Fe	17
3.7 Niveles de radiación para la ciudad de Reconquista	19
3.8 Temperatura ambiente para la ciudad de Reconquista	
3.9 Dirección y velocidad del viento para la ciudad de Reconquista	21
<b>Parte I; Eléctrica</b>	
4. Energía fotovoltaica	
4.1 Efecto fotovoltaico	
4.2 Célula fotoeléctrica	24
4.3 Módulo fotovoltaico	25
4.4 Instalaciones fotovoltaicas	27
4.5 Arquitectura de una instalación fotovoltaica aislada	28
4.5.1 Parámetro de una instalación fotovoltaica aislada	31



4.6 Dimensionamiento de la instalación fotovoltaica	
4.6.1 Cálculo de la energía generada	34
4.6.2 Cálculo de la capacidad de la batería o banco de baterías	41
4.6.3 Cálculo del regulador de la instalación	43
4.6.4 Selección del inversor o convertidor DC/AC	46
4.6.5 Cálculo de cableado de la instalación	49
4.6.6 Cálculo de las protecciones	54
5. Estimación de energía eléctrica que se podría generar para el sistema de paneles fijo a 29° hacia el Norte en la ciudad de Reconquista	56
5.1 Energía consumida por el motor	62
6. Porcentaje de captación de radiación solar	
6.1 Geometría Solar	63
6.2 Cálculo de incidencia de radiación solar sobre una superficie	66
6.3 Estudio de rend. de captación entre los tres tipos de instalaciones	71
6.4 Conclusiones	74
7. Circuito Electrónico de Seguimiento solar	
7.1 Diagrama del circuito electrónico	75
7.2 Componentes electrónicos utilizados	
7.3 Funcionamiento del circuito	76
7.4 Cálculo del voltaje en las bases de los transistores Q5 y Q6	83
7.5 Conclusiones	86
8. Huella de carbono	87

## **Parte II; Mecánica**

9. Seguidores solares	
9.1 Tipos de seguidores solares de 1 (un) eje	
9.1.1 Seguidor solar de eje polar	90
9.1.2 Seguidor solar de eje vertical o acimutal	
9.1.3 Seguidor solar de eje horizontal	91
9.2 Seguidor solar de 2 ejes	92



10. Cálculo de la fuerza del viento de diseño sobre la estructura	93
11. Cálculo de resistencia de los componentes de la estructura	
11.1 Representación y designación de los componentes de la estructura	94
11.2 Cálculo de resistencia de las vigas tubulares	95
11.3 Cálculo de Resistencia de los apoyos en los extremos del cabezal	
11.4 Cálculo de Resistencia del cabezal	100
11.5 Cálculo de Resistencia del apoyo reticulado	105
11.6 Cálculo de Resistencia de la columna móvil	
11.6.1 Cálculo al corte y a flexión	110
11.6.2 Cálculo al pandeo, Tramo: Cabezal y vínculo B	115
11.6.3 Cálculo al pandeo, Tramo: Cabezal y vínculo B con carga excéntrica	119
11.6.4 Cálculo al pandeo, Tramo: vínculo B al vínculo A	120
11.7 Cálculo de resistencia de la columna fija	124
11.8 Cálculo de Resistencia de la soldadura de la columna fija	125
11.9 Cálculo de Resistencia de las soldaduras de las cartelas de la columna inferior.	
11.9.1 Cordones de la base o cateto menor (paralelo a la placa)	128
11.9.2 Cálculo de resistencia de soldadura de los cordones del lado mayor, paralelos al eje longitudinal de la columna, de las cartelas	133
11.10 Cálculo de Resistencia del acero del anclaje en tracción – Reglamento CIRSOC 201	136
11.11 Cálculo de la fuerza actuante y verificación con respecto a la Resistencia nominal	138
11.12 Distancias a los bordes, separaciones y espesores requeridos para impedir la falla por hendimiento	140
11.13 Determinación de la longitud de empotramiento (hef) requerida en base al desprendimiento del hormigón del anclaje	141



12. Diseño y cálculo de resistencia del par de engranaje.	
12.1 Geometría del engranaje mayor o conducido	144
12.2 Geometría del engranaje menor o conductor	150
12.3 Tornillo Sin-Fin y su Rueda	152
12.4 Verificación de la Resistencia de los dientes de engrane.	
12.4.1 Resistencia a flexión	156
12.4.2 Par de arranque	164
12.5 Resistencia a fatiga del diente	165
12.6 Resistencia por desgaste superficial (pitting)	173
13. Cálculo de resistencia del árbol motriz	183
14. Rodamientos seleccionados	
14.1 Rodamiento cónico, base de giro	186
14.2 Rodamiento rígido de bolas de una hilera, apoyo de columna vertical móvil	187
14.3 Rodamiento rígido de una hilera, apoyos del cabezal móvil	188
14.4 Rodamiento rígido una hilera, engranaje pivote	189
<b>Costos</b>	
15. Estudio de Costos	
15.1 Electrónica de seguimiento solar	
15.2 Presupuesto de estructura y mecanismo para un eje móvil vertical	192
15.3 Presupuesto para segundo eje adicional	193
15.4 Elementos eléctricos	
15.5 Presupuesto del Proyecto/Prototipo	194
16. Bibliografía	195
17. Referencia a páginas web	
18. Catálogos Técnicos	196
19. Lista de planos	197
Anexo Cálculo de la presión del viento	199
Anexo Cálculo del par de arranque del rodamiento cónico	204
Anexo Planos	
Anexo Catálogos	



## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

El objetivo general de este proyecto es el diseño y construcción de una estructura para paneles fotovoltaicos con movimientos en dos ejes, que permita tener un seguimiento de la superficie de los paneles lo más perpendicularmente posible a los rayos solares, para obtener así un mayor rendimiento de la instalación en lo que respecta a generación de energía eléctrica.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Lograr los dos movimientos de giro de la estructura que describen cada uno los ángulos; acimutal y altura solar, mediante un solo motor por medio de la implementación de un mecanismo de engranajes y pivote.
- Reducir el consumo de energía eléctrica necesaria para mover la estructura, la cual proviene de la misma instalación fotovoltaica como sistema autónomo.

## 2. Planteamiento del Problema

### 2.1 Planteamiento del problema general

La urgencia del cambio climático exige nada menos que una *revolución energética*.

Lo que necesitamos es una transformación total de la forma en que producimos, consumimos y distribuimos la energía sin afectar el desarrollo económico. La generación actual de electricidad se basa principalmente en la quema de combustibles fósiles, con las consiguientes emisiones de gas de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>) asociadas, en centrales eléctricas de gran tamaño que despilfarran la mayor parte de su energía primaria de origen. Se pierde aún más energía al tener que transportar la electricidad por la red eléctrica y convertirla de alta tensión a un suministro adecuado para su uso doméstico e industrial. La clave de la revolución energética es la necesidad de cambiar la forma de producir y distribuir la energía.

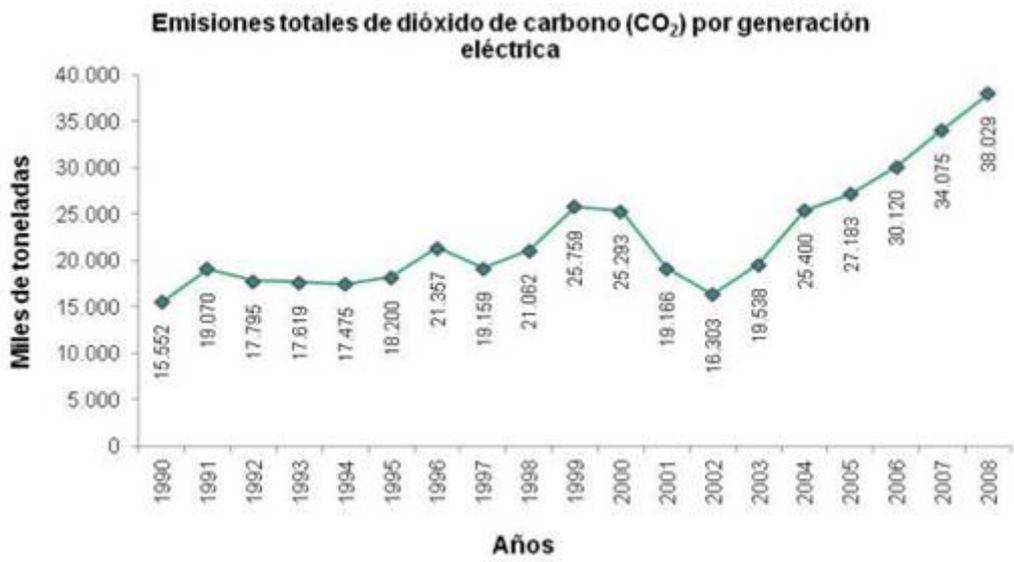


Gráfico 1, Emisiones de gas de efecto invernadero (GEI) por generación eléctrica.  
Fuente: Dirección Nacional de Prospectiva. Secretaria de Energía. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios.

La matriz energética argentina posee una altísima dependencia de los combustibles fósiles, situación que se ha ido intensificando en las últimas dos décadas. Un 90% de la energía primaria que se consume proviene básicamente del petróleo y del gas natural.

Debido a esta alta dependencia de los combustibles fósiles la situación energética argentina es muy frágil, ya que los recursos se están agotando aceleradamente. Más allá de los esfuerzos exploratorios de gas, petróleo y carbón que se hagan, existe un consenso generalizado en el sector acerca de que es muy improbable la aparición de nuevos yacimientos importantes.



Gráfico 2, Oferta interna de energía primaria de la Argentina en el 2009.  
Fuente: Secretaría de Energía de la Nación.

En la figura anterior se observa el gran porcentaje de combustibles fósiles como energía primaria en la matriz energética argentina, 35 % de petróleo y 51,6% de gas natural.

Una de las claves para mitigar lo antes dicho es poner en práctica soluciones limpias y renovables y descentralizar los sistemas energéticos; las energías renovables presentan la posibilidad de sistemas energéticos sustentables y descentralizados, los cuales producen menos emisiones de carbono, son más baratos e implican menos dependencia de importaciones de combustibles. También crean más puestos de trabajo y otorgan más autonomía a las comunidades locales, los sistemas descentralizados son más seguros y más eficientes. Esto es lo que se busca alcanzar con la *revolución energética*.

## 2.2 Planteamiento del problema específico

El funcionamiento de un módulo solar presenta un desempeño variado a lo largo del día, afectado principalmente por los ángulos de posicionamiento que presenta con respecto al Sol, causados por el movimiento de rotación y traslación de la Tierra respecto del sol.

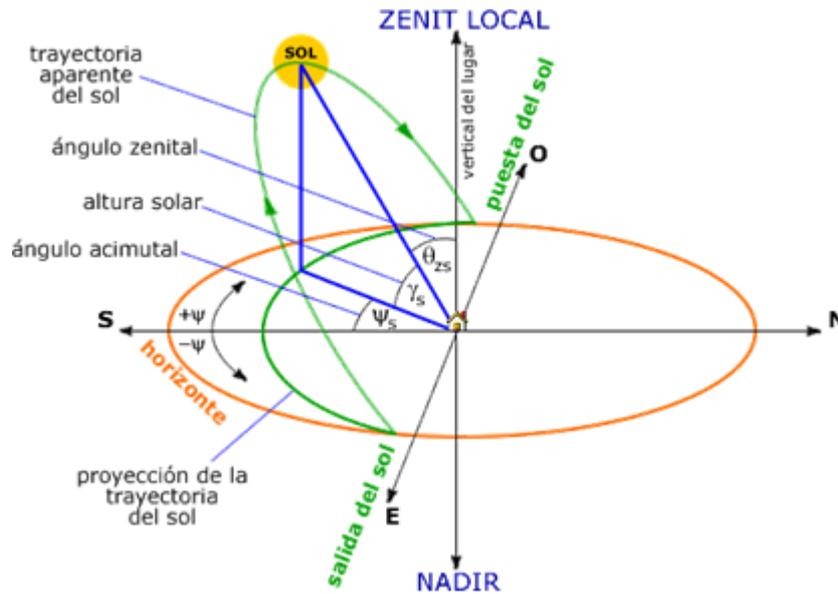


Figura 1, Ubicación de la posición del sol en base a tres ángulos; acimutal, altura solar y cenital para el hemisferio norte.

<http://repositorio.una.edu.ni/3256/1/NP06B272.pdf>

Por lo que si se quiere mejorar el rendimiento de una instalación fotovoltaica se debe controlar el valor de estos ángulos, es decir, lograr que la superficie del panel solar este el mayor tiempo posible perpendicular a los rayos solares.

### 2.2.1 Estudio del movimiento del Sol

Para poder explicar cómo se mejora el rendimiento (energía producida) de una instalación fotovoltaica se debe hacer el siguiente análisis.

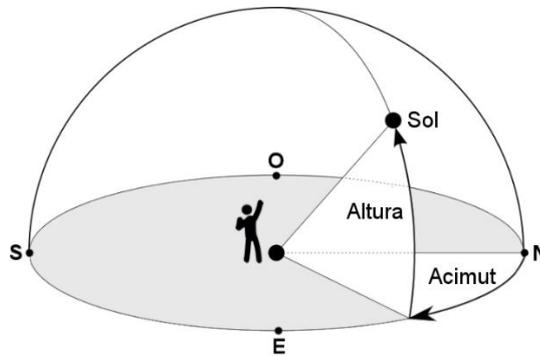


Figura 2, Ángulos principales de estudio en un seguimiento solar.

<https://www.tutiempo.net/eclipses-solares>

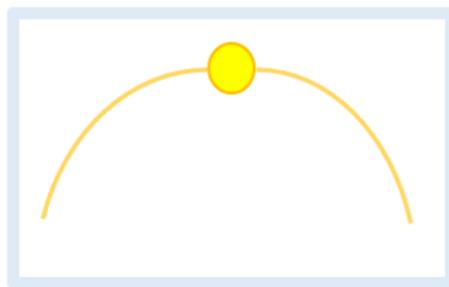


Figura 3, Movimiento del Sol (mov. relativo respecto a la tierra) en un plano para el observador fijo.

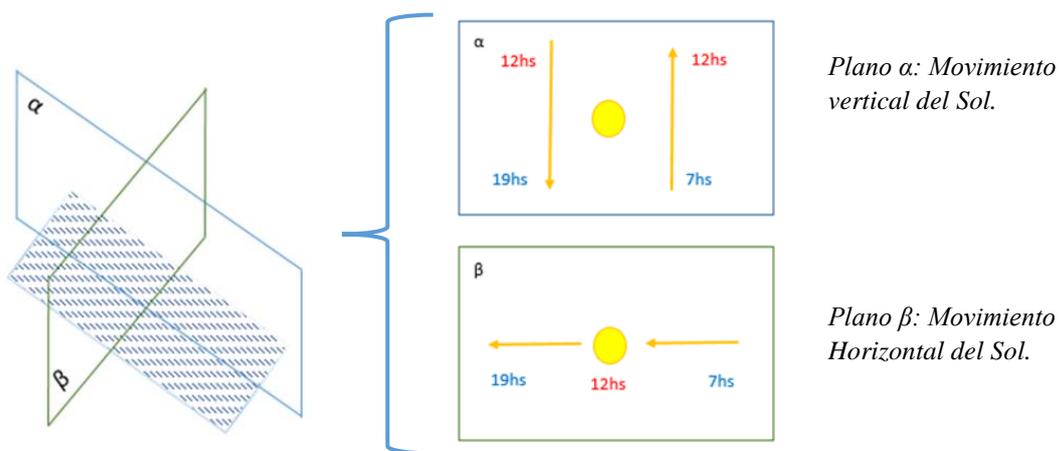


Figura 4, Descomposición del movimiento de la trayectoria del Sol en dos planos.

En base al estudio anterior (descomposición del movimiento del sol) se puede realizar un análisis de incidencia solar en un panel fijo, en base a los dos movimientos hipotéticos del sol.

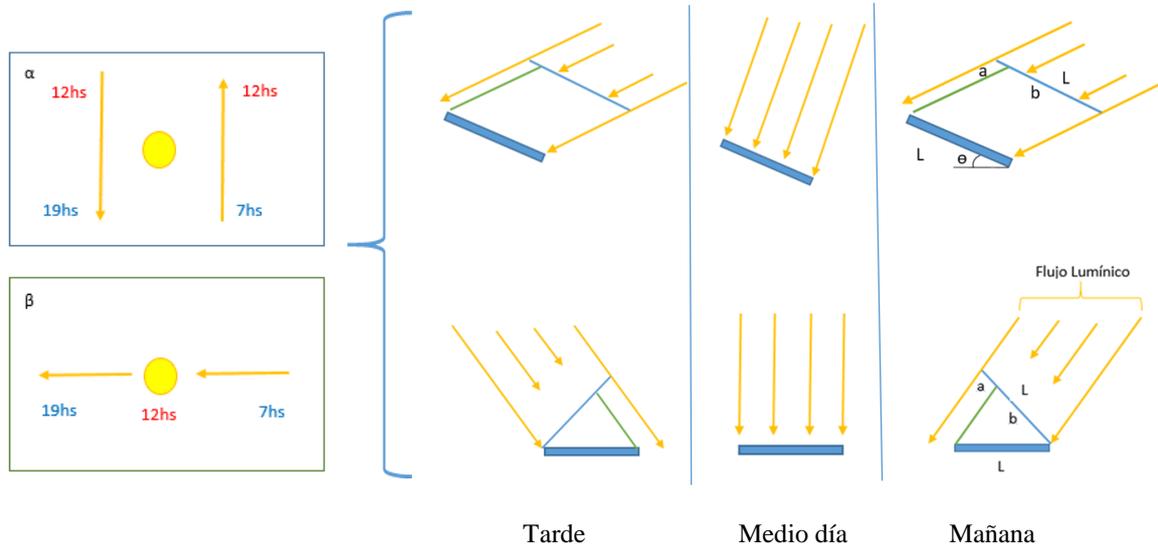


Figura 5, Análisis de incidencia solar de la trayectoria del Sol en dos planos.

## 2.2.2 Tipos de instalaciones fotovoltaicas

Se tiene hoy en día los siguientes tipos de instalaciones:

### a) Instalación Fija



<http://etersol.com.ar/paneles-solares/>

### b) Instalación a un eje horizontal y a un eje vertical (respectivamente)



*Seguidor Solar de 1 eje Horizontal DEGERtracker S60H-PF, <https://degeriberica.com/articulo-tecnico-viabilidad-de-la-instalacion-de-seguidores>*



<http://www.sumiseran.es/contents/es/d18.html>

### c) Instalación a dos ejes



### 3. La energía solar como fuente de energía

#### 3.1 Que es la energía solar

Es la energía radiante producida en el Sol, como resultado de reacciones nucleares de fusión que llegan a la Tierra a la velocidad de la luz a través del espacio en paquetes de energía llamados fotones (luz), que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre. El espectro de dicha radiación electromagnética se puede descomponer en tres bandas de longitud de ondas;

- Ultravioleta UV: < 350 nm
- Visible: 350- 750 nm
- Infrarrojo: >750 nm

Estas bandas componen el espectro solar.

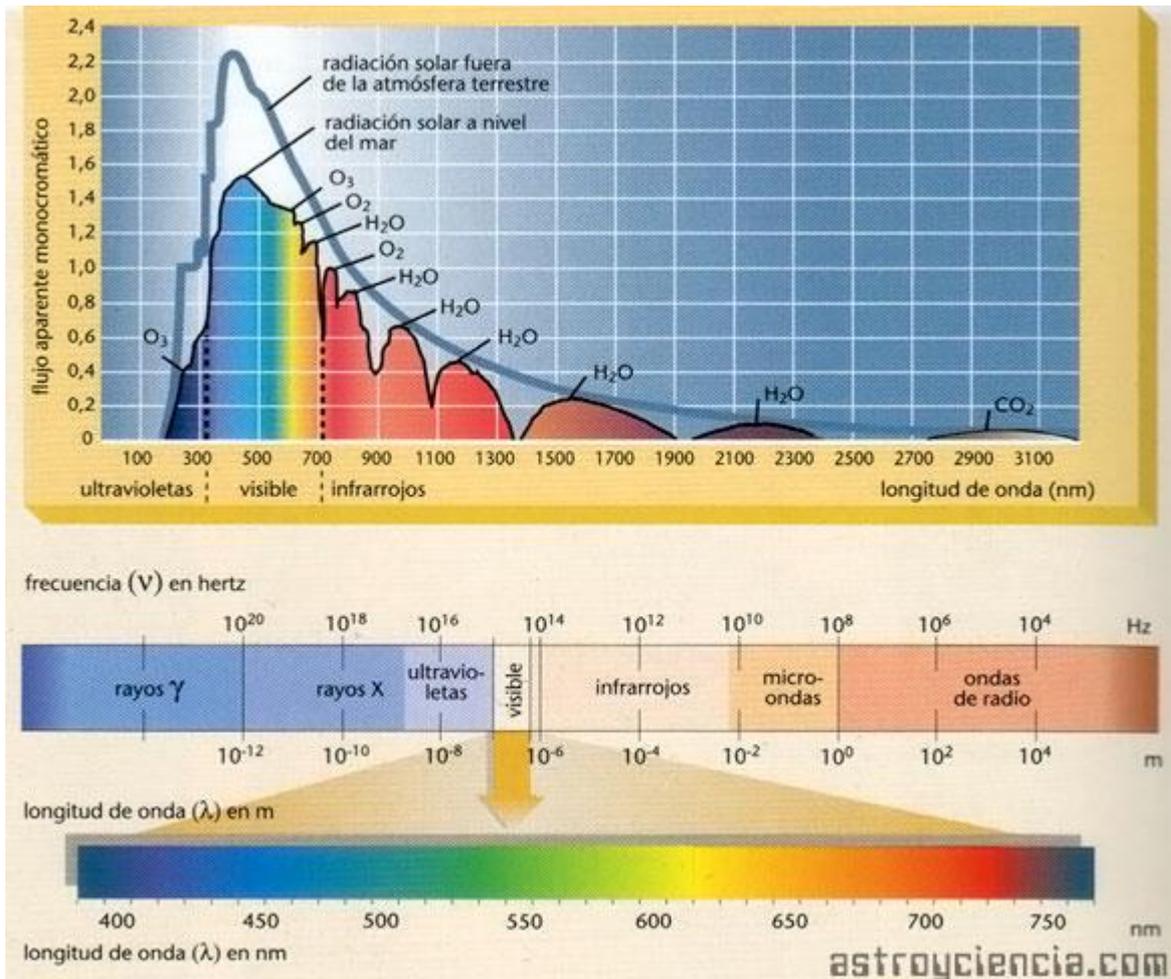


Figura 6, Espectro de la radiación solar.

<http://tuloveciita.blogspot.com/2012/12/radiacion-solar.html>

### 3.2 Radiación solar extraterrestre, constante solar

La constante solar es la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie, medida en la parte externa de la atmósfera terrestre en un plano perpendicular a los rayos solares. Los resultados de su medición por satélites arrojan un valor promedio de  $1366 \text{ W/m}^2$ .

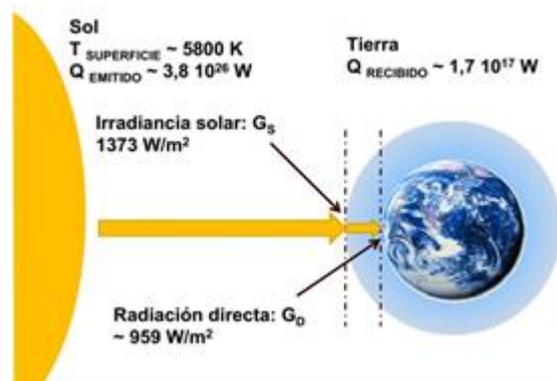


Figura 7, Constante solar.

<http://www.divulgameteo.es/ampliab/4/1533/Clima-y-constante-solar-variable.html>

### 3.3 Radiación solar terrestre

Es la radiación solar que llega a la superficie terrestre, la cual lo hace en una magnitud de alrededor de 51%, ya que el resto es atenuada por fenómenos atmosféricos como ser las moléculas gaseosas y las partículas de polvo que reflejan los rayos dispersándolos en distintas direcciones, así como también el vapor de agua, el anhídrido carbónico y el ozono ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_3$ ) que absorben los rayos de algunas longitudes de onda.

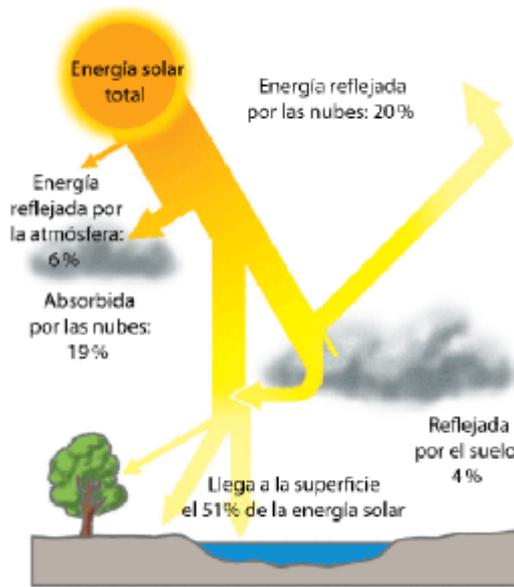


Figura 8, Radiación solar terrestre.

<https://energeticafutura.com/blog/cuanta-energia-se-puede-extraer-de-la-radiacion-solar/>

A la radiación solar terrestre se la puede dividir en cuatro tipos de radiación;

- Directa
- Difusa (dispersión)
- Reflejada (Albedo)
- Global (Dir.+ Dif.+ Ref.)

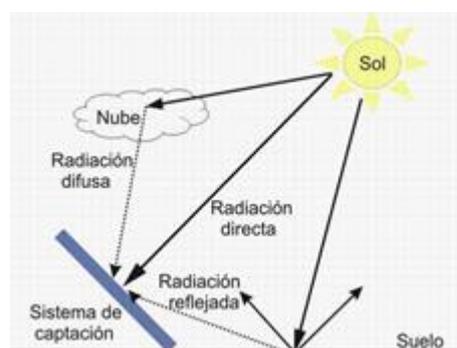


Figura 9, Tipos de radiación solar terrestre.

<http://repositorio.unan.edu.ni/5525/1/17846.pdf>

### 3.4 Aprovechamiento de la energía solar

Las características de la energía solar hacen que su aprovechamiento sea distinto al de las energías convencionales, esto se debe a dos motivos;

- **Dispersión:** su densidad en las condiciones más favorables es baja ( $1\text{kw}/\text{m}^2$ ). Para obtener densidades de energías elevadas se necesitan grandes superficies o sistemas de concentración.
- **Intermitencia:** la no disponibilidad de un nivel de energía constante durante el día así como durante el año, hacen necesario de equipos de almacenamiento de la misma.

### 3.5 Niveles de radiación en la República Argentina.

La radiación que llega a la Tierra depende de diversos factores como el día del año, el momento del día, la latitud o las condiciones atmosféricas. Por ejemplo la radiación solar en el mes de Diciembre y en el mes de Julio en la República Argentina es;

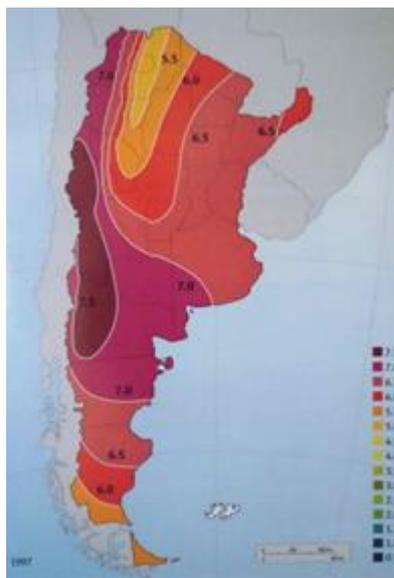


Gráfico 3, Red solarimétrica en el mes de Diciembre del Servicio Meteorológico Nacional, año 1997.



Gráfico 4, Red solarimétrica en el mes de Junio del Servicio Meteorológico Nacional, año 1997.

### 3.6 Niveles de radiación en la Provincia de Santa Fe.

Mapas de insolación de la provincia de Santa Fe, datos provistos por la NASA, dados en intervalos de 1 grado de latitud y longitud.

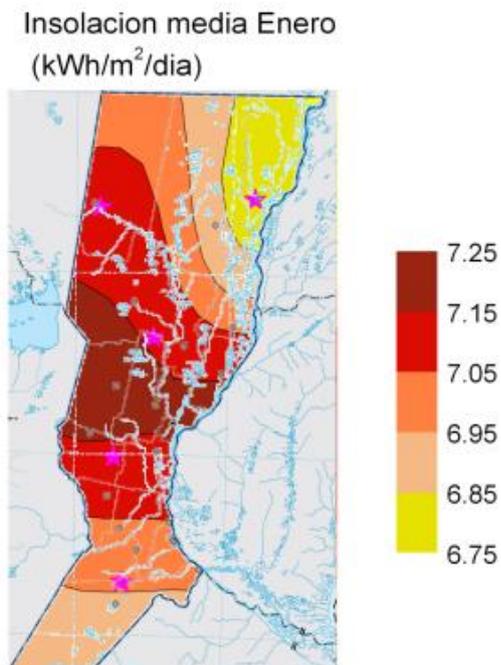
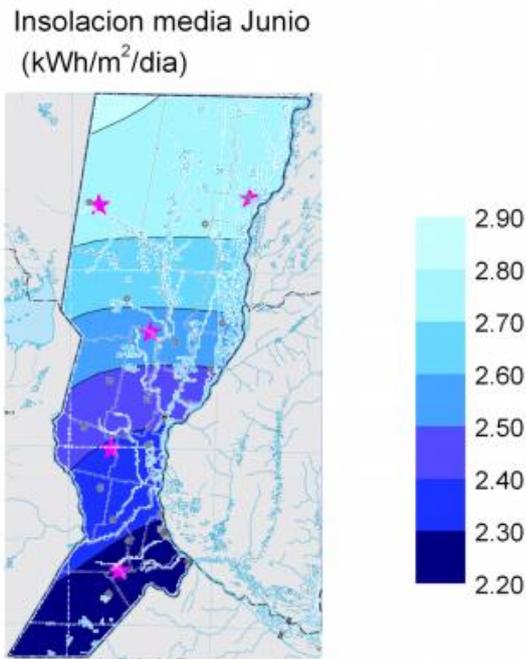


Gráfico 5, Insolación media diaria (kWh/m<sup>2</sup>/día) en el mes de Enero, datos de la NASA año 2018.  
Extraído del Informe de Radiación Solar en la provincia de Santa Fe, Programa de Generación de Energías Renovables de la Provincia de Santa Fe, año 2018.



*Gráfico 6, Insolación media diaria (kWh/m<sup>2</sup>/día) en el mes de Junio, datos de la NASA año 2018.  
Extraído del Informe de Radiación Solar en la provincia de Santa Fe, Programa de Generación de Energías  
Renovables de la Provincia de Santa Fe, año 2018.*

Finalmente, en el gráfico 7 se observa el mapa de la insolación media anual en la Provincia, que es el dato necesario para calcular la energía que puede aportar una central fotovoltaica.

Aquí se observa un máximo en la zona noroeste, que abarca a las localidades de Tostado y Elisa, con valores de entre 4,75 y 4.85 kWh/m<sup>2</sup>/día. Parte del centro y del noreste de la Provincia, incluyendo la localidad de Reconquista, se encuentran en una zona de insolación media anual entre 4,65 y 4.75 kWh/m<sup>2</sup> /día. La zona centro-sur, incluyendo la localidad de Cañada Rosquín, está en una zona con valores entre 4,55 y 4.65 kWh/m<sup>2</sup>/día. Finalmente, el sur de la Provincia, incluyendo la localidad de Firmat, tiene valores entre 4,45 y 4.55 kWh/m<sup>2</sup>/día.

De todas formas, la distribución es relativamente uniforme, con una variación entre los extremos menores al 10 %.

Insolacion media anual  
(kWh/m<sup>2</sup>/dia)

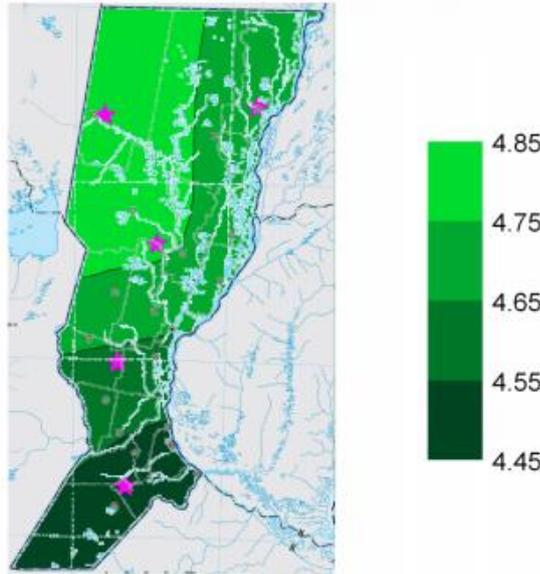


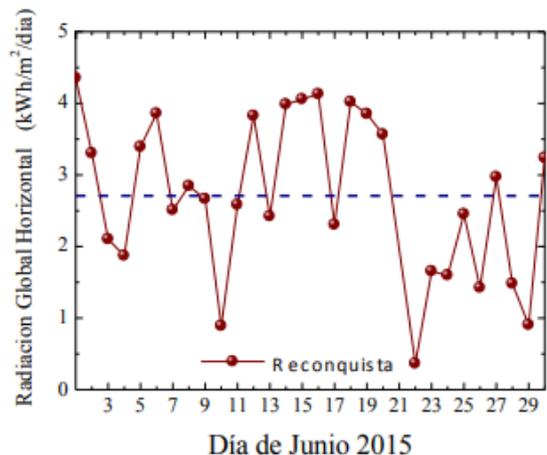
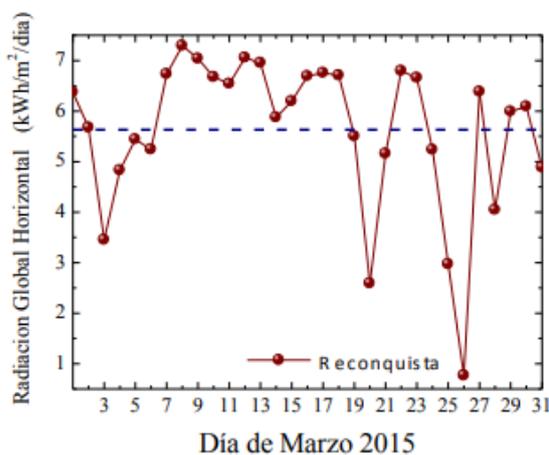
Gráfico 7, Insolación media diaria (kWh/m<sup>2</sup>/día) anual, datos de la NASA año 2018.

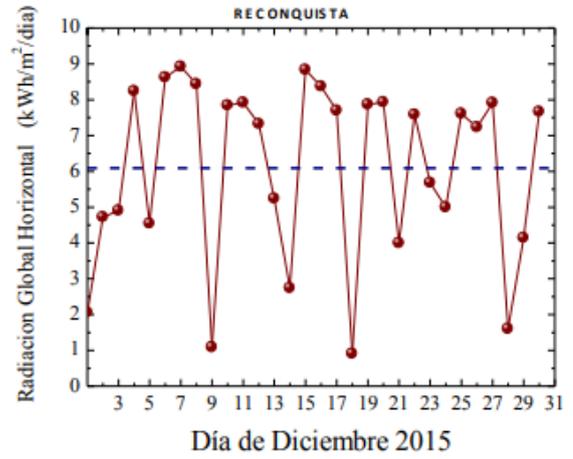
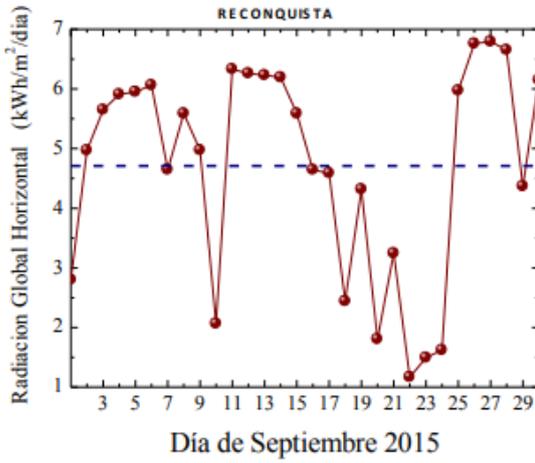
Extraído del Informe de Radiación Solar en la provincia de Santa Fe, Programa de Generación de Energías Renovables de la Provincia de Santa Fe, año 2018.

### 3.7 Niveles de radiación para la ciudad de Reconquista.

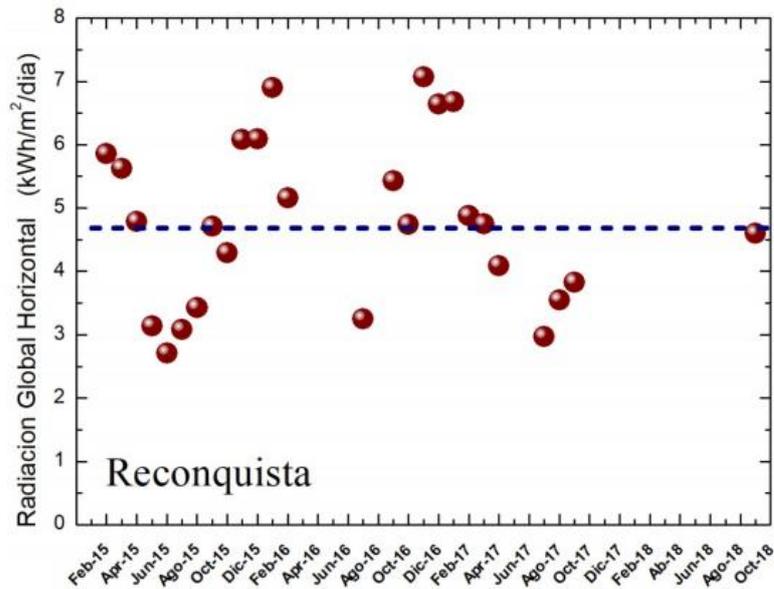
Los datos fueron extraídos de un informe de Radiación Solar realizados por el Programa de Energías Renovables de la Provincia de Santa Fe en el año 2015 y publicado en el año 2018.

A continuación se presentarán la radiación solar global diaria en el plano horizontal, medida en unidades de kWh/m<sup>2</sup>/día en los meses de Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre.



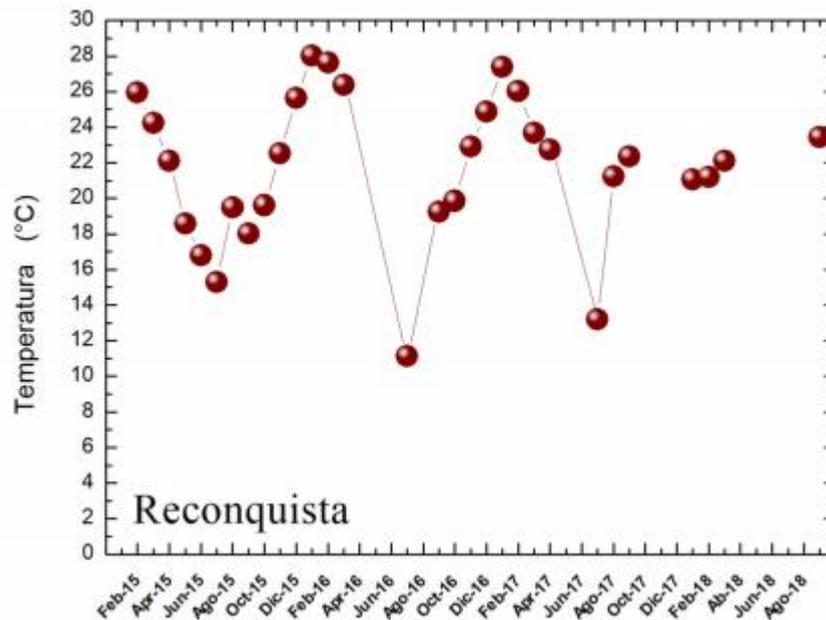


A continuación se presenta el gráfico con los promedios mensuales de radiación global en el plano horizontal, medida en unidades de kWh/m<sup>2</sup>/día. La línea horizontal azul indica el promedio anual.



### 3.8 Temperatura ambiente para la ciudad de Reconquista.

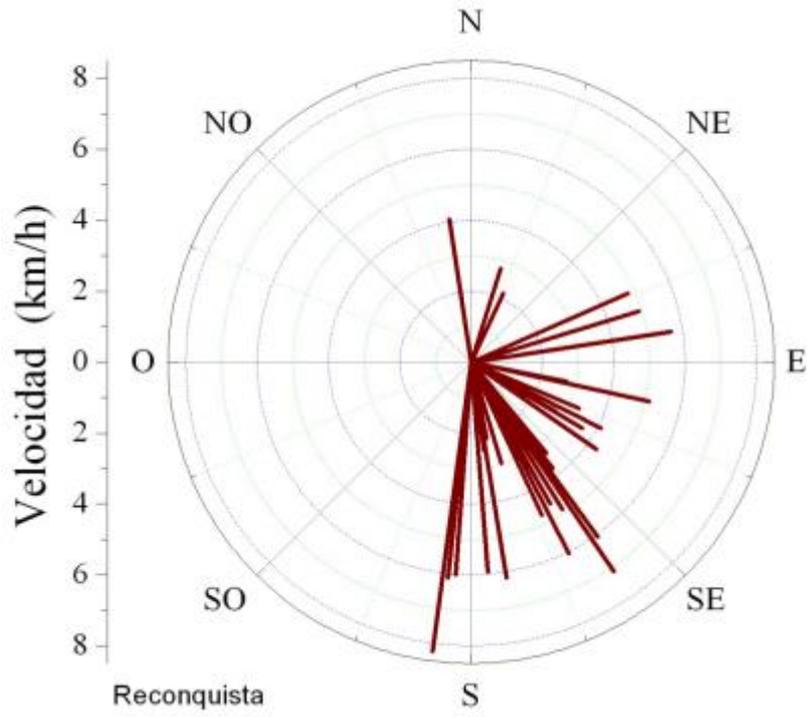
A continuación se presenta el gráfico con los promedios mensuales de temperatura ambiente, medida en unidades de grados centígrados. El comportamiento es el esperado, observándose un máximo de temperatura para el mes de Enero y un mínimo para los meses de Junio-Julio.



### 3.9 Dirección y velocidad del viento para la ciudad de Reconquista.

A continuación se presenta el promedio mensual de la dirección y velocidad del viento. La velocidad del viento es proporcional al largo de las barras, y se mide en *metros/segundo*.

La dirección de la barra es la dirección desde la que sopla el viento. Para la mayoría de las estaciones de la Red la dirección predominante es Sureste, con velocidades promedio que en general no superan los 7 km/h. Sin embargo, si nos fijamos día por día las direcciones son bastante variables.



# Parte I

# Eléctrica

## 4. Energía fotovoltaica

### 4.1 Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico se produce cuando el material de la celda solar (silicio u otro material semiconductor) absorbe parte de los fotones de los rayos solares, el fotón absorbido libera a un electrón que se encuentra en el interior de la celda. Ambos lados de la celda están conectados por un cable eléctrico, así que se genera una corriente eléctrica.

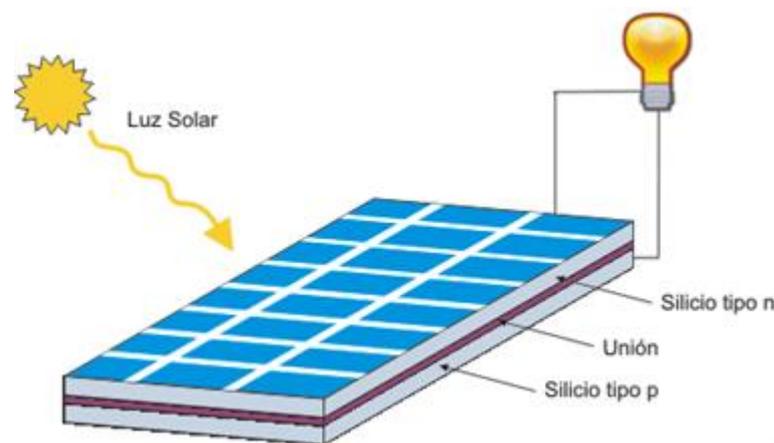


Figura 11, Efecto fotovoltaico.

<https://juanfrancisco207.wordpress.com/2015/03/18/efecto-fotovoltaico>

### 4.2 Célula fotoeléctrica

Una célula fotoeléctrica, también llamada celda, fotocélula o célula fotovoltaica, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía lumínica (fotones) en energía eléctrica (flujo de electrones libres) mediante el efecto fotoeléctrico, generando energía solar fotovoltaica. Compuesto de un material que presenta efecto fotoeléctrico: absorben fotones de luz y emiten electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

La eficiencia de conversión media obtenida por las células disponibles comercialmente (producidas a partir de silicio monocristalino) está alrededor del 14%, pero según la tecnología



utilizada varía desde el 6% de las células de silicio amorfo hasta el 14-22% de las células de silicio monocristalino. También existen las células multicapa, normalmente de arseniuro de galio, que alcanzan eficiencias del 30%. En laboratorio se ha superado el 43% con nuevos paneles experimentales.

La vida útil media a máximo rendimiento se sitúa en torno a los 25 años, período a partir del cual la potencia entregada disminuye por debajo de un valor considerable.

El tipo de corriente eléctrica que proporcionan es corriente continua, por lo que si necesitamos corriente alterna o aumentar su tensión, tendremos que añadir un inversor y/o un convertidor de potencia.



*Figura 12, Célula o Celda Fotovoltaica.*

*<https://es.wikipedia.org>.*

### **4.3 Modulo fotovoltaico**

Al grupo de células fotoeléctricas para energía solar se le conoce como panel fotovoltaico. Los paneles fotovoltaicos consisten en una red de células solares conectadas como circuito en serie para aumentar la tensión de salida hasta el valor deseado (usualmente se utilizan 12V ó 24V) a la vez que se conectan varias redes como circuito paralelo para aumentar la corriente eléctrica que es capaz de proporcionar el dispositivo.

Los módulos pueden tener diferentes tamaños: los más utilizados están formados por 36 células, con una superficie que oscila entre los 0,5 m<sup>2</sup> a los 1,3 m<sup>2</sup>.

Los paneles fotovoltaicos están compuestos por células fotovoltaicas amorfas, monocristalinas o policristalinas. Las células amorfas normalmente se utilizan en pequeños paneles solares, como los de las calculadoras, relojes o las lámparas de jardín, aunque cada vez son más utilizadas en aplicaciones de mayor tamaño. Se fabrican depositando una película



delgada de silicio sobre una hoja de otro material tal como acero. El panel está formado de una pieza y las celdas individuales no son visibles a simple vista.

Las celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino se obtienen a partir de barras largas y cilíndricas de silicio monocristalino producidas mediante procesos complejos y muy costosos; cada barra se corta en forma de obleas de medio milímetro de espesor, para su posterior uso en la fabricación de circuitos integrados.

En las celdas policristalinas, en lugar de partir de un monocristal, se deja solidificar lentamente sobre un molde la pasta de silicio, con lo cual se obtiene un sólido formado por muchos cristales pequeños de silicio, que pueden cortarse luego en finas obleas policristalinas. Las celdas fotovoltaicas policristalinas son más baratas, pero menos eficientes que las celdas fotovoltaicas monocristalinas; son cuadradas, de modo que cubra mayor área del panel solar, sin embargo, los paneles solares con celdas policristalinas producen menos energía eléctrica que las celdas fotovoltaicas monocristalinas tomando en cuenta un panel solar del mismo tamaño.

Células	Silicio	Rendimiento laboratorio	Rendimiento directo	Características	Fabricación
	Monocristalino	24 %	15 - 18 %	Son típicos los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí (Czochralski).	Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro.
	Policristalino	19 - 20 %	12 - 14 %	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules.	Igual que el del monocristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.
	Amorfo	16 %	< 10 %	Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las células.	Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico.

Tabla 1, Módulos fotovoltaicos; rendimiento de los paneles monocristalino, policristalino y amorfo.

<https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

#### 4.4 Instalaciones fotovoltaicas

Dependiendo del uso que se le dé a la energía eléctrica producida se pueden distinguir dos tipos de instalaciones:

- *Instalaciones aisladas*: la electricidad es empleada para el autoconsumo de viviendas unifamiliares o explotaciones agrícolas y ganaderas en las que, por su ubicación, el abastecimiento eléctrico de la red implica una gran dificultad y un elevado coste económico.
- *Instalaciones conectadas a red*: inyectan la energía eléctrica producida a la red, obteniéndose así, además de beneficios ambientales, beneficios económicos mediante su venta a las grandes compañías eléctricas.

La potencia de las instalaciones fotovoltaicas se da en Wp (vatios pico), que corresponde a la potencia que dan los módulos a 25 °C de temperatura y bajo condiciones de insolación de 1000W/m<sup>2</sup> (insolación aproximada de un día soleado de verano al mediodía). La potencia en Wp del módulo corresponde, aproximadamente, a la potencia máxima que puede generar. Se pueden distinguir distintos tipos de instalaciones según su potencia:

- *Instalaciones pequeñas de 3kWp como planta tipo*: pueden generar hasta 5kWp. Se utilizan en lugares rurales aislados por ser una solución limpia y muchas veces económica, o aplicaciones conectadas a red sobre tejados, azoteas de casas, hechas por particulares en zonas de su propiedad o influencia; la motivación es generalmente medioambiental. Con la generación de 3kWp se cubriría el consumo propio de una casa tipo medio en el que vivan 2-3 personas, excluyendo el consumo de calefacción y aire acondicionado.
- *Instalaciones medianas de 30kWp como planta tipo*: tienen un rango de variación de potencia entre 5kWp y 100kWp. Se utilizan en electrificaciones rurales centralizadas, o conectadas a red en edificios donde se integra en la arquitectura de los mismos. Una

instalación de 30kWp en un edificio supondría cubrir las necesidades eléctricas de diez viviendas medias.

- *Instalaciones grandes de 300kWp como planta tipo:* tienen un rango entre 100kWp y 1MWp. Son generalmente instalaciones conectadas a red, de superficies extensas, promovidas generalmente por empresas que, además de contribuir a una generación limpia de energía, desean un refuerzo de la imagen de la empresa o entidad promotora. Una planta de 300kWp cubre el consumo de un edificio de tipo medio.

#### 4.5 Arquitectura de una instalación fotovoltaica aislada.

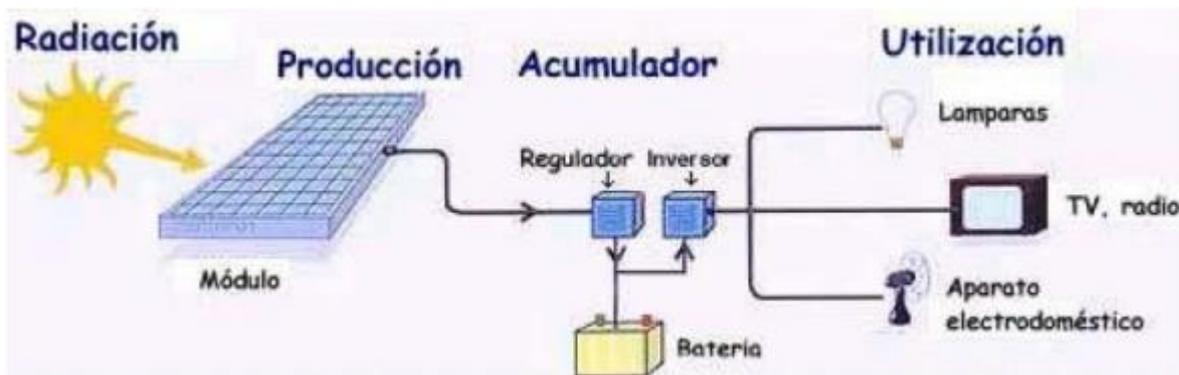


Figura 13, Componentes de una instalación fotovoltaica aislada.

Extraído del libro *Energía Solar Fotovoltaica* de Miguel Pareja Aparicio, Figura 1.1 (pág. 11), Editorial Marcombo (2003).

Como al módulo fotovoltaico ya se lo describió en el apartado 4.3 se pasará a describir los elementos principales del cuadro anterior.

- *Regulador de carga;* un regulador de carga es un equipo encargado de controlar y regular el paso de corriente eléctrica desde los módulos fotovoltaicos hacia las baterías. Por lo tanto, estos dispositivos funcionan como un cargador de baterías, evitando además que se produzcan sobrecargas y a la vez limitan la tensión de las baterías a unos valores adecuados para su funcionamiento.

De este modo, un regulador de carga se encarga de controlar la forma de realizar la carga de las baterías cuando los paneles solares están recibiendo radiación solar evitando que se produzcan cargas excesivas.

Y a la inversa, esto es, durante el proceso de descarga de las baterías destinado al consumo de electricidad, el regulador evita igualmente que se produzcan descargas excesivas que puedan dañar la vida de las baterías.

De un modo sencillo, un regulador se puede entender como un interruptor colocado en serie entre paneles y baterías, que está cerrado y conectado para el proceso de carga de las baterías, y abierto cuando las baterías están totalmente cargadas.

- *Baterías y sistemas acumuladores solares*; Las baterías, también llamado acumuladores solares o fotovoltaicos, se utilizan para almacenar la energía eléctrica generada por el sistema de generadores fotovoltaicos, con objeto de disponer de ella en periodos nocturnos o en aquellas horas del día que no luzca el sol.

No obstante, también pueden desempeñar otras funciones, como elementos que sirven para estabilizar el voltaje y la corriente de suministro, o para inyectar picos de corriente en determinados momentos, tales como en el arranque de motores.

Las baterías se componen básicamente de dos electrodos que se encuentran sumergidos en un medio electrolítico. Los tipos de baterías más recomendadas para uso en instalaciones fotovoltaicas son las de tipo estacionarias de plomo ácido y de placa tubular, compuestas de un conjunto de vasos electroquímicos interconectados de 2V cada uno, que se dispondrán en serie y/o paralelo para completar los 12, 24 ó 48 V de tensión de suministro y la capacidad de corriente en continua que sea adecuado en cada caso.

Generalmente a la asociación eléctrica de un conjunto de baterías se le suele llamar sistema acumulador o simplemente acumulador.

En la siguiente tabla se indica el nivel del voltaje del módulo fotovoltaico en función de las necesidades de consumo de potencia que se demande.



<b>Tensión de trabajo del sistema fotovoltaico</b>	
<b>Potencia demandada (en W)</b>	<b>Tensión de trabajo del sistema fotovoltaico (en V)</b>
< de 1500 W	12V
Entre 1500 W y 5000 W	24V ó 48V
> 5000 W	120V ó 300V

*Tabla 2, Tensión de trabajo del sistema fotovoltaico.*

La capacidad de una batería se mide en amperios-hora (Ah), unidad de carga eléctrica que indica la cantidad de carga eléctrica que pasa por los terminales de una batería, es decir, indica la cantidad de electricidad que puede almacenar durante la carga la batería, para después devolverla durante su descarga.

No obstante, el tiempo invertido en la descarga de la batería influye de manera decisiva en su capacidad de almacenaje. De esta forma, conforme más rápido se realice la descarga de la batería su capacidad de suministro disminuye, debido a que más energía se pierde por la resistencia interna, y a la inversa, conforme el tiempo de descarga aumenta, o sea, se realiza de forma más lenta, entonces la capacidad de la batería aumenta.

Por ello, al depender la capacidad de una batería del tiempo invertido en su descarga, éste valor se suele suministrar referido a un tiempo estándar de descarga (10 ó 20 horas), y para un voltaje final determinado.



#### 4.5.1 Parámetro de una instalación fotovoltaica aislada.

A continuación, se indicarán las definiciones y comentarios sobre los parámetros más importantes que definen a las baterías o acumuladores solares:

- *Factor de rendimiento de la batería*: parámetro que se define como el cociente entre el valor de los amperios-hora que realmente se puede descargar de la batería dividido por el valor de los amperios-hora empleados en su carga.
- *Autodescarga*: es la pérdida de carga de la batería cuando ésta permanece en circuito abierto. Habitualmente se expresa como porcentaje de la capacidad nominal, medida durante un mes, y a una temperatura de 20 °C. En general, los valores de autodescarga de las baterías empleadas no exceden del 6% de su capacidad nominal por mes.
- *Capacidad nominal, C<sub>20</sub> (Ah)*: es la cantidad de carga eléctrica que es posible extraer de una batería en 20 horas, medida a una temperatura de 20 °C, hasta que la tensión entre sus terminales llegue a 1,8V/vaso.
- *Régimen de carga (o descarga)*: es un parámetro que relaciona la capacidad nominal de la batería y el valor de la corriente a la cual se realiza la carga (o la descarga). Se expresa normalmente en horas, y se representa como un subíndice en el símbolo de la capacidad y de la corriente a la cual se realiza la carga (o la descarga). Por ejemplo, si una batería de 100 Ah se descarga en 20 horas a una corriente de 5 A, se dice que el régimen de descarga es 20 horas ( $C_{20} = 100 \text{ Ah}$ ) y la corriente se expresa como  $I_{20} = 5 \text{ A}$ .
- *Profundidad de descarga (PD ó DOD)*: se define como el cociente entre la carga extraída de una batería y su capacidad nominal, expresándose normalmente en %.
- *Profundidad de descarga máxima (PD<sub>máx</sub>)*: en este caso se define como el nivel máximo de descarga que se le permite a la batería antes que se produzca la desconexión del regulador, con objeto de proteger la durabilidad de la misma. Las profundidades de descarga máximas que se suelen considerar para un ciclo diario (profundidad de descarga máxima diaria) están en torno al 15-25%. Para el caso de un ciclo estacional, que es el número máximo de días que podrá estar una batería descargándose sin recibir los módulos radiación solar suficiente, está en torno a los 4-10 días y una profundidad de descarga del 75% aproximadamente. En todo caso, para instalaciones fotovoltaicas no se recomiendan descargas agresivas, sino más bien progresivas, por lo que las baterías a utilizar suelen ser con descarga de 100 horas ( $C_{100}$ ), pues cuanto más intensa y rápida es la descarga de una batería, menos energía es capaz de suministrar.



- *Capacidad útil*: es la capacidad disponible o utilizable de la batería y se define como el producto de la capacidad nominal por la profundidad máxima de descarga permitida.
- *Estado de carga*: se define como el cociente entre la capacidad residual de una batería, en general parcialmente descargada, y su capacidad nominal.

En la mayoría de las ocasiones, los sistemas de acumulación de energía estarán formados por asociaciones de baterías, que estarán conectadas en serie o en paralelo, para satisfacer las necesidades, bien de tensión, o bien de capacidad que sean demandadas.

Mediante las asociaciones en serie de baterías se consigue aumentar el voltaje final respecto a la tensión de servicio que cada batería por sí sola puede ofrecer. En el conexionado en serie de varias baterías se debe conectar el borne negativo de cada batería con el positivo de la siguiente, y así sucesivamente. La tensión o voltaje que proporciona el conjunto es igual a la suma de las tensiones de cada una de las baterías individuales.

Por el contrario, mediante las asociaciones en paralelo de baterías se consigue aumentar la capacidad de suministro del conjunto, es decir, su autonomía, sumando las capacidades nominales de cada batería y manteniendo el mismo voltaje de cada batería individual.

- *Inversor o convertidor DC/AC*; el convertidor de corriente DC/AC, también llamado inversor u ondulator, es un dispositivo electrónico de potencia encargado de convertir la corriente continua (DC) proveniente de los generadores fotovoltaicos en corriente alterna (AC) para su consumo residencial. Además sincroniza la frecuencia de la corriente inyectada con la de la red, adaptándola a las condiciones requeridas según el tipo de carga, garantizando así la calidad de la energía vertida en la instalación eléctrica de la residencia.

Los inversores vienen caracterizados principalmente por la tensión de entrada desde las baterías, la potencia máxima que puede proporcionar y su eficiencia o rendimiento de potencia. Este último se define como la relación entre la potencia eléctrica que el inversor entrega para su uso (potencia de salida) y la potencia eléctrica que extrae del sistema de baterías o de los generadores fotovoltaicos (potencia de entrada).

En general, los inversores en las instalaciones fotovoltaicas deben cumplir las siguientes exigencias:



- Deberán ofrecer una eficiencia lo más alta posible que minimice las pérdidas. El rendimiento de potencia de los inversores (cociente entre la potencia activa de salida y la potencia activa de entrada), oscila entre el 90% y el 97%. El valor del rendimiento depende mucho de la potencia de entrada, que deberá ser lo más cercana, o incluso tratar que sea igual a la nominal de funcionamiento del inversor, dado que si varía mucho entonces el rendimiento del inversor disminuye sensiblemente.
- Estar adecuadamente protegidos contra cortocircuitos y sobrecargas, como más adelante se verá.
- Disponer de elementos que incorporen el rearme y desconexión automática del inversor.
- Poder admitir demandas instantáneas de potencia mayores del 150% de su potencia máxima o nominal, con objeto de hacer frente a los picos de arranque que originan muchos electrodomésticos, etc..., que van a demandar mayor potencia que la nominal en el momento de su puesta en marcha o arranque de sus motores.
- Ofrecer una baja distorsión armónica y bajo autoconsumo.
- Disponer de aislamiento galvánico.
- Disponer de sistema de medida y monitorización.
- Incorporar controles manuales que permitan el encendido y apagado general del inversor, y su conexión y desconexión a la interfaz AC de la instalación.

Volviendo a las protecciones que deben incorporar en sus funciones los inversores de corriente, éstas deberán ser las siguientes:

- Protección contra sobrecargas y cortocircuitos, que permitirá detectar posibles fallos producidos en los terminales de entrada o salida del inversor.
- Protección contra calentamiento excesivo, que permitirá desconectar el inversor si la temperatura del inversor sobrepasa un determinado valor umbral, y mantenerse desconectado hasta que el equipo no alcance una temperatura inferior preestablecida.
- Protección de funcionamiento modo isla, que desconectará el inversor en caso que los valores de tensión y frecuencia de red queden fuera de unos valores umbrales que permitan un funcionamiento correcto.
- Protección de aislamiento, que detecta posibles fallos de aislamiento en el inversor.
- Protección contra inversión de polaridad, que permite proteger el inversor contra posibles cambios en la polaridad desde los paneles fotovoltaicos.



## 4.6 Dimensionamiento de la instalación fotovoltaica.

Se realizará el dimensionamiento en los siguientes pasos:

- 4.6.1 Cálculo de la energía generada.
- 4.6.2 Cálculo de la capacidad de la batería.
- 4.6.3 Cálculo del Regulador de carga.
- 4.6.4 Selección del inversor CD/AC.
- 4.6.5 Cálculo de cableado de la instalación.
- 4.6.6 Cálculo de las protecciones.

### 4.6.1 Cálculo de la energía entregada.

Se comenzará por explicar que se empleará 3 paneles de 330W - AXITEC, los datos técnicos se mencionan a continuación (extraídos del catálogo Técnico AXITEC);

- 72 células policristalinas de alto rendimiento de 156 mm x 156 mm (6").
- Carga admisible; 2400 Pa/m<sup>2</sup>.
- Dimensiones; Longitud x Ancho x Espesor: 1956 x 992 x 40 mm.
- Peso 23 kg con marco de aluminio anodizado en plata.
- Conexión

Caja de conexión	grado de protección IP67 (3 diodos de bypass)
Cable	aprox. 1,1 m, 4 mm <sup>2</sup>
Sistema de enchufe	enchufe / hembra IP67

- Valores límites

<b>Valores límites</b>	
Tensión del sistema	1000 VDC
NOCT (temperatura de la célula de operación nominal)*	45°C +/-2K
Carga máxima admisible	2400 Pa/m <sup>2</sup>
Corriente de reversión IR	20,0 A
Temperatura de funcionamiento permitida	-40°C a +85°C

(No se deben conectar al módulo tensiones externas superiores al valor máximo de tensión)

\*NOCT, intensidad de irradiación 800 W/m<sup>2</sup>, AM 1.5  
velocidad del viento 1 m/sec, temperatura 20°C

- Coeficientes de temperaturas;

<b>Coeficiente de temperatura</b>	
Tensión Uoc	-0,30 %/K
Corriente Isc	0,04 %/K
Potencia Pmpp	-0,40 %/K

- Curva característica I/U (Corriente/Tensión).

<b>Luz débil (Ejemplo para AC-330P/72S)</b>		
Curva característica I/U	Corriente	Tensión
200 W/m <sup>2</sup>	2,24 A	36,40 V
400 W/m <sup>2</sup>	3,85 A	36,42 V
600 W/m <sup>2</sup>	5,58 A	37,34 V
800 W/m <sup>2</sup>	7,03 A	37,75 V
1000 W/m <sup>2</sup>	8,73 A	37,82 V

Las tolerancias de medición ascienden a +/- 3%.

- Rendimiento del módulo vs. años.

Rendimiento del módulo (%)	Años
100	1
97	5
90	10
85	15
80	20

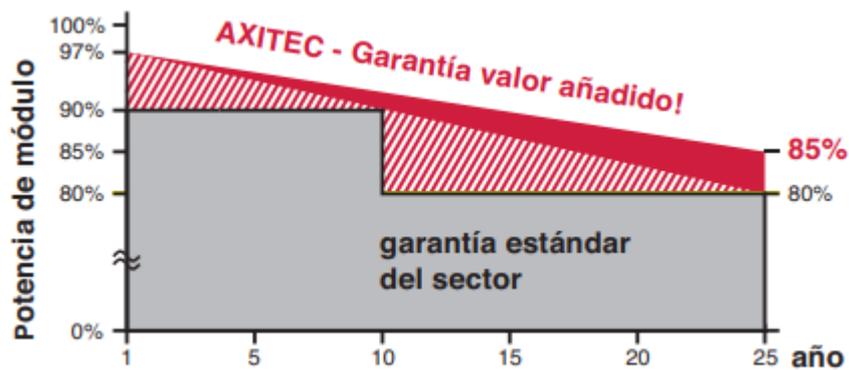
- Datos Eléctricos

**Datos eléctricos** (en condiciones estándar de prueba (STC), irradiación de 1000 vatios/m<sup>2</sup> en el espectro AM 1,5 a una temperatura de célula de 25°C)

Tipo	Potencia nominal P <sub>mpp</sub>	Tensión nominal U <sub>mpp</sub>	Corriente nominal I <sub>mpp</sub>	Corriente de cortocircuito I <sub>sc</sub>	Tensión de circuito abierto U <sub>oc</sub>	Coefficiente de rendimiento del módulo
AC-325P/72S	325 Wp	37,66 V	8,63 A	9,15 A	45,92 V	16,75 %
AC-330P/72S	330 Wp	37,82 V	8,73 A	9,28 A	45,97 V	17,01 %
AC-335P/72S	335 Wp	37,98 V	8,83 A	9,30 A	46,45 V	17,26 %

- Garantía

- 15 años de garantía al 90% de la potencia nominal
- 25 años de garantía al 85% de la potencia nominal



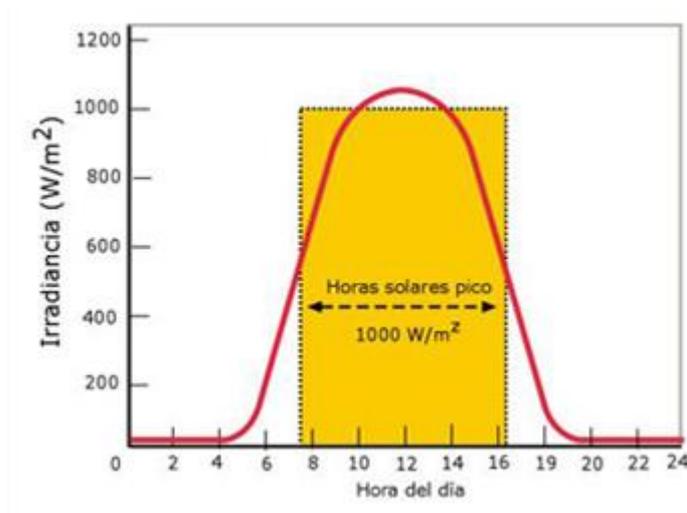
Para ello deberemos conocer a partir de valores estadísticos de la zona el valor de irradiación solar diaria media  $H$  ( $\text{kW.h/m}^2.\text{dia}$ ) del lugar. Para esto se hará uso de base de datos de irradiación de la República Argentina sabiendo que la Latitud donde se encontrará emplazado el proyecto es de  $29,1^\circ$ , igual que la Latitud de la ciudad de Mercedes Pcia. de Corrientes que es la ciudad que figura en dicha base de datos con los siguientes valores de irradiación solar mensuales medios expresados en  $\text{kW.h/m}^2$ ;

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6.8	6.0	5.6	4.1	3.4	2.6	3.1	3.7	4.5	5.9	6.2	7.1

*Tabla 3; Valores de irradiación diaria media sobre superficie horizontal en  $\text{kW.h/m}^2$ , provenientes de pirómetros de la red solarimetrica de la República Argentina.*

Ahora es necesario introducir un nuevo concepto, las horas de pico solar HPS, definido como las horas de luz solar por día equivalente, pero definida en base a una Irradiancia  $I$  ( $\text{kW/m}^2$ ) constante de  $1\text{kW/m}^2$ , a la cual está siempre medida la potencia de los paneles solares.

Es un modo de estandarizar la curva diaria de Irradiancia solar, como se observa en la figura siguiente.



*Figura 14, horas pico solar HPS.*

<http://calculationsolar.com>



Como puede verse en la figura anterior el área definida por el rectángulo es igual al área definida por la curva horaria de Irradiancia real.

Ahora en el cuadro siguiente se puede observar las Hora Pico Solar para distintas localidades del país en el mes de Junio.

Localidad	Pcia.	Latitud sur	It (kcal/día m2)	T (horas/día) -
Buenos Aires	Capital	34,4	2840	3,3
Mar del Plata	Bs As	38,3	2795	3,2
Bahía Blanca	Bs As	38,4	2511	2,9
Catamarca	Catamarca	28,3	3707	4,3
Córdoba	Córdoba	31,2	3320	3,8
Mercedes	Corrientes	29,1	3388	3,9
Resistencia	Chaco	27,3	2847	3,3
Paraná	Entre Ríos	31,5	3492	4,0
Formosa	Formosa	26,1	3603	4,2
San Salv. Jujuy	Jujuy	24,2	3388	3,9
Santa Rosa	La Pampa	36,3	2769	3,2
La Rioja	La Rioja	29,2	3681	4,2
Mendoza	Mendoza	32,5	3371	3,9
Posadas	Misiones	27,2	3105	3,6
Neuquén	Neuquén	38,6	2580	3,0
Viedma	Rio Negro	40,5	2580	3,0
Salta	Salta	24,5	3105	3,6
San Juan	San Juan	31,3	3896	4,5
San Luis	San Luis	33,2	3629	4,2
Rosario	Santa Fe	32,6	3079	3,6
Stgo. del Estero	Stgo. Estero	27,5	3010	3,5
Tucumán	Tucumán	26,5	2632	3,0

Tabla 3, Captación solar diaria y horas pico de captación a 1kW/m<sup>2</sup> en el mes de Junio.

Extraído del libro *Energía Solar* de Néstor Pedro Quadri, Cuadro 1-IV (pág. 57), Editorial Alsina (2003).

Al cálculo de la cantidad de paneles necesarios en base al consumo real de energía se realiza también teniendo en cuenta las horas pico solar diario en el mes de menor irradiación solar que es de 3,9 horas en el mes de junio para la localidad de Mercedes Corrientes con una latitud de 29,1°, igual que para la localidad de Reconquista Provincia de Santa Fe.

De esta manera en una de las ecuaciones para el cálculo de la cantidad de paneles solares se puede despejar la variable de la energía entregada para la peor condición, mes de Junio;

$$N_p = E / (0,9 \cdot W_p \cdot HPS) \Rightarrow E = N_p \times (0,9 \times W_p \times HPS)$$



donde:

$N_p$ : Número de paneles

$E$ : generación de energía real

$W_p$ : es la potencia nominal del panel

$HPS$ : es la cantidad de horas pico solar en el mes de junio = 2,75 (según estudio del Gob. de Santa Fé)

$$E = 3 \times (0,9 \times 330W \times 2,75hs) = 2.450 \text{ W.h} = 2,45kWh$$

Si se consideran las pérdidas reales de todos los equipos se tiene;

$$E = E_R / K_T \Rightarrow E_R = E \times K_T$$

Donde  $K_T$  es el parámetro de rendimiento global de la instalación fotovoltaica, definido como:

$$K_T = [1 - (k_B + k_C + k_R + k_X)] \times [1 - (k_A \times D_{out}) / P_d]$$

Los factores de la ecuación anterior son los siguientes:

-  $k_B$ : Coeficiente de pérdidas por rendimiento del acumulador (batería);

0,05 (5%) en sistemas que no demanden descargas intensas, 0,1 en sistemas con descargas profundas o bajas temperaturas.

-  $k_C$ : Coeficiente de pérdidas en el convertidor;

0,05 (5%) para convertidores senoidales puros, trabajando en régimen óptimo, 0,1 en otras condiciones de trabajo, lejos del óptimo.

-  $k_R$ : Pérdidas debida al rendimiento del regulador, que se adopta 0,1 (10%) por defecto.

-  $k_X$ : Coeficiente de pérdidas varias;



Agrupar otras pérdidas como rendimiento de red, efecto joule, etc.

0,05 – 0,15 como valores de referencia, se escoge por defecto 0,1 (10%).

- KA: Coeficiente de pérdida por auto-descarga diaria (dada a los 20°C);

0,002 para baterías de baja autodescarga Ni-Cd.

0,005 para baterías estacionarias Pb-ácido (las más habituales).

- Dout: Número de días de autonomía de la instalación;

Serán los días donde la instalación deba operar con Irradiancia mínima (días nublados continuos), en los cuales se va a consumir más energía de lo que el sistema es capaz de generar.

4 – 10 días como valor de referencia.

- Pd: Profundidad de descarga estacional de la batería;

Esta profundidad de descarga no debe exceder el valor de 75% (referida a la capacidad nominal del acumulador), ya que la eficiencia de este decrece en gran medida con ciclos de carga-descarga muy profundos, se adopta entre 60 y 70%.

En la realización de este proyecto se han considerado los siguientes valores de coeficientes de pérdidas;

$$KB = 0,05 / KC = 0,05 / KX = 0,1 / KR = 0,1 / KA = 0,005 / Dout = 4 / Pd = 0,65$$

De esta manera el rendimiento de la instalación fotovoltaica  $K_T$ , es el siguiente;

$$K_T = [1 - (k_B + k_C + k_R + k_X)] \times [1 - (k_A \times D_{out}) / P_d]$$

$$K_T = [1 - (0,05 + 0,05 + 0,1 + 0,1)] \times [1 - (0,005 \times 4) / 0,65] = 0,678$$

De esta manera se tiene un valor de energía real entregado por el sistema en el mes de Junio de:

$$E_R = E \times K_T = 2450 \text{ W.h} \times 0,678 = \mathbf{1661,27 \text{ W.h}}$$

#### 4.6.2 Cálculo de la capacidad de la batería o banco de baterías.

La capacidad de la batería o las baterías se puede determinar con la siguiente formula:

$$C = \frac{ER \cdot D_{out}}{V_t \cdot P_d} = \frac{1661,27Wh \cdot 4}{12Volts \cdot 0,65} = 852 \text{ Ah}$$

Siendo;

C: capacidad de la batería (Ah),

ER: consumo o generación real de energía = 1.661,27Wh

Dout: días de autonomía del sistema, se adopta 4 días,

Vt: voltaje de trabajo del acumulador = 12Volts,

Pd: coeficiente de profundidad de descarga estacional de la batería = 0,65.

La capacidad está influenciada por la temperatura, aumenta si la temperatura aumenta y disminuye si esta lo hace, ver el siguiente cuadro;

Temperatura (°C)	Capacidad (%)	Eficiencia
30	105	1,05
25	100	1,0
16	90	0,90
4	77	0,77
-7	63	0,63
-18	49	0,49

*Tabla 4, Relación capacidad-temperatura.*

*Extraído del libro Energía Solar Fotovoltaica de Miguel Pareja Aparicio, Tabla 1.3 (pág. 25), Editorial Marcombo (2003).*

Los fabricantes indican la capacidad de la batería para un régimen de descarga determinado, generalmente 100h, 20h o 10h. El régimen de descarga surge de la relación;

$$\text{Duración de descarga (h)} = C_N \text{ (Ah)} / I_N \text{ (A)}$$



Es decir, para una batería de capacidad de 100Ah de la que se extrae 5A se tendrá un régimen de descarga de  $100/5 = 20$  horas y si se extrae 10A el régimen será de 10 horas.

Veamos ahora características técnicas de baterías de descarga lenta según fabricantes:

Tensión	C100 (Ah)	C20 (Ah)	C10 (Ah)	Medidas	Peso (Kg)
12 V	290	225	210	630x208x4	103
12 V	370	305	270	756x208x4	125
12 V	440	365	320	882x208x4	146
12 V	550	455	400	1008x208x	161
12 V	680	560	490	882x208x5	189
12 V	790	650	570	756x208x5	217
12 V	930	760	670	882x208x7	269
12 V	1230	1020	800	1290x193x	368
12 V	1550	1280	1120	1290x235x	447
12 V	1860	1530	1340	1290x275x	528

Tabla 5, Características batería descarga lenta.

Extraído del libro *Energía Solar Fotovoltaica de Miguel Pareja Aparicio, Tabla 1.4 (pág. 25), Editorial Marcombo (2003).*

Se puede apreciar que a mayor valor de intensidad de descarga para una misma cantidad de hora la batería es de mayor tamaño. Se puede explicar como ejemplo que para una batería C10 (10horas) de capacidad 210Ah se puede extraer 21A durante 10 horas y para una batería de C100 se puede extraer 2,1A en 100horas, de esta manera se concluye que si la descarga es más rápida la capacidad de la batería se ve afectada.

En la tabla siguiente se observan valores comerciales de baterías estacionarias monobloc, en donde se indica directamente la Capacidad Ah en  $C_{100}$ ;

Tipo	Capacidad	Dimensiones (mm)			Peso (Kg)
	Ah en $C_{100}$	Ancho	Largo	Alto	
6R052	69	268	175	216	21
6R072	96	326	174	218	25
6 RO 108	144	346	175	284	41
6 RO 120	169	369	253	234	42
6 RO 140	187	509	226	227	49
6 RO 150	200	509	216	227	53

Tabla 6, Baterías estacionarias monobloc.

Extraído del libro *Energía Solar Fotovoltaica de Miguel Pareja Aparicio, Tabla 3.1 (pág. 69), Editorial Marcombo (2003).*



Ahora se pasará a calcular la cantidad de baterías que tendrá el banco, como el valor de la instalación es de 24V se contemplará solo la cantidad de estas en paralelo para contemplar la capacidad de corriente a entregar.

Se elegirá la batería **Tipo 6 RO 120** de 169Ah

$$N_{\text{paralelo\_baterías}} = C / C_{\text{batería}} = 852 \text{ Ah} / 169\text{Ah} \approx \mathbf{5 \text{ baterías}}$$

Como el banco de baterías trabajará a 24V se debe contemplar el N° en serie:

$$N_{\text{serie\_baterías}} = 24\text{V}/12\text{V} = 2$$

De esta manera se concluye que se tendrá 10 baterías conectadas en 5 ramas de 2 baterías en serie de capacidad.

#### **4.6.3 Cálculo del regulador de la instalación.**

El regulador es el encargado de controlar los procesos de carga y descarga de la batería. Las principales tareas que realiza son:

- Evita sobrecargas en la batería: que una vez cargada la batería (EDC = 100%) no continúe cargando la batería. Así se evita la generación de gases y la disminución del líquido en el interior de la batería; en consecuencia aumenta la vida de la batería.
- Impide la sobre-descarga de la batería en los periodos de luz solar insuficiente: cuando una vez la batería esté descargada no continúe suministrando corriente a la instalación; en consecuencia aumenta la vida de la batería.
- Asegura el funcionamiento del sistema en el punto de máxima eficacia.

Existen dos tipos de reguladores: paralelo o shunt y serie. En instalaciones de baja potencia se utilizan los reguladores paralelo o shunt, y para potencias mayores los reguladores serie. Esto es así porque para tensiones mayores se necesita unos disipadores de potencia para los dispositivos de control de potencia de mayor tamaño, ya que deben soportar mayores niveles de intensidad.



Para esto simplemente se multiplicará la intensidad de cortocircuito de cada panel por el número de paneles conectados en paralelo. Este resultado será la máxima intensidad nominal de entrada al regulador;

$$I_{\text{entrada}} = 1,1 \cdot I_{\text{sc}} \cdot N_p = 1,1 \cdot 9,28\text{Amp} \cdot 3 = 30,62\text{Amp},$$

Donde:

$I_{\text{sc}}$  = Corriente de cortocircuito de cada panel.

$N_p$  = número de ramas en paralelo.

Siendo 1,1 un factor de seguridad (10%) para evitar daños ocasionales al regulador.

Regulador	Tensión del sistema (V)	Corriente máxima (A)	Dimensiones (mm)
PR0303	12 V	IP22 3A	146 x 90 x 33
PR0505	12 V	IP22 5A	146 x 90x33
SOLSUM5	12/24 V	1P22 3A	130 x 88x39
SOLSUM 6	12/24 V	IP22 6A	130 x 88 x 39
SOLSUM8	12/24 V	IP22 8A	130x88x39
SOLSUM W	12/24 V	IP22 10 A	130x88x39
SOLARIX 2070	12/24 V	IP65 70	330 x 360 x 190
SOLARIX2140	12/24 V	IP65 140 A	330 x 360 x 190
SOLARIX 2155	48 V	IP65 55	330x360x190
SOLARIX 4110	48 V	IP65110	330 x 360 x 190
SOLARIX 4140	48 V	IP65 140	330x360x190

Tabla 7, características de reguladores.

Extraído del libro *Energía Solar Fotovoltaica de Miguel Pareja Aparicio, Tabla 1.6 (pág. 40), Editorial Marcombo (2003).*

Se elegirá el regulador SOLARIX 2070 (12/24V – IP65 – I<sub>max</sub>; 70A)

	2070	2140	4055	4110	4140
<b>Funcionamiento</b>					
Tensión del sistema	12 V (24 V)		48 V		
Consumo propio	14 mA				
<b>Datos de entrada CC</b>					
Tensión de circuito abierto del módulo solar	< 50 V		< 100 V		
Corriente del módulo	70 A	140 A	55 A	110 A	140 A
<b>Datos de salida CC</b>					
Corriente de consumo	70 A	70 A	55 A	55 A	70 A
Programable	Tensión final de carga	13,7 V (27,4 V)		54,8 V	
	Tensión de carga reforzada	14,4 V (28,8 V)		57,6 V	
	Carga de compensación	14,7 V (29,4 V)		58,8 V	
	Tensión de reconexión (SOC / LVR)	> 50 % / 12,6 V (25,2 V)		> 50 % / 50,4 V	
	Protección contra descarga profunda (SOC / LVD)	< 30 % / 11,1 V (22,2 V)		< 30 % / 44,4 V	
<b>Condiciones de uso</b>					
Temperatura ambiente	-10 °C ... +60 °C				
<b>Equipamiento y diseño</b>					
Terminal (cable fino / único)	50 mm <sup>2</sup> - AWG 1	95 mm <sup>2</sup> - AWG 000	50 mm <sup>2</sup> - AWG 1	70 mm <sup>2</sup> - AWG 00	95 mm <sup>2</sup> - AWG 000
Grado de protección	IP 65				
Dimensiones (X x Y x Z)	330 x 330 x 190 mm	360 x 330 x 190 mm	330 x 330 x 190 mm	360 x 330 x 190 mm	
Peso	10 kg				

*Tabla característica regulador Solarix 2070 – Steca.  
Extraído del catálogo Steca Electrónica Solar, página 37.*

La corriente de salida dependerá de la potencia a alimentar (o instalada) y será;

$$I_{\text{salida}} = 1,25 \times (P_{AC} / \eta_{\text{inv}}) / V_{\text{bateria}} = 1,25 \times (\text{Pot. máx. a alim.} / 0,95) / 24 \text{Volts}$$

Donde 0,95 es el rendimiento del inversor.

La  $I_{\text{salida}} = 70\text{A}$ , de esta manera para un voltaje del sistema de 24V, se tendrá una potencia máxima a abastecer de;

$$\text{Pot. máx a alimentar} = \frac{I_{\text{salida}} \times V_{\text{bateria}} \times \eta_{\text{inv}}}{1,25} = \frac{70\text{Amp} \times 24\text{V} \times 0,95}{1,25} = 1276,8\text{W}$$

El número de reguladores necesarios a instalar vendrá dado por la siguiente expresión;

$N_{\text{reguladores}} = I_{\text{entrada}} / I_{\text{máx. del reg.}} = 30,62\text{Amp} / 70\text{Amp} = 0,44$  adoptándose 1 regulador, como el descrito anteriormente.



### *Verificación del regulador*

- Potencia máxima admisible por el regulador; ésta es de 8400W en 24Vcc.

La potencia máxima producida será la potencia nominal de cada módulo fotovoltaico por la cantidad de ramas o de estos en paralelo;

$$\text{Pot. Máx.} = 330\text{W} \cdot 3 = 990\text{W} < 8400\text{W}$$

- Tensión máxima en circuito abierto admitida por el regulador; 50Vcc

La tensión de circuito abierto del panel es  $V_{oc} = 45,97\text{Volts} < 50\text{Vcc}$

- Rango de tensión de entrada de diseño del regulador:  $< 50\text{Vcc}$

Como el regulador va a ser alimentado por 3 paneles en paralelo, la tensión máxima aplicada al mismo será la máxima de cada panel que es igual a 37,82Volts (tensión nominal) que se encuentra dentro del rango del regulador.

#### **4.6.4 Selección del inversor o convertidor DC/AC**

Si se empleara el inversor conectados directamente a los paneles fotovoltaicos, se empleara el método de selección descrito en este inciso.

En el mercado se disponen de dos tipos de inversores cd/ca, los de onda sinusoidal modificada y los de onda pura, los primeros pueden alimentar a la mayoría de los electrodomésticos, sin embargo puede presentar problemas de rendimiento con cargas inductivas, los segundos son más sofisticados y pueden alimentar circuitos electrónicos, pero son más caros que los primero.

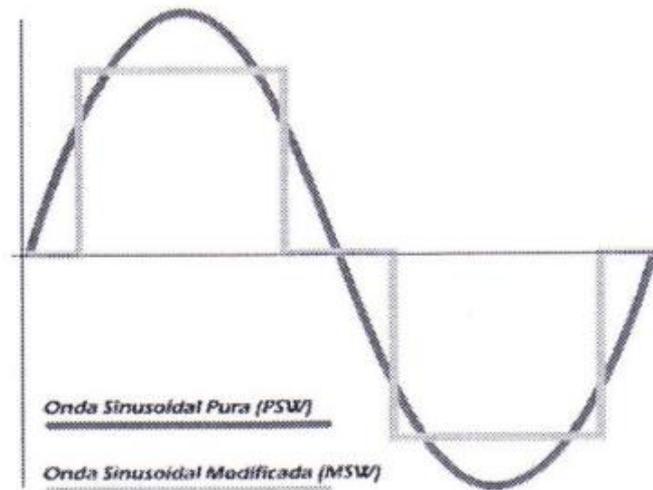


Gráfico 8, Señal de salida de los inversores.

Extraído del libro *Energía Solar Fotovoltaica* de Miguel Pareja Aparicio, Figura 1.38 (pág. 47), Editorial Marcombo (2003).

A la hora de dimensionar el inversor adecuado, además de conocer la tensión de servicio de la batería, como tensión de entrada en continua y de la potencia demandada por las cargas, se hace necesario calcular también la tensión y corriente generada en el punto de máxima potencia de funcionamiento de los paneles solares.

Para el cálculo de la tensión de máxima potencia que ofrece el generador fotovoltaico ( $V_{MPtotal}$ ), ésta se obtiene multiplicando el valor de la tensión de máxima potencia ( $V_{m\acute{a}x.}$ ) de cada panel por el número de paneles conexonados en serie ( $N_{serie}$ ) en cada ramal del generador:

$$V_{MPtotal} = V_{m\acute{a}x.} \cdot N_{serie}$$

Siendo en este caso,  $V_{m\acute{a}x.} = 37,82V$  (ver característica del módulo seleccionado) y  $N_{serie} = 1$  panel por ramal, para la configuración obtenida, por lo que resulta:

$$V_{MPtotal} = 37,82V \cdot 1 = 37,82 V$$

Por otro lado, para el cálculo de la corriente que suministra el generador fotovoltaico cuando proporciona la máxima potencia ( $I_{MPtotal}$ ) vendrá dada al multiplicar la intensidad de corriente máxima ( $I_{m\acute{a}x.}$ ) (Corriente nominal) en el punto de máxima potencia o potencia pico del módulo instalado por el número de paneles colocados en paralelo ( $N_{paralelo}$ ) o ramales, es decir;

$$IMP_{total} = I_{m\acute{a}x} \cdot N_{paralelo}$$

Siendo en este caso,  $I_{m\acute{a}x} = 8,73 \text{ Amp}$ . (Ver características del módulo seleccionado) y  $N_{paralelo} = 3$  paneles o ramales, para la configuración obtenida, por lo que la anterior expresión resulta:

$$IMP_{total} = 8,73 \text{ Amp} \times 3 = 26,19 \text{ Amp}$$

En cuanto a la potencia nominal que debe tener el inversor, se debe tener en cuenta que éste debe satisfacer la potencia máxima prevista de consumo instantáneo (PAC), incrementado en al menos un 35% para tener en cuenta los "picos de arranque" que generan algunos equipos, lo que hacen aumentar su potencia nominal durante su puesta en marcha. En este caso la potencia nominal del inversor ( $P_{inv}$ ) deberá ser calculada por la siguiente expresión:

$$P_{inv} = 1,35 \cdot PAC$$

Se empleará un inversor DC/AC *Steca PLI 1100* de las siguientes características; 24/230V de onda sinusoidal y 1000W de potencia (ver más características en el anexo).

	550	550-L60	600	600-L60	1100	1100-L60	1200	1200-L60
<b>Funcionamiento</b>								
Tensión del sistema	12 V		24 V		24 V		48 V	
Potencia continuo	500 VA			1.000 VA				
Potencia 30 min.	550 VA			1.110 VA				
Potencia 5 sec.	1.500 VA			3.000 VA				
Potencia asimétrica	350 VA			500 VA				
Eficiencia máxima	93 %			94 %				
Consumo propio standby / ON	0,5 W / 6 W			0,7 W / 10 W				
<b>Datos de entrada CC</b>								
Tensión de la batería	10,5 V ... 16 V		21 V ... 32 V		21 V ... 32 V		42 V ... 64 V	
Tensión de reconexión (LVR)	12,5 V		25 V		25 V		50 V	
Protección contra descarga profunda (LVD)	por corriente o por Tarom							
<b>Datos de salida CA</b>								
Tensión de salida	230 V AC +/-10 %	115 V AC +/-10 %	230 V AC +/-10 %	115 V AC +/-10 %	230 V AC +/-10 %	115 V AC +/-10 %	230 V AC +/-10 %	115 V AC +/-10 %
Frecuencia de salida	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
Detección de consumidor (standby)	ajustable: 2 W ... 50 W							
<b>Seguridad</b>								
Clase de protección	II (doble aislamiento)							
Protección electrónica	polaridad invertida batería, polaridad invertida CA, sobretensión, sobrecorriente, sobretemperatura							
<b>Condiciones de uso</b>								
Temperatura ambiente	-20 °C ... +50 °C							
<b>Equipamiento y diseño</b>								
Largo del cable de la batería / CA	1,5 m / 1,5 m							
Diametro de cable de la batería / CA	16 mm <sup>2</sup> / 1,5 mm <sup>2</sup>							
Grado de protección	IP 20							
Dimensiones (X x Y x Z)	212 x 395 x 130 mm							
Peso	6,6 kg				9 kg			

Datos técnicos a 25 °C / 77 °F

Tabla característica regulador Solarix 2070 – Steca.

Extraído del catálogo Steca Electrónica Solar, página 39.



De esta manera se elige el inversor citado de 1000W. En el caso de utilizarlo con el banco de baterías se realiza el siguiente cálculo de verificación.

Ahora se puede verificar el dimensionamiento de la capacidad de las baterías en función de la potencia del inversor seleccionado, según recomendaciones de la Marca *Steka Electronic Solar*.

Donde:

$$C_{bat} \geq 5.h \times P_{nom} / U_{nom} = 5.h \times 1000W / 24V = 208$$

En donde al tener un banco de 5 baterías de 169Ah en paralelo (2 en serie) se observa que el mismo está por demás asegurado.

De la tabla siguiente se tienen los valores de referencia;

$P_{nom}$ Inversor	$U_{nom}$ Batería	Capacidad de la batería
200 W	12 V	> 100 Ah
500 W	12 V	> 200 Ah
1.000 W	12 V	> 400 Ah
2.000 W	12 V	> 800 Ah
2.000 W	24 V	> 400 Ah
3.500 W	24 V	> 700 Ah
3.500 W	48 V	> 350 Ah
5.000 W	48 V	> 500 Ah
7.000 W	48 V	> 700 Ah

*Tabla Selección de la tensión del sistema.*

*Extraído del catálogo Steca Electrónica Solar, página 27.*

#### 4.6.5 Cálculo de cableado de la instalación

Deberán calcularse en función a:

- Intensidad de corriente admisible,
- Caída de tensión,
- Solicitación térmica.

Para el cálculo en corriente continua de la sección de un cable en función a su caída de tensión se utiliza la siguiente expresión;

$$S = 2 \times \frac{L \times I}{k \times \Delta U} \text{ [mm}^2\text{]}$$



Donde:

L: Longitud de cable en m,

I: Intensidad de corriente en Amper

U: caída de tensión en Volts

K: conductividad del material, siendo para el cobre de  $56\text{m}/\Omega.\text{mm}^2$ .

Ahora bien, para el cálculo de las secciones de conductores entre equipos se debe calcular la I de los mismos en función a sus potencias y tensión de la instalación.

Para el cálculo de la caída de tensión por tramos en un sistema fotovoltaico se consideran los siguientes valores (\*);

- Caída de tensión entre generador y regulador/inversor = 3%.
- Caída de tensión entre regulador y batería = 1%.
- Caída de tensión entre inversor y batería = 1%.
- Caída de tensión entre regulador e inversor = 1%.
- Caída de tensión entre inversor/regulador y equipos = 3%.

Los cables del exterior (los que van del panel al local) deben estar protegidos contra la intemperie.

En las instalaciones de C.C., los rojos (positivos) y negros (negativos) se conducirán por separados, protegidos y señalizados (código de colores, etiquetas, etc.)

a) *Cálculo de la sección del cable que va desde el campo generador hasta el regulador de carga;*

Para el cálculo de la corriente que va del campo generador (conjunto de módulos fotovoltaico) al local en donde se encuentren el regulador, las baterías e inversor, hay que tener en cuenta la corriente máxima que produce dicho campo y que resulta de;

De los datos especificados en el punto 4.6.1 para los paneles empleados se tiene, para un panel de 330W;

(\*). Valores dados en el libro: *Energía solar fotovoltaica, Cálculo de una instalación aislada*, de Miguel Pareja Aparicio.

**Datos eléctricos** (en condiciones estándar de prueba (STC), irradiación de 1000 vatios/m<sup>2</sup> en el espectro AM 1,5 a una temperatura de célula de 25°C)

Tipo	Potencia nominal P <sub>mpp</sub>	Tensión nominal U <sub>mpp</sub>	Corriente nominal I <sub>mpp</sub>	Corriente de cortocircuito I <sub>sc</sub>	Tensión de circuito abierto U <sub>oc</sub>	Coefficiente de rendimiento del módulo
AC-325P/72S	325 Wp	37,66 V	8,63 A	9,15 A	45,92 V	16,75 %
AC-330P/72S	330 Wp	37,82 V	8,73 A	9,28 A	45,97 V	17,01 %
AC-335P/72S	335 Wp	37,98 V	8,83 A	9,30 A	46,45 V	17,26 %

Tabla de características eléctricas del panel fotovoltaico AXITEC.

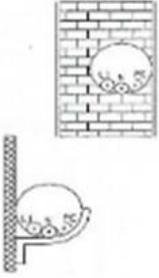
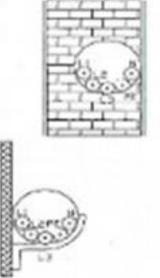
Extraído del catálogo AXITEC, página 2.

Un valor de I máxima o pico de 8,73Amp, de esta manera, la I de campo fotovoltaico resulta;

$$I_{\text{campo fotovoltaico}} = \text{núm. de ramas} \times I_{\text{max.}} = 3 \times 8,73 \text{Amp} = 26,19 \text{Amp.}$$

Ahora se debe consultar o elegir una sección normalizada de cables, que resultan para conductores aislados según normas IRAM NM 247-3 y 62267 de la tabla 771.16.I.

Tabla 771.16.I - Intensidad de corriente admisible [A], para temperatura ambiente de cálculo de 40 °C

Cobre [mm <sup>2</sup> ]	Termoplástico	
	PVC / LS0H IRAM NM 247-3 / IRAM 62267 B52-2 B1	PVC / LS0H IRAM NM 247-3 / IRAM 62267 B52-4 B1
		
	2x	3x
1,5	16	14
2,5	21	18
4	28	25
6	36	32
10	50	44
16	66	59
25	88	77
35	109	95
50	131	117
70	167	149
95	202	180
120	234	208
150	261	228
185	297	258
240	348	301
300	398	343

En la tabla se deben considerar las siguientes referencias:  
 2x = 2 conductores cargados + PE  
 3x = 3 conductores cargados + N + PE (ver nota 3)



De la tabla anterior se observa que el conductor posterior o superior al valor de  $I_{m\acute{a}x}$  calculado es de  $4\text{mm}^2$ , el cual puede transportar una corriente de 28Amper para conductores en PVC y alojados en tubería, donde en la instalación circularía un  $I_{max}$  de solo 26,19Amp.

Ahora si se verifica la sección calculada por caída de tensión, se tiene un porcentaje de caída de tensión de 3% para este caso (desde el generador al regulador), para un voltaje del sistema de 24V y para 4 metros de longitud se tiene:

$$\Delta U = 24V \times 3/100 = 0,72 V$$

$$S = 2 \times \frac{L \times I_{campo}}{k \times \Delta U} = 2 \times \frac{4m \times 26,19Amp.}{56m/\Omega.mm^2 \times 0,72V} = 5,19mm^2$$

De la tabla anterior se observa que el conductor posterior o superior al calculado de  $5,19\text{mm}^2$  es de  $6\text{mm}^2$ , el cual puede soportar una corriente admisible de 36Amper para conductores en PVC y alojados en tubería, donde en la instalación circularía un  $I_{max}$  de solo 26,19Amp.

b) *Cálculo de la sección del cable que va desde el regulador de carga hasta el banco de baterías;*

Siendo la  $I$  reg del equipo seleccionado SOLARIX 2070 (12/24V – IP65 –  $I_{max}$ ; 70A)

De la tabla enunciada se elige una sección del conductor de  $25\text{mm}^2$  soportando una  $I_{m\acute{a}x}$  de 88Amper.

La verificación por caída de tensión; se tiene un porcentaje de caída de tensión de 1% para este caso (del regulador hasta baterías), para un voltaje del sistema de 24V y para 1 metro de longitud se tiene:

$$\Delta U = 24V \times 1/100 = 0,24 V$$

$$S = 2 \times \frac{L \times I}{k \times \Delta U} = 2 \times \frac{1m \times 70Amp.}{56m/\Omega.mm^2 \times 0,24V} = 10,41mm^2$$

Ahora se debe consultar o elegir una sección normalizada de cables, que resultan para conductores aislados según normas IRAM NM 247-3 y 62267 de la tabla 771.16.I.

Resulta de la tabla anterior una sección normalizada posterior de  $16\text{mm}^2$  con una capacidad para transportar una corriente de 68Amp., muy superior a la requerida.



El valor de  $I_{max}$  del regulador adoptado es el que da el fabricante, pero se puede trabajar con la  $I_{max}$  del campo generador (paneles fotovoltaico), siendo el mismo de 26,19Amp. de esta manera de la tabla para corrientes admisibles se podría escoger de  $6\text{mm}^2$ , el cual puede transportar una corriente de 36Amper para conductores en PVC y alojados en tubería.

Ahora para verificar por caída de tensión con la corriente propuesta para 1,5m de longitud de cables se tiene:

$$\Delta U = 24\text{V} \times 1/100 = 0,24 \text{ V}$$

$$S = 2 \times \frac{L \times I}{k \times \Delta U} = 2 \times \frac{1,5\text{m} \times 26,19\text{Amp.}}{56\text{m}/\Omega.\text{mm}^2 \times 0,24\text{V}} = 5,84\text{mm}^2$$

De este valor se adopta una sección de  $6\text{mm}^2$  con una capacidad de conducción de corriente de 36Amp.

c) *Cálculo de la sección del cable que va desde el regulador de carga o banco de baterías hasta el inversor DC/AC;*

La corriente máxima que puede soportar este equipo (el seleccionado) es de:

$$I_{inv.} = \text{Potencia equipo} / 24\text{V} = 1000\text{W} / 24\text{V} = 41,66\text{Amp.}$$

De la tabla enunciada se elige una sección del conductor de  $10\text{mm}^2$ , soportando una  $I_{máx}$  de 50Amper. La verificación por caída de tensión; se tiene un porcentaje de caída de tensión de 1% para este caso (del regulador hasta el inversor), para un voltaje del sistema de 24V y para 1,5 metro de longitud (recomendado), se tiene:

$$\Delta U = 24\text{V} \times 1/100 = 0,24 \text{ V}$$

$$S = 2 \times \frac{L \times I}{k \times \Delta U} = 2 \times \frac{1,5\text{m} \times 41,66\text{Amp.}}{56\text{m}/\Omega.\text{mm}^2 \times 0,24\text{V}} = 9,29\text{mm}^2$$

Ahora se debe consultar o elegir una sección normalizada de cables, que resultan para conductores aislados según normas IRAM NM 247-3 y 62267 de la tabla 771.16.I.

Resulta de la tabla anterior una sección normalizada superior de  $10\text{mm}^2$  con una capacidad para transportar una corriente de 50Amp., muy superior a la requerida.



#### 4.6.6 Cálculo de las protecciones

En lo que respecta a protección como sobre-tensiones o sobrecargas los dispositivos como el regulador o el inversor disponen de circuitería interna que se encarga de realizar esta tarea. Los fusibles utilizados en la parte de corriente continua son los denominados de fusión lenta del tipo gL-gG.

Aun así se calculará el tamaño de fusibles a conectar entre los distintos dispositivos:

- Campo generador (paneles fotovoltaicos) y regulador.
- Regulador y banco de baterías.
- Entre regulador, baterías e inversor.

Para la elección de la corriente asignada del dispositivo de protección  $I_n$  se debe seguir la siguiente regla:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z$$

Donde:

$I_B$ : Corriente del proyecto

$I_n$ : Intensidad asignada o nominal del dispositivo de protección.

$I_Z$ : Intensidad de corriente admisible de los cables.

#### Selección de fusible entre Campo generador y Regulador:

Se emplea el valor de corriente de proyecto el de cortocircuito del campo generador, que es de 9,28Amp por modulo, para tres ramas en paralelo:

$$I_{cc-total} = 3 \times 9,28Amp = 27,84Amp.$$

Se empleará fusibles ABB para corriente continua de calibre 30Amp, características técnicas:

Principales especificaciones técnicas		E 9F PV
Normas de referencia		IEC 60947-3, UL 4248-1, UL 4248-18
Tensión nominal	V	1000 CC
Intensidad nominal	A	1...30
Poder de corte	kA	50
Poder mínimo de corte		de 1 A a 7 A = 1,3 x $I_n$ de 8 A a 30 A = 2,0 x $I_n$
Dimensiones	mm	10,3 x 38
Peso	g	7

*Tabla de especificaciones técnicas de fusibles ABB,*

*Extraído del catálogo ABB-soluciones para energía solar, página 30.*



Resultando:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z, \text{ entonces: } 27,84A \leq 30A \leq 36A$$

Entre regulador y banco de baterías:

Se emplea el valor de corriente del campo generador, que es de 8,73Amp por modulo, para tres ramas en paralelo:

$$I_{\text{total}} = 3 \times 8,73Amp = 26,19Amp.$$

Se empleará fusibles ABB para corriente continua de calibre 30Amp, características técnicas:

Principales especificaciones técnicas		E 9F PV
Normas de referencia		IEC 60947-3, UL 4248-1, UL 4248-18
Tensión nominal	V	1000 CC
Intensidad nominal	A	1...30
Poder de corte	kA	50
Poder mínimo de corte		de 1 A a 7 A = 1,3 x I <sub>n</sub> de 8 A a 30 A = 2,0 x I <sub>n</sub>
Dimensiones	mm	10,3 x 38
Peso	g	7

*Tabla de especificaciones técnicas de fusibles ABB,  
Extraído del catálogo ABB-soluciones para energía solar, página 30.*

Resultando:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z, \text{ entonces: } 26,19A \leq 30A \leq 36A$$

Entre regulador, baterías e inversor:

En este caso se considera que para potencias de inversores hasta 500W los mismos se conectan a los terminales de consumo o carga del regulador (si lo dispone) y para potencias elevadas se conectan directamente a la batería.

Disponen de diversas protecciones; sobrecarga o sobredescarga de la batería, posibles cortocircuitos a la entrada o la detección de ausencia de consumo (quedándose en modo reposo con un consumo mínimo de 1,5W, estado stand-by).

Se empleará como valor de diseño  $I_B$ ;

$$I_B = \frac{\text{Potencia Inversor}}{\text{V banco batería}} = \frac{1000\text{W}}{24\text{V}} = 41,66\text{A}$$

Donde

De esta manera se seleccionará fusibles ABB para corriente continua de calibre 50Amp, características técnicas del porta fusible:

Tipo	Para fusible. Tamaño	Intens.máx. $I_n = A$	Polos
E931/20	Tamaño (8,5x31,5)	20	1
E931N/20	500 V AC/DC		1+N
E932/20			2
E933/20			3
E933N/20			3+N
E931N/32	Tamaño (10,3x38)	32	1+N
E933/32	500 V AC/DC		3
E933N/32			3+N
E931/32	Tamaño (10,3x38)	32	1
E932/32	500 V AC - 1000 V DC		2
E931/50	Tamaño (14x51)	50	1
E931N/50	690 V AC/DC		1+N
E932/50			2
E933/50			3
E933N/50			3+N

*Tabla de especificaciones técnicas de porta fusibles ABB,  
Extraído del catálogo ABB-soluciones para energía solar, página 32.*

Resultando:

$$I_B \leq I_n \leq I_z,$$

Entonces:

$$41,66\text{A} \leq 50\text{A} = 50\text{A} \text{ (conductor Sec.} = 10\text{mm}^2\text{)}$$

De esta manera se llevará la sección del cable a  $16\text{mm}^2$ , el cual tiene una  $I_{adm}$  de 68Amper;

$$41,66\text{A} \leq 50\text{A} \leq 68\text{A} \text{ (conductor Sec.} = 16\text{mm}^2\text{)}$$

Verificación por caída de tensión;

$$\Delta U = 2 \times \frac{L}{k \times S} \times I = 2 \times \frac{1,5\text{m}}{56\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2 \times 16\text{mm}^2} \times 41,66\text{Amp.} = 0,139\text{V} \leq 0,24\text{V} \approx 1\%$$

Diseño de la protección aguas abajo del inversor:

Como potencia de alimentación en CA (230V) se tomará la que resulta de un 65% de la potencia del inversor (ver inciso 4.6.4), ya que este fue seleccionado primeramente, entonces se tiene;

$$P_{inv} = 1,35 \cdot P_{AC} \Rightarrow P_{AC} = P_{inv} / 1,35 = 1000W / 1,35 = 740W$$

La selección del conductor o cable en CA resulta de:

$$S = \frac{2 \times L \times P_{AC}}{k \times \Delta V \times V} = \frac{2 \times 15m \times 740W}{56m/\Omega \cdot mm^2 \times 4,6V \times 230V} = 0,375mm^2 \leq 0,24V \approx 1\%$$

Siendo:

$$\Delta V = 2\% \approx 4,6V$$

$$L = 15m$$

Aunque por resultado se pudiera elegir una sección del conductor de  $1,5mm^2$  se debe emplear como mínimo de  $2,5mm^2$  (circuitos terminales para tomas corrientes de usos generales), el cual posee de valor de  $I_{adm} = 21Amp$ , siendo la  $I_b$  de diseño, para un  $\cos\Theta = 1$ , de  $3,21Amp$ .

Para la elección del dispositivo de protección del lado de CA (aguas abajo del Inv.)

$$I_B \leq I_n \leq I_Z,$$

Se ha seleccionado un Pequeño Interruptor Automático de  $I_n = 10Amp.$ , resulta:

$$3,21Amp. \leq 10Amp \leq 21Amp.$$

Verificación de la actuación de la protección elegida contra sobrecarga, según norma IEC 60898:

$$I_2 \leq 1,45 \times I_z \text{ para } I_n \leq 63Amp. \text{ (Tiempo convencional 1hora)}$$

$$1,45 \times 21Amp = 30,45Amp \text{ (corriente de disparo seguro)}$$

### S 200

S 200 es una nueva serie mejorada de mini interruptores automáticos.

Las principales características de los MCB S 200 son:

- Disponible con toda las curvas de disparo B, C, D, K y Z.
- Terminal para cable de hasta 35 mm<sup>2</sup> con tapa protectora para evitar el contacto accidental con las partes en tensión.
- Resistente a altas temperaturas e impactos gracias a un nuevo tipo de material termoplástico
- Serigrafía láser indeleble
- Marcas múltiples de certificación visibles en la parte superior e inferior de los interruptores automáticos S200.

Principales especificaciones técnicas		S 200
Norma de referencia		IEC 60898, IEC/EN 60947-2, UL 489, UL 1077
Corriente nominal (In)	A	0,5 ... 63
Capacidad disruptiva (Icu)	kA	6 (S200), 10 (S200M), 15 (S200P), 25 (S200P)
Tensión nominal (Ue)	V CA	1P: 12 ... 230 / 2P ... 4P: 12 ... 400
Temperatura de funcionamiento	C	-25 ... +55

*Tabla de especificaciones técnicas de fusibles ABB,*

*Extraído del catálogo ABB-soluciones para energía solar, página 61.*



### 5. Estimación de energía eléctrica que se podría generar para el sistema de paneles fijo a 29° hacia el Norte en la ciudad de Reconquista.

La energía generada en corriente alterna durante un cierto período de tiempo por una central fotovoltaica viene dada por:

$$E_{AC}[kWh] = P_{STD}[W] \times \frac{G_H[kWh/m^2/dia] \times k}{1000[W/m^2]} \times PR[\ ] \times t[dias]$$

Donde:

$P_{STD}$ : potencia instalada del generador fotovoltaico bajo condiciones estándar,

$G_H$ : es la radiación global promedio diaria en el plano horizontal,

$k$ : es el factor de corrección para transformar la irradiación del plano horizontal al plano del panel que se encuentra a 29°.

$PR$ : es un factor de eficiencia adimensional que incluye valores fijos y variables,

$t$ : es el período de tiempo sobre el cual se calcula la energía entregada.

La siguiente tabla resume los valores de radiación global en el plano horizontal obtenidos a partir de las mediciones de la Red Solarimétrica por medio del “Programa de Generación de Energías Renovables de la Provincia de Santa Fe.

	TOSTADO	RECONQUISTA	ELISA	CAÑADA ROSQUÍN	FIRMAT
Enero	7.11	6.79	7.18	6.76	6.99
Febrero	5.04	5.3	6.03	5.76	5.62
Marzo	5.03	5.19	5.29	5.18	4.72
Abril	3.69	4.44	3.68	3.33	2.91
Mayo	2.87	3.14	2.73	2.57	2.1
Junio	2.81	2.71	2.67	2.51	2.42
Julio	2.92	3.1	2.72	2.27	2.15
Agosto	3.89	3.49	3.8	3.53	3.12
Septiembre	4.67	4.64	4.85	4.45	4.45
Octubre	5.32	4.51	5.47	5.2	5.47
Noviembre	6.86	6.58	7.15	6.64	6.68
Diciembre	6.8	6.36	7.07	6.98	7.14
Promedio Anual	4.75	4.69	4.89	4.60	4.48

Tabla 8: Radiación medida en las distintas localidades de la Red Solarimétrica.

Los valores están dados en kWh/m<sup>2</sup>/día (hora solar pico).



El factor de corrección  $k$  se encuentra tabulado para cada latitud, cada mes del año y cada ángulo de inclinación de los paneles fotovoltaicos. El factor de eficiencia  $PR$ , contiene valores fijos en el tiempo que están relacionados con el buen arte de instalación y la calidad de los equipamientos intermedios, y por otro lado tiene componentes que dependerán del emplazamiento, fundamentalmente de la temperatura del lugar.

De esta manera se tendrá afectado el coeficiente de rendimiento global de la instalación fotovoltaica por el efecto de temperatura, dado por;

$$T_P [^{\circ}C] = T_A [^{\circ}C] + \frac{G_P [W/m^2]}{800 [W/m^2]} (T_{ONC} [^{\circ}C] - 20^{\circ}C)$$

Donde;

$T_P$ : es la temperatura en  $^{\circ}C$  que alcanza la superficie del panel,

$T_A$ : temperatura ambiente, se tomará la promedio anual =  $25^{\circ}C$

$G_P$ : Irradiancia en el plano del panel, y

$T_{ONC}$ : Temperatura de operación nominal de la celda, la provee el fabricante y para nuestro caso será de  $45^{\circ}C$ .

De esta manera se tiene;

$$T_P = 25^{\circ}C + \frac{4,7W/m^2}{800W/m^2} \times (45^{\circ}C - 20^{\circ}C) = 25,14^{\circ}C$$

Ahora pasaremos a obtener el factor de rendimiento total de la instalación, que resulta del obtenido en el inciso 4.6.1 para un  $K_t = 0,678$ .

$$PR = K_t \times [1 - 0,0043 \times (T_p - 25^{\circ}C)]$$

De esta manera;

$$PR = 0,678 \times [1 - 0,0043 \times (25,14^{\circ}C - 25^{\circ}C)] = \mathbf{0,677}$$



Donde el valor de  $0,0043$  representa el 0,43% de pérdida en los paneles fotovoltaicos poli-cristalinos por cada grado centígrado por arriba del valor de  $25^{\circ}\text{C}$ .

Valores del factor  $k$  para la ciudad de Reconquista a  $29,1^{\circ}$  de Latitud y un ángulo óptimo de inclinación fija para el panel durante todo el año de  $26,2^{\circ}$ , según sugerencia de la NASA.

Mes	Factor: $k$
Enero	0,916
Febrero	0,952
Marzo	1,115
Abril	1,191
Mayo	1,282
Junio	1,286
Julio	1,262
Agosto	1,199
Septiembre	1,085
Octubre	1,053
Noviembre	0,938
Diciembre	0,910

De esta manera se puede calcular la energía generada por la instalación fija a un ángulo de inclinación de  $29^{\circ}$ , donde la misma consta de 3 paneles de 330W c/u, sumando un total de potencia instalada de 990Wp o 0,99kWp.

$$E_{AC} [\text{kWh}] = P_{ins} \times G_H / 1000\text{W/m}^2 \times k \times PR \times t (\text{días})$$

Donde:

$$P_{ins} = 990\text{W}$$

$G_H$  = Radiación global promedio diaria en el plano horizontal, por cada mes [ $\text{kWh/m}^2/\text{día}$ ].

$$PR = 0,677$$

$t$  = días totales de cada mes

Tabla de valores de energía generada por cada mes;

Mes	E <sub>AC</sub> [kWh]
Enero	125,08
Febrero	101,46
Marzo	116,37
Abril	106,34
Mayo	80,95
Junio	70,08
Julio	78,67
Agosto	84,15
Septiembre	101,24
Octubre	95,50
Noviembre	124,12
Diciembre	116,38
<b>Total Anual</b>	<b>1200kWh</b>

### 5.1 Energía consumida por el motor

Para un motor de 25W y n= 4RPM, siendo el tiempo de funcionamiento diario de 0,208hs.

$$\text{Energía x día} = \text{Potencia} \times \eta \times \text{tiempo} = 25\text{W} \times 0,9 \times 0,208\text{hs/día} = 4,68\text{Wh/día}$$

$$\text{Energía consumida por mes} = 4,68\text{Wh/día} \times 30 \text{ días} = 140\text{Wh/mes} = \mathbf{0,14kWh/mes}$$

$$\text{Energía consumida por año} = 0,14\text{kWh/mes} \times 12 \text{ meses} = \mathbf{1,68 kWh/año}$$

De esta manera se concluye que el motor absorberá para una energía generada por el sistema móvil (se considera solo el doble de lo generada por la instalación fija = 2.400kWh) de;

$$2.400\text{kWh} \text{ -----} 100\%$$

$$1,68\text{kWh} \text{ -----} \mathbf{0,07\%}$$

## 6 Porcentaje de captación de radiación solar

### 6.1 Geometría Solar

Definición de variables de la geometría solar:

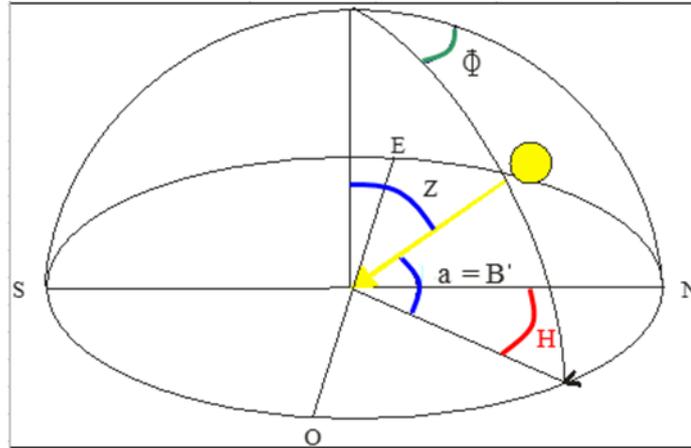


Figura 15; Variables de geometría solar sobre un punto de referencia.

Descripción de Variables:

- a: ángulo Altitud Solar
- z: Angulo Cenital
- H: Angulo horario
- $\Phi$ : Angulo Acimutal

Descripción del ángulo de Declinación ( $\delta$ ):

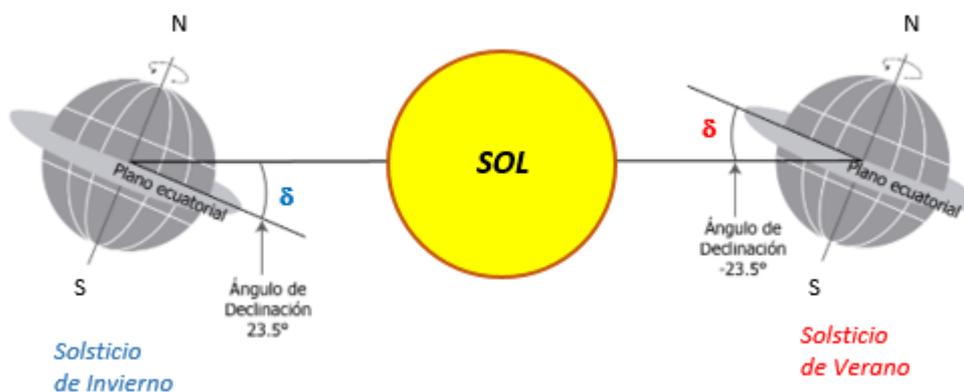


Figura 16; Declinación Solar para el Hemisferio Sur.

<https://www.launion.com.mx/blogs/ciencia/noticias/134851-de-este-a-oeste-de-norte-a-sur-en-donde-aparece-el-sol.html>

Este ángulo varía con la estación del año donde se caracteriza por la posición del planeta en su órbita, se forma entre la línea tierra-sol y el plano ecuatorial, siendo positivo al norte y



negativo al sur (hemisferios), adoptando para el hemisferio Sur los siguientes valores según los días de equinoccios de otoño y primavera, y los días de solsticios de Verano y de invierno;

- ✓ 21 de Marzo, otoño (día 80 en el año) = 0°
- ✓ 21 de Junio, invierno (día 172 en el año) = 23,45°
- ✓ 21 de Septiembre, primavera (día 264 en el año) = 0°
- ✓ 21 de Diciembre, verano (día 355 en el año) = -23,45°

Estos valores de declinación representados así como también para calcular este ángulo en cualquier día del año surgen de la siguiente expresión:

$$\delta = 0,398 \times \cos [0,986 \times (N - 173)] \quad (1)$$

Donde:

N: número del día en el año

Cálculo de la Altitud Solar (a):

Es este ángulo lo forma el plano del observador y la radiación solar o “altura” del sol.

$$\text{sen } a = \cos \delta \times \cos H \times \cos L + \text{sen } \delta \times \text{sen } L \quad (2)$$

Donde:

L: Latitud del lugar de estudio, para Reconquista = 29°

De esta manera para los días mencionados en el punto 2 (días de referencia o inicio de cada estación) de donde se obtienen los distintos valores de la declinación mediante la ecuación (1) y aplicando la ecuación (2) para los horarios de las 6hs hasta las 18hs, se obtienen los distintos valores de la altitud solar;

		Altitud Solar													
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario													
		(-)90	(-)75º	(-)60º	(-)45º	(-)30º	(-)15º	0º	15º	30º	45º	60º	75º	90º	
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs	
172	Invierno	-11,12	0,845	12,02	21,99	30,13	35,6	37,55	35,6	30,13	21,99	12,02	0,845	-11,12	
264	Primavera	-0,053	13,02	25,87	38,13	49,15	57,55	60,89	57,55	49,15	38,13	25,87	13,02	-0,053	
355	Verano	11,125	23,61	36,45	49,49	62,6	75,46	84,45	75,46	62,6	49,49	36,45	23,61	11,13	
80	Otoño	0,328	13,41	26,29	38,61	49,73	58,26	61,67	58,26	49,73	38,61	26,29	13,41	0,328	

Tabla 9; Valores de Altitud Solar para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista.

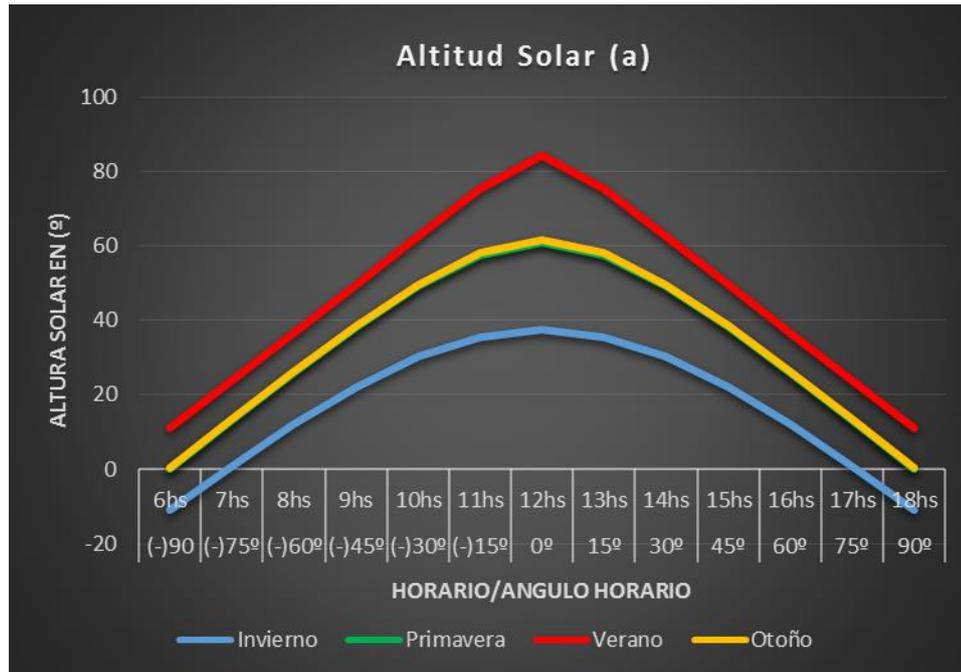


Gráfico 9; Valores de Altitud Solar para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista.

Cálculo del ángulo acimutal (Φ):

El ángulo acimutal (Φ), bajo la premisa de suponer fija la tierra, es la distancia angular entre el Norte y la proyección horizontal, sobre el plano del observador, de la radiación solar (se observa en el *grafico 1*).

$$\text{sen } \Phi = (\cos \delta \times \text{sen } H) / \cos a \quad (3)$$

De esta manera para los días mencionados en el punto 2 (días de referencia o inicio de cada estación) de donde se obtienen los distintos valores de la declinación mediante la ecuación (1) y junto a los valores de la altitud solar (a) resultantes de aplicar la ecuación (2) y aplicando la ecuación (3) para los horarios de las 6hs hasta las 18hs, se obtienen los distintos valores del ángulo acimutal;

		Ángulo Acimutal													
		Ángulo horario/Horario													
Día en el año	Estación	(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90	
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs	
172	Invierno	-69,22	-62,41	-54,32	-44,39	-32,03	-16,97	0	16,97	32,03	44,39	54,32	62,41	69,22	
264	Primavera	-89,9	-82,5	-74,26	-64,02	-49,86	-28,84	0	28,84	49,86	64,02	74,26	82,5	89,9	
355	Verano	-69,22	-75,27	-81	-87,03	-85,37	-71,05	0	71,05	85,37	87,03	81	72,27	69,22	
80	Otoño	-89,4	-83,2	-74,99	-64,81	-50,68	-29,47	0	29,47	50,68	64,81	74,99	83,2	89,4	

Tabla 10; Valores de Ángulo Acimutal para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista.

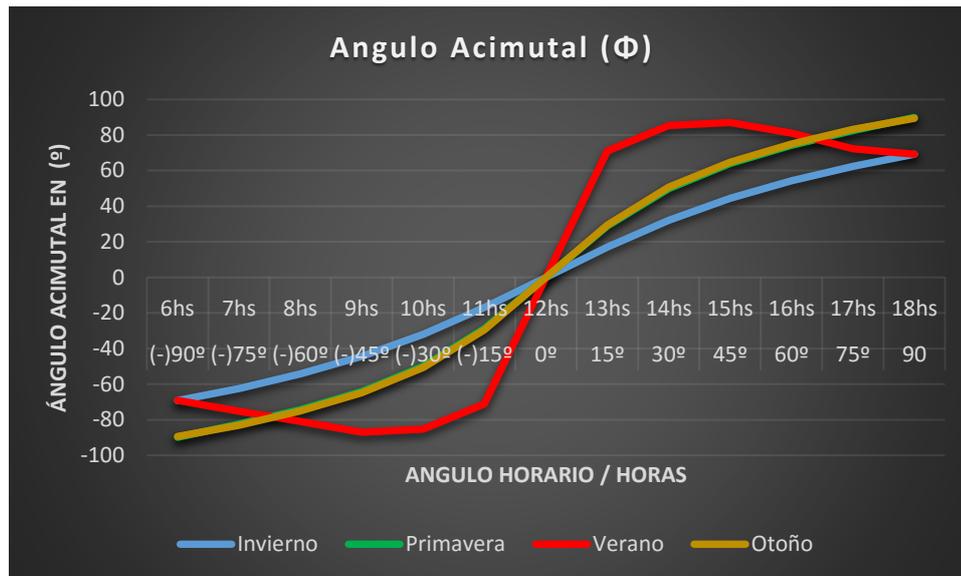


Gráfico 10; Valores de Ángulo Acimutal para cada día de referencia por estación y Ángulo horario para la ciudad de Reconquista.

## 6.2 Cálculo de incidencia de radiación solar sobre una superficie

Instalación de superficie (panel fotovoltaico) fija al Norte con un ángulo de inclinación del panel de 29°, igual al valor de la latitud de la Ciudad en estudio;



Figura 17; Variables en la incidencia de radiación solar sobre un panel. <http://panelessolarespr.com/solar101.html> (modificada por el autor).

Donde:

$\Theta_2$ : Ángulo de los rayos solares respecto a la normal del plano del panel.

$\Psi$ : Ángulo acimutal de la superficie respecto a la orientación del panel respecto al Norte.

$\beta$ : Ángulo de inclinación del panel respecto al plano del suelo de referencia.

$$\cos \Theta_2 = \cos \beta \times \cos z + \sin \beta \times \sin z \times \cos (\Phi - \Psi) \quad (4)$$

Además z (ángulo Cenital) resulta de:

$$\cos z = \cos \delta \times \cos L \times \cos H + \sin \delta \times \sin L \quad (5)$$

De esta manera se tienen valores de z; para una valor de L = 29° para valores de la declinación δ para cada día de referencia de cada estación y para cada hora (de 6hs a 18hs) de dichos días se obtienen los valores del ángulo cenital (z).

Luego para un valor de β fijo igual a 29° del panel y orientado al Norte con un valor para ello de Ψ = 0 e ingresando valores de Φ para cada hora obtenidos según la ecuación (3) se obtienen los distintos valores del ángulo de incidencia solar Θ2 sobre la superficie del panel:

Angulo con la normal a una superficie Fija a 29° (Θ2)														
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario												
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	75°
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	17hs
172	Invierno	72,12	60,15	48,97	39,01	30,87	25,4	23,45	25,4	30,87	39,01	48,97	60,15	71,12
264	Primavera	61,05	47,97	35,13	22,86	11,84	3,446	0,109	3,446	11,84	22,86	35,13	47,97	61,05
355	Verano	49,87	37,83	24,55	11,51	-1,6	-14,46	-23,45	-14,46	-1,6	11,51	24,55	37,83	49,87
80	Otoño	60,67	47,58	34,71	22,38	11,26	2,736	-0,676	2,736	11,26	22,38	34,71	47,58	60,67

Tabla 11; Valores de Ángulos de incidencia solar sobre la superficie del panel para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista.

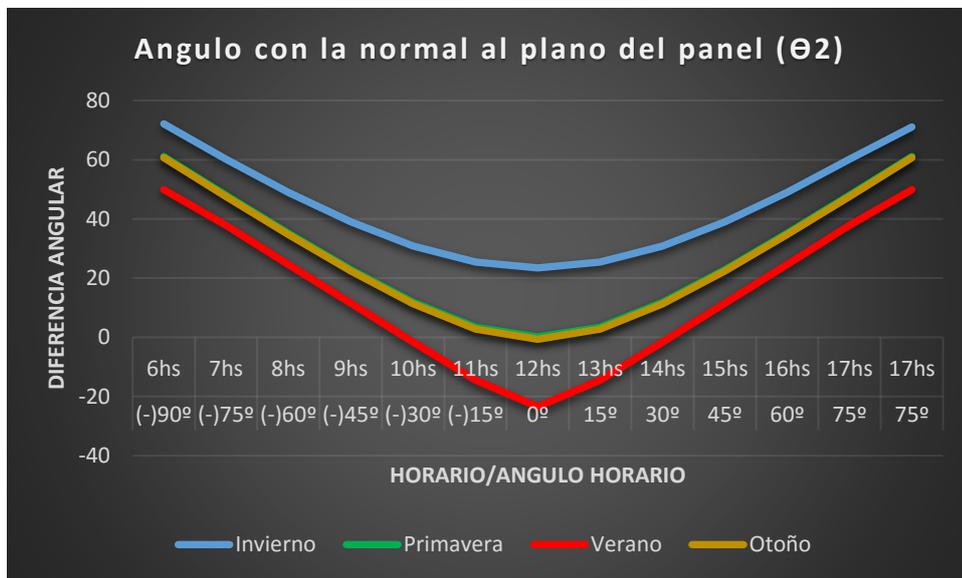


Gráfico 11; Valores de Ángulos de incidencia solar sobre la superficie del panel para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista.

El método empleado para calcular el porcentaje de incidencia de radiación solar sobre una superficie se determinó mediante coeficientes, tanto para el ángulo acimutal (posición del



sol) como para el ángulo de incidencia solar, que resultan de un porcentaje según la expresión siguiente:

a) Coeficiente acimutal

$$\text{Coeficiente acimutal} = 1 - \text{ángulo acimutal (tabla 2)} / 90 \quad (6)$$

Estos coeficientes resultan de aplicar la ecuación (6) a cada día de referencia de estación y para cada ángulo horario, resultando los valores mostrados en la tabla siguiente.

Coef. de captación con el ángulo Azimutal para Superficie Fija a 29°														
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario												
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs
172	Invierno	0,23	0,31	0,40	0,51	0,64	0,81	1,00	0,81	0,64	0,51	0,40	0,31	0,23
264	Primavera	0,00	0,08	0,17	0,29	0,45	0,68	1,00	0,68	0,45	0,29	0,17	0,08	0,00
355	Verano	0,23	0,16	0,10	0,03	0,05	0,21	1,00	0,21	0,05	0,03	0,10	0,20	0,23
80	Otoño	0,01	0,08	0,17	0,28	0,44	0,67	1,00	0,67	0,44	0,28	0,17	0,08	0,01

Tabla 12; Valores de Coeficientes de ángulos acimutales sobre la superficie del panel para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista.

b) Coeficiente de incidencia solar;

$$\text{Coef. de incidencia} = 1 - \text{ángulo de incidencia (tabla 3)} / 90 \quad (7)$$

Estos coeficientes resultan de aplicar la ecuación (7) a cada día de referencia de estación y para cada ángulo horario, resultando los valores mostrados en la tabla siguiente.

Coef. de captación respecto a la Normal para una superficie Fija a 29°														
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario												
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs
172	Invierno	0,20	0,33	0,46	0,57	0,66	0,72	0,74	0,72	0,66	0,57	0,46	0,33	0,21
264	Primavera	0,32	0,47	0,61	0,75	0,87	0,96	1,00	0,96	0,87	0,75	0,61	0,47	0,32
355	Verano	0,45	0,58	0,73	0,87	0,98	0,84	0,74	0,84	0,98	0,87	0,73	0,58	0,45
80	Otoño	0,33	0,47	0,61	0,75	0,87	0,97	0,99	0,97	0,87	0,75	0,61	0,47	0,33

Tabla 13; Valores de coeficientes de ángulos de incidencia solar sobre la superficie del panel para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista.



Instalación de superficie (panel fotovoltaico) con un ángulo de inclinación del panel fijo de 29° y con un eje móvil vertical.

Para este caso se tiene en cuenta que esta instalación tiene un movimiento automático de Este-Oeste de seguimiento al sol, de manera tal que no se tiene valores del ángulo acimutal ( $\Phi$ ) respecto a una superficie fija como en el caso anterior, por lo tanto el coeficiente a adoptar es “1”.

Solo se determina el ángulo de incidencia solar sobre el panel que se encuentra con una inclinación ( $\beta$ ) de 29° fijo, pero adoptando distintos valores de ángulos acimutales de superficie ( $\Psi$ ), que para el mismo se adoptó, para cada ángulo horario, el mismo valor del ángulo acimutal ( $\Phi$ ) del movimiento del sol. Con esta premisa al aplicar la ecuación (4) resultan los valores de la tabla siguiente.

Angulo con la normal a una superficie Fija a 29° ( $\Theta_2$ ) para distintos ang. $\Psi$ de la sup.														
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario												
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs
172	Invierno	72,12	60,15	48,97	39,01	30,87	25,4	23,45	25,4	30,87	39,01	48,97	60,15	71,12
264	Primavera	61,05	47,97	35,13	22,86	11,84	3,446	0,109	3,446	11,84	22,86	35,13	47,97	61,05
355	Verano	49,87	37,83	24,55	11,51	-1,6	-14,46	-23,45	-14,46	-1,6	11,51	24,55	37,83	49,87
80	Otoño	60,67	47,58	34,71	22,38	11,26	2,736	-0,676	2,736	11,26	22,38	34,71	47,58	60,67

Tabla 14; Valores de coeficientes de ángulos de incidencia solar sobre la superficie del panel a 29° para cada día de referencia por estación y ángulo horario para la ciudad de Reconquista para una instalación de un eje móvil vertical.

De estos valores y aplicando la ecuación (7), se tienen los siguientes coeficientes de captación de incidencia solar sobre la superficie.

Coef. de captación respecto a la Normal para una superficie Fija a 29° ( $\Phi_2$ ), para distintos ang. $\Psi$ de la sup.														
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario												
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs
172	Invierno	0,20	0,33	0,46	0,57	0,66	0,72	0,74	0,72	0,66	0,57	0,46	0,33	0,21
264	Primavera	0,32	0,47	0,61	0,75	0,87	0,96	1,00	0,96	0,87	0,75	0,61	0,47	0,32
355	Verano	0,45	0,58	0,73	0,87	0,98	0,84	0,74	0,84	0,98	0,87	0,73	0,58	0,45
80	Otoño	0,33	0,47	0,61	0,75	0,87	0,97	0,99	0,97	0,87	0,75	0,61	0,47	0,33

Tabla 15; Valores de coeficientes de ángulos de incidencia solar para la instalación móvil a un eje vertical.

Instalación de superficie (panel fotovoltaico) a dos ejes con una fuerza motriz.

Para este caso primero se halló para cada ángulo horario y según la posición que iba adoptando el panel que le otorgaba el mecanismo engranaje-brazo pivote al panel, el ángulo de inclinación ( $\beta$ ):

Angulo de inclinación del Panel vs ángulo horario													
	(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
	6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs
$\beta$	75,20	73,40	67,40	55,40	41,80	32,30	29,00	32,30	41,80	55,40	67,40	73,40	75,20

Tabla 16; Valores de ángulo de inclinación del panel ( $\beta$ ) para cada ángulo horario.

Al igual que en el caso anterior o el tipo de instalación a un eje vertical móvil, se adoptó como ángulo acimutal de la superficie ( $\Psi$ ) el mismo valor que el ángulo acimutal ( $\Phi$ ) de la posición del sol para cada hora, por lo tanto el coeficiente para este ángulo de captación será igual a 1. De esta manera al aplicar la ecuación (4) para los distintos valores de ángulo de inclinación de la superficie ( $\beta$ ) y para cada hora para los cuatros días de referencia se tienen los siguientes resultados de  $\Theta_2$ .

Angulo con la normal a la superficie														
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario												
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs
172	Invierno	25,92	15,75	10,57	12,61	18,07	22,1	23,45	22,1	18,07	12,61	10,57	15,75	25,92
264	Primavera	14,85	3,57	-3,274	-3,53	-0,958	0,146	0,109	0,146	-0,958	-3,53	-3,27	3,57	14,85
355	Verano	3,67	-7,017	-13,85	-14,89	-14,4	-17,76	-23,45	-17,76	-14,4	-14,89	-13,85	-7,017	3,67
80	Otoño	14,47	3,18	-3,69	-4,018	-1,539	-0,564	-0,676	-0,564	-1,539	-4,018	-3,69	3,18	14,47

Tabla 17; Valores de ángulos de incidencia solar para la instalación móvil a dos ejes con una fuerza motriz.

De estos valores y aplicando la ecuación (7), se tienen los siguientes coeficientes de captación de incidencia solar sobre la superficie.

Coeficiente de captación respecto a la Normal														
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario												
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs
172	Invierno	0,71	0,83	0,88	0,86	0,80	0,75	0,74	0,75	0,80	0,86	0,88	0,83	0,71
264	Primavera	0,84	0,96	0,96	0,96	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	0,96	0,96	0,84
355	Verano	0,96	0,92	0,85	0,83	0,84	0,80	0,74	0,80	0,84	0,83	0,85	0,92	0,96
80	Otoño	0,84	0,96	0,96	0,96	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,96	0,96	0,96	0,84

Tabla 18; Valores de coeficientes de ángulos de incidencia solar para la instalación móvil a dos ejes con una fuerza motriz.

### 6.3 Estudio de rendimientos de captación entre los tres tipos de instalaciones

Los valores de rendimiento para las tres instalaciones resultan de multiplicar;

a) Instalación fija con panel inclinado a 29° Norte;

$$\% = \text{Coef. acimutal} \times \text{Coef. de incidencia} \times 100\% \text{ (para cada día y hora)}$$

Rendimiento de captación para una superficie Fija a 29°																
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario														Promedios
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°		
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs		
172	Invierno	4,59	10,17	18,07	28,71	42,32	58,24	73,94	58,24	42,32	28,71	18,07	10,17	4,84	30,65	
264	Primavera	0,04	3,89	10,66	21,53	38,73	65,35	99,88	65,35	38,73	21,53	10,66	3,89	0,04	29,25	
355	Verano	10,30	9,49	7,27	2,88	5,05	17,67	73,94	17,67	5,05	2,88	7,27	11,42	10,30	13,94	
80	Otoño	0,22	3,56	10,25	21,03	38,22	65,21	99,25	65,21	38,22	21,03	10,25	3,56	0,22	28,94	
<b>Promedio Anual</b>		<b>3,78</b>	<b>6,78</b>	<b>11,56</b>	<b>18,54</b>	<b>31,08</b>	<b>51,62</b>	<b>86,75</b>	<b>51,62</b>	<b>31,08</b>	<b>18,54</b>	<b>11,56</b>	<b>7,26</b>	<b>3,85</b>	<b>25,69</b>	

Tabla 19; Valores de Rendimiento de captación para una superficie fija inclinada 29° al Norte

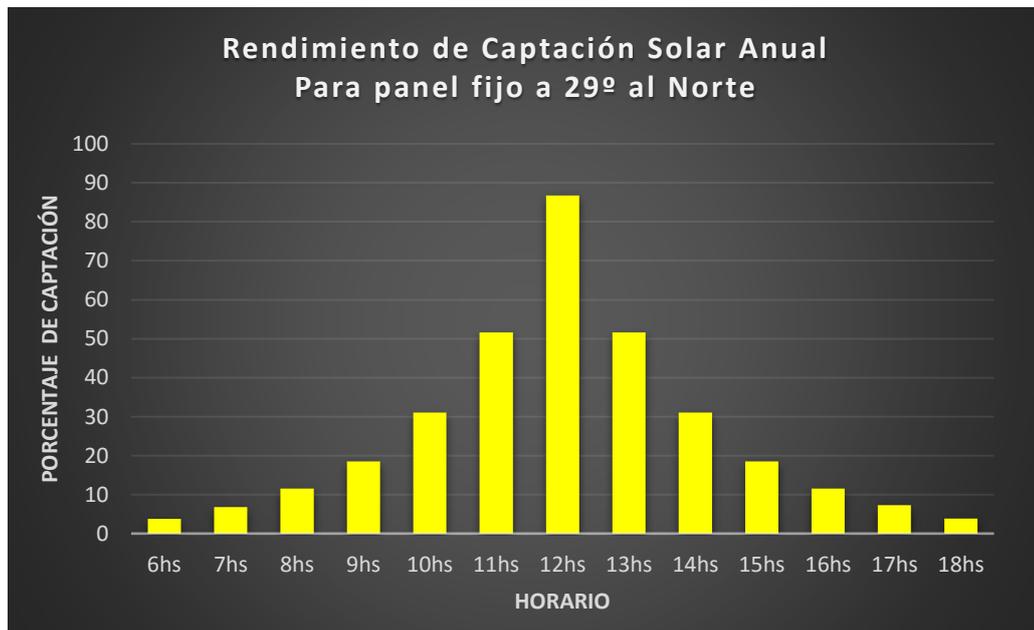


Gráfico 12; Valores de Rendimiento de captación para una superficie fija inclinada 29° al Norte.

b) Instalación móvil a un eje vertical y con panel inclinado a 29°;

$$\% = 1 \times \text{Coef. de incidencia} \times 100\% \text{ (para cada día y hora)}$$

Rendimiento de captación para un eje móvil (vertical) con una superficie Fija a 29°																
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario														Promedios
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°		
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs		
172	Invierno	19,87	33,17	45,59	56,66	65,70	71,78	73,94	71,78	65,70	56,66	45,59	33,17	20,98	50,81	
264	Primavera	32,17	46,70	60,97	74,60	86,84	96,17	99,88	96,17	86,84	74,60	60,97	46,70	32,17	68,83	
355	Verano	44,59	57,97	72,72	87,21	98,22	83,93	73,94	83,93	98,22	87,21	72,72	57,97	44,59	74,09	
80	Otoño	32,59	47,13	61,43	75,13	87,49	96,96	99,25	96,96	87,49	75,13	61,43	47,13	32,59	69,29	
	Promedios	32,30	46,24	60,18	73,40	84,56	87,21	86,75	87,21	84,56	73,40	60,18	46,24	32,58	65,76	

Tabla 19, Valores de Rendimiento de captación para una instalación a un eje móvil vertical con un panel inclinado 29°.

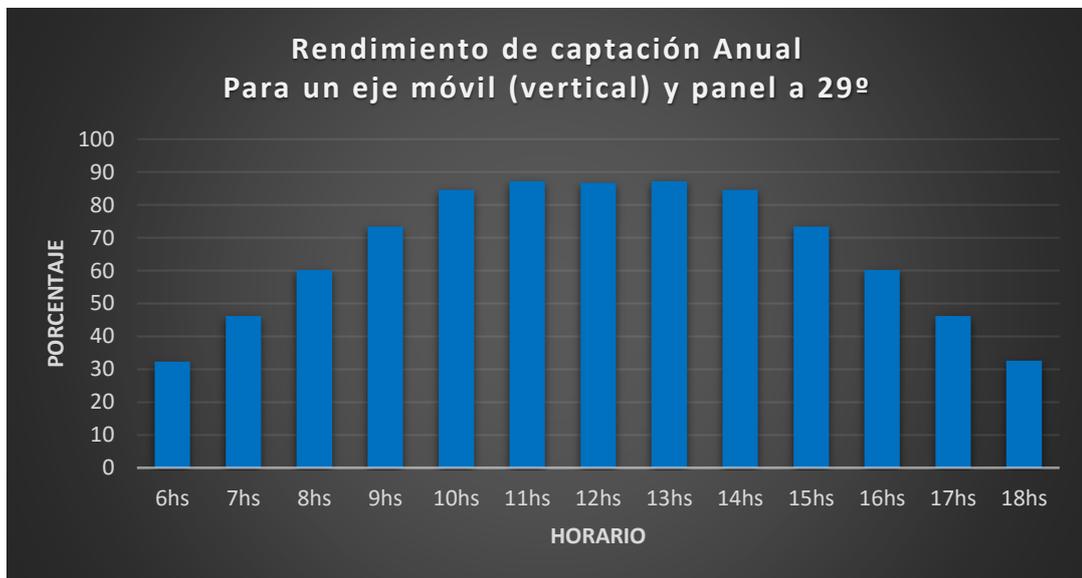


Gráfico 13; Valores de Rendimiento de captación para una instalación a un eje móvil vertical con un panel inclinado 29°.

c) Instalación a dos ejes móviles con una fuerza motriz:

$$\% = 1 \times \text{Coef. de incidencia} \times 100\% \text{ (para cada día y hora)}$$

Rendimiento de captación																
Día en el año	Estación	Angulo horario/Horario														Promedios
		(-)90°	(-)75°	(-)60°	(-)45°	(-)30°	(-)15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°		
		6hs	7hs	8hs	9hs	10hs	11hs	12hs	13hs	14hs	15hs	16hs	17hs	18hs		
172	Invierno	71,20	82,50	88,26	85,99	79,92	75,44	73,94	75,44	79,92	85,99	88,26	82,50	71,20	80,78	
264	Primavera	83,50	96,03	96,36	96,08	98,94	99,84	99,88	99,84	98,94	96,08	96,37	96,03	83,50	96,49	
355	Verano	95,92	92,20	84,61	83,46	84,00	80,27	73,94	80,27	84,00	83,46	84,61	92,20	95,92	84,91	
80	Otoño	83,92	96,47	95,90	95,54	98,29	99,37	99,25	99,37	98,29	95,54	95,90	96,47	83,92	96,19	
	Promedio	83,64	91,80	91,28	90,26	90,29	88,73	86,75	88,73	90,29	90,26	91,28	91,80	83,64	89,14	

Tabla 20; Valores de Rendimiento de captación para una instalación a dos eje móviles con una fuerza motriz.

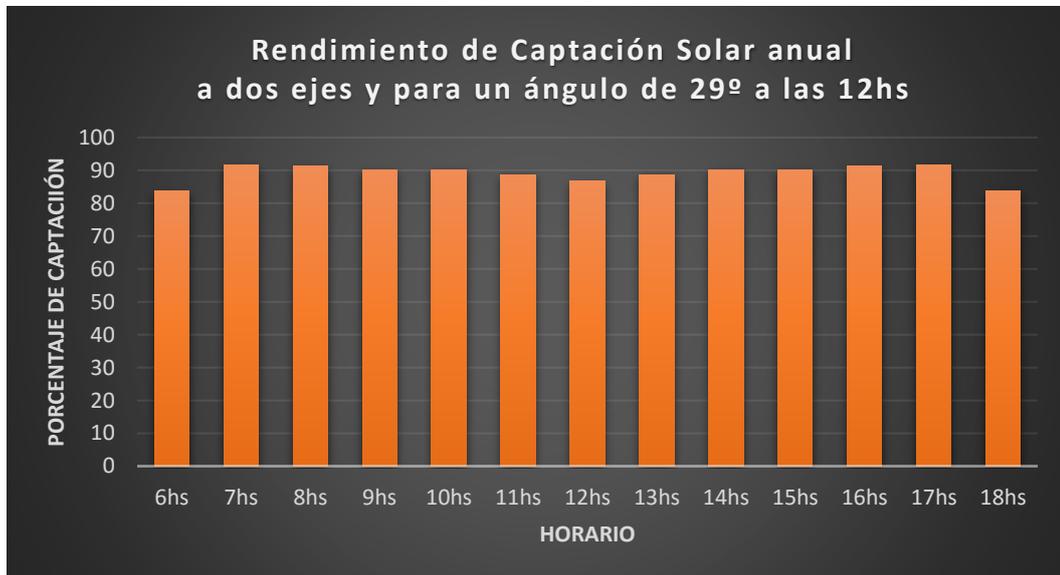


Gráfico 14; Valores de Rendimiento de captación para una instalación a dos ejes móviles con una fuerza motriz.

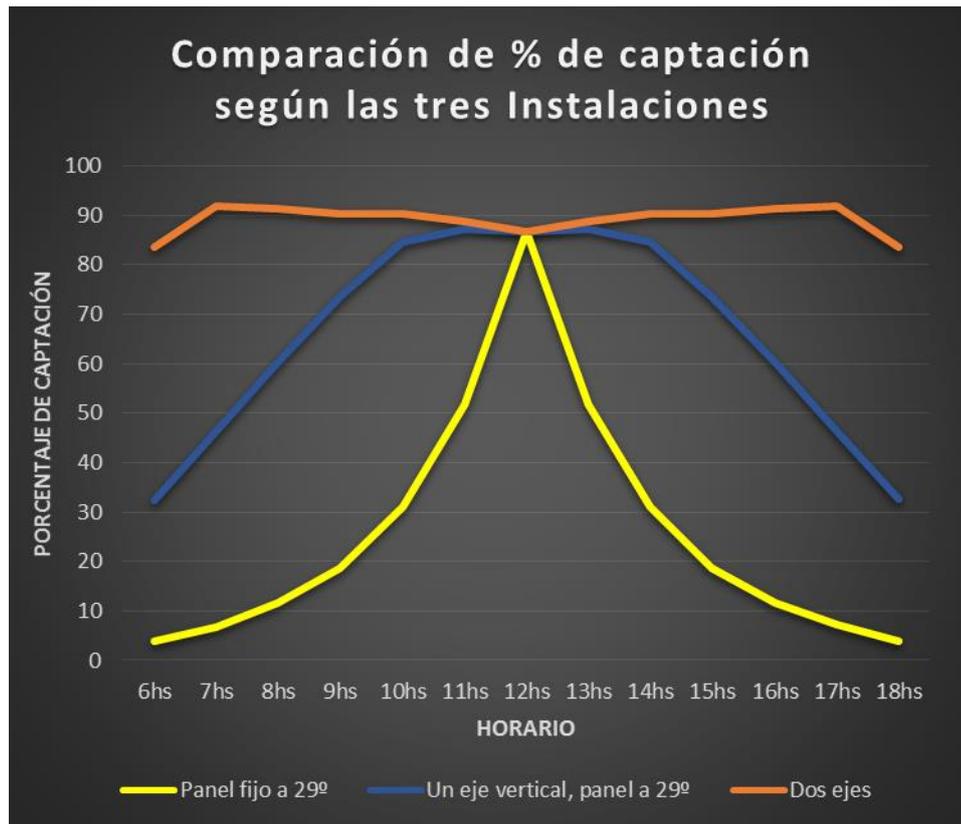


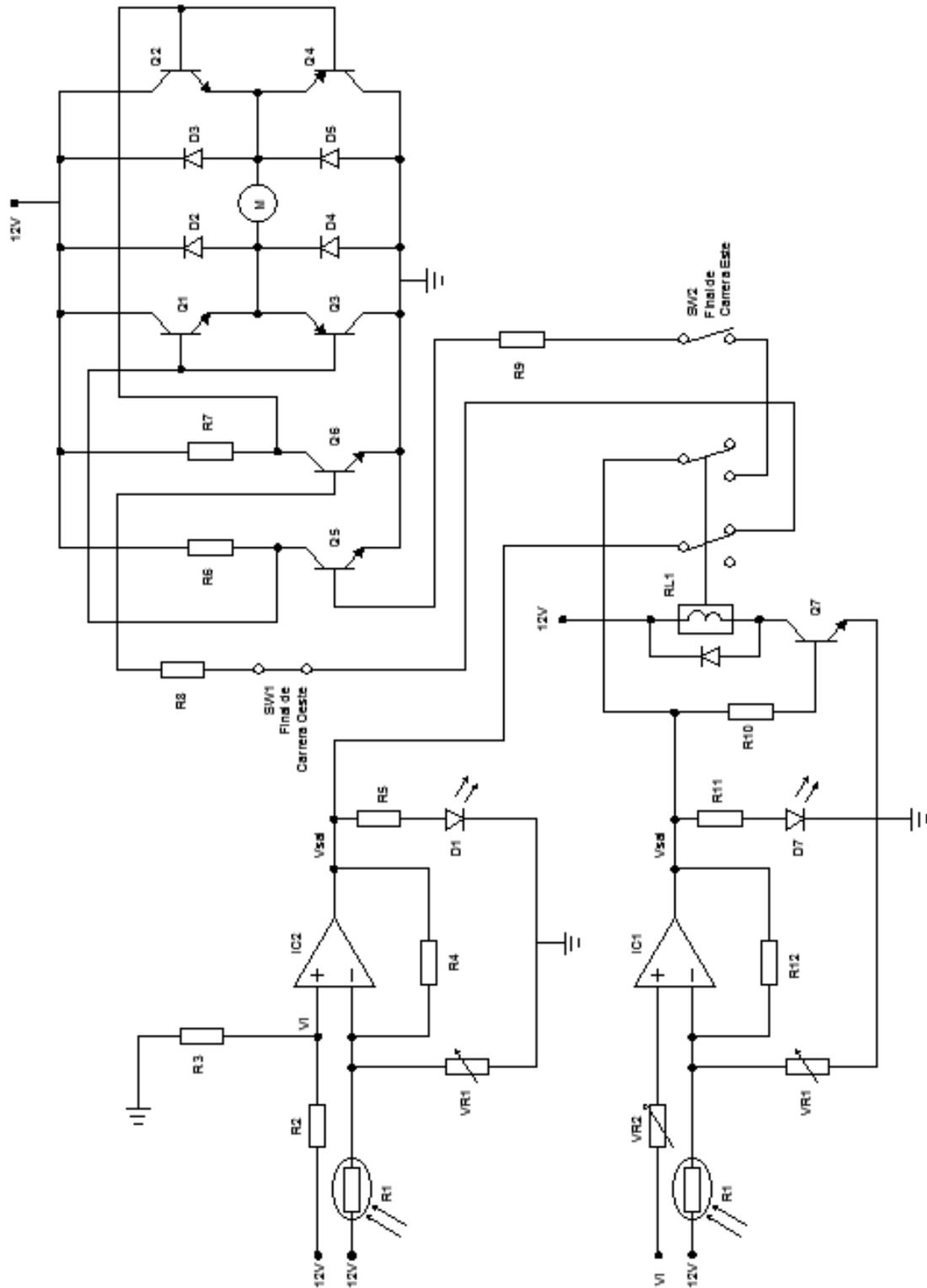
Gráfico 15, Comparación entre los tres tipos de instalaciones sobre el porcentaje de captación de cada tipo de instalación

#### 6.4 Conclusiones

Con respecto al gráfico 4 anterior se observa que para una instalación fija se obtiene un 25% de captación de incidencia solar para una instalación fija con panel con una inclinación de 29° al Norte, mientras que para la instalación que consta de una estructura a un eje móvil vertical y seguimientos solar se obtiene un porcentaje de captación de incidencia solar de 66%, siendo para la instalación a dos ejes con una fuerza motriz de 89%. De esta manera se concluye en la importancia de realizar un seguimiento, de una instalación, a los rayos solares ya que el rendimiento de la instalación está en función a la energía generada por el panel y esta depende del nivel de irradiancia en  $W/m^2$  captada.

## 7 Circuito Electrónico de Seguimiento solar

### 7.1 Diagrama del Circuito Electrónico



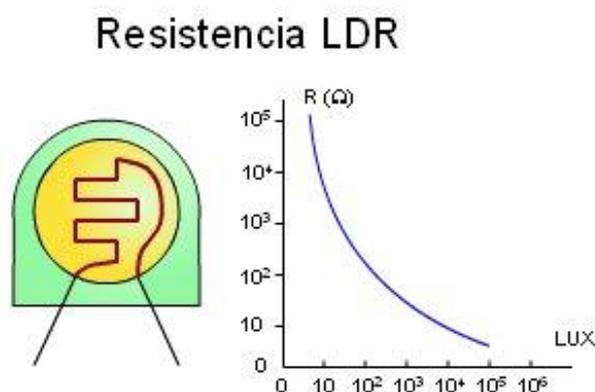
## 7.2 Componentes electrónicos utilizados

- R1 (LDR): Fotorresistencia, N5AC-50108
- VR1 y VR2; Resistencias variables de 50kΩ.
- Amplificador Operacional IC1 e IC2: LM741.
- Resistencias varias; R5, R6, R7 y R11 = 1kΩ. R8, R9 y R10 = 4,7kΩ. R2 y R3 = 10kΩ. R12 = 330kΩ, R4 = 1MΩ.
- Diodos LED.
- Diodos D2, D3, D4 y D5: 1N4007.
- Transistores Q5, Q6 y Q7: BC548B.
- Transistores Q1 y Q2 (NPN PIT131), Q3 y Q4 (PNP PIT136).
- Sensores Final de carrera.
- Relé: 12V

## 7.3 Funcionamiento del circuito

Para explicar el funcionamiento del circuito electrónico de seguimiento solar se partirá de la siguiente situación; si se comienza en la posición de las 8hs de la mañana, la superficie de los paneles estará hacia el este y el FINAL DE CARRERA ESTE estará pulsado y abierto y además R1 recibirá poca luz.

R1 es una celda foto-conductiva también conocida como foto-resistor y tiene la característica de disminuir su valor de resistencia si aumenta la intensidad luminosa, es decir, posee pendiente negativa;



[http://www.portaleso.com/web\\_electronica\\_3/electronica\\_indice.html](http://www.portaleso.com/web_electronica_3/electronica_indice.html)

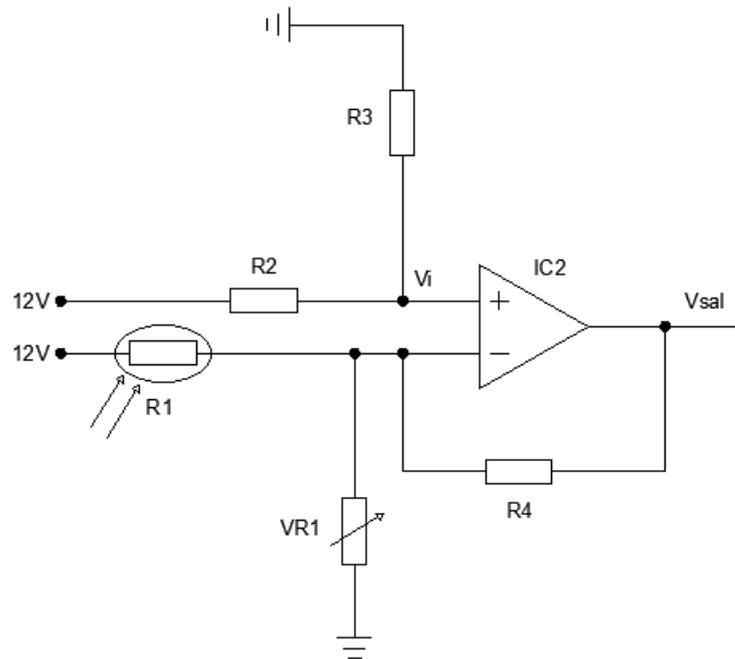


Grafico del circuito del Amp. Op. LM741 (IC2).

De este circuito se tiene las siguientes ecuaciones si se aplica la teoría de nodos;

$$V_i = 12V \times \frac{R_3}{R_2 + R_3} =$$

Como  $R_2 = R_3 \Rightarrow V_i = 6V$

Ahora aplicando la misma teoría al nodo que se conecta a la entrada inversora del amplificador se tiene:

$$\frac{12V - V_i}{R_1} + \frac{0 - V_i}{VR_1} + \frac{V_{sal} - V_i}{R_4} = 0$$

$$\frac{12V}{R_1} + \frac{V_{sal}}{R_4} = V_i \times (1/R_1 + 1/VR_1 + 1/R_4)$$

$$V_{sal} = V_i \times R_4 \times (1/R_1 + 1/VR_1 + 1/R_4) - 12V/R_1 \times R_4$$

$$V_{sal} = V_i \times (R_4/R_1 + R_4/VR_1 + 1) - 12V \times R_4/R_1$$

Entonces reagrupando nos queda:

$$V_{sal} = [6V \times R_4/R_1 - 12V \times R_4/R_1] + 6V \times R_4/VR_1 + 6V \quad (A)$$

Se observa que la polaridad del voltaje de salida surge de la variación de la resistencia R1 (LDR) y del valor de regulación del potenciómetro VR1 que se halla dado previamente.

Siguiendo con el Amp. Op. IC1:

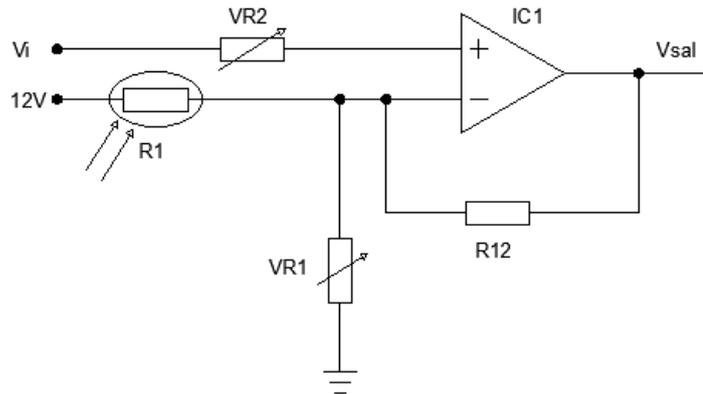


Gráfico del circuito del Amp. Op. LM741 (IC1).

Donde  $V_i = 6V$

$$\frac{12V - V_i}{R1} + \frac{0 - V_i}{VR1} + \frac{V_{sal} - V_i}{R12} = 0$$

$$\frac{12V}{R1} + \frac{V_{sal}}{R12} = V_i \times (1/R1 + 1/VR1 + 1/R12)$$

$$V_{sal} = V_i \times R12 \times (1/R1 + 1/VR1 + 1/R12) - 12V/R1 \times R12$$

$$V_{sal} = V_i \times (R12/R1 + R12/VR1 + 1) - 12V \times R12/R1$$

Entonces reagrupando nos queda:

$$V_{sal} = [6V \times R12/R1 - 12V \times R12/R1] + 6V \times R12/VR1 + 6V \quad (B)$$

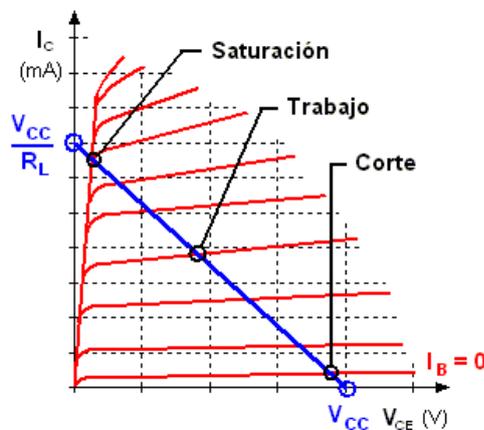
De esta manera arrancaremos la explicación del circuito para cuando sale el sol, es decir, entre las 6 y 8hs de la mañana, dependiendo de la estación;

a) Luz solar;

Premisas:  $R1 \ll$

Si  $VR1 > R1$ , la tensión de salida de IC2 es (-), esta tensión se aplica, mediante el interruptor de dos posiciones, al transistor Q6 polarizándolo en inversa (donde el final de carrera SW1 se encuentra cerrado).

El transistor polarizado en inversa actúa como un interruptor abierto, es decir, en su estado al corte, sin corriente en la base, por lo que su corriente de colector es cero.



<http://karengonzaleztorres.blogspot.com/2012/09/zona-de-trabajo-de-los-transistores.html>

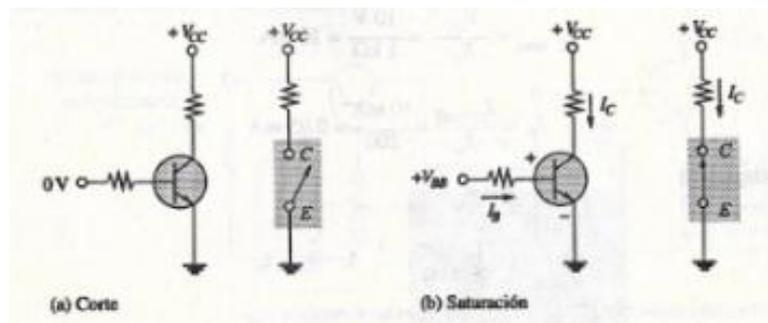
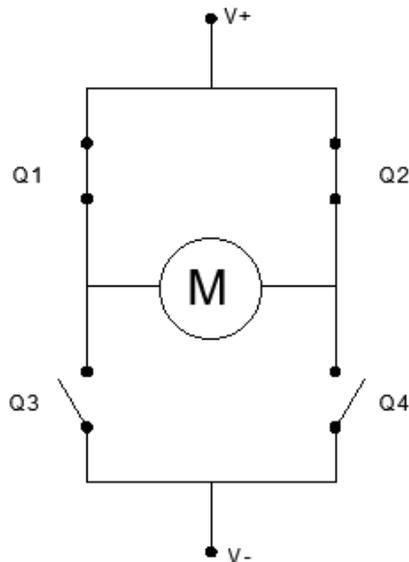


Imagen extraída del Libro: *Dispositivos Electrónicos, tomo 1, página 181. Thomas Floyd, Editorial Ciencia y Técnica (1994).*

Teniendo una  $Ic = 0$  la tensión queda aplicada entre el colector y el emisor, es decir,  $Vce = 12V$ , ya que al no haber  $Ic$  por el resistor R7 no existirá caída de tensión en el mismo.

El valor de la tensión aplicado a dicho transistor Q6 ( $Vce$ ) se emplea para polarizar a los transistores Q2 y Q4 del puente H transistorizado (BJT). Obteniéndose la siguiente operación;



Se observa del lado de la rama derecha que el transistor Q2 es del tipo NPN, por lo que queda su base polarizada en directa, actuando como una llave cerrada (en saturación), mientras que al ser Q4 un transistor PNP su base queda polarizada en inversa y así actúa como un interruptor abierto.

Del lado izquierdo de la rama del puente, es decir, los transistores Q1 y Q3 quedan en la situación mostrada en la gráfica durante toda la operación del Amp. Op. IC2, es decir, durante el día.

La explicación para el Amp. Op. IC1 es la siguiente;

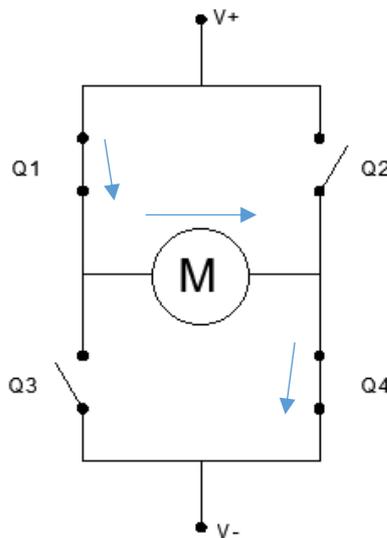
Con luz solar;  $R1 \ll$  y al ser  $VR1 > R1$  se tiene una polaridad de salida (-), lo cual se polariza en inversa al transistor Q7, dejando así sin actuar al relé RL1, el cual a la vez deja sin actuar al transistor Q5, o explicado de otra manera al no recibir este transistor una polarización queda actuando al corte como una llave abierta, por lo que su valor de  $V_{ce}$  se aplica a la rama izquierda del puente transistorizado, donde el transistor Q1 se polariza en directa, al ser NPN (como llave cerrada), mientras que el Q3 se polariza en inversa como llave abierta (al ser PNP), todo esto se observa en el gráfico anterior.

Se concluye que el motor todavía no comienza a girar.

b) Ahora si pasamos al estado en que el sol comienza a moverse de Este a Oeste el Resistor (LDR) recibe menor radiación directa (percibe oscuridad) por lo que la premisa es:

$R1 \gg$  (oscuridad) y así  $VR1 < R1$  por lo que el valor de  $V_{sal}$  es de polaridad (+).

Sigue actuando “primero” el Amp. Op. IC2 mientras que IC1 posee un retardo por lo que no hace actuar aún a RL1, de esta manera, Vsal de IC2 se aplica por medio del final de carrera SW1 (cerrado) al transistor Q6 como en el caso anterior pero con la diferencia que ahora lo polariza en directa y lo hace actuar a saturación con  $I_c$  máxima, como una llave cerrada, y así queda el voltaje aplicado el resistor R7 por lo que el voltaje en Vce es igual a cero donde a la vez este voltaje se aplica a la rama derecha, polarizando al corte a Q2 que es NPN (interruptor abierto) y en directa a Q4 PNP (interruptor cerrado), quedando la siguiente situación:



Se debe recordar que el lado izquierdo de la rama del puente sigue polarizado como en el primer caso, es decir, sin actuar, Q1 en saturación (cerrado) y Q3 al corte (abierto).

De esta manera se concluye que el motor gira en un sentido para posicionar al panel en dirección de los rayos solares, recibiendo así nuevamente radiación el LDR (foto-resistor) y volviendo a la situación a) ya explicada anteriormente, repitiéndose este mecanismo durante todo el día (lapso de radiación solar).

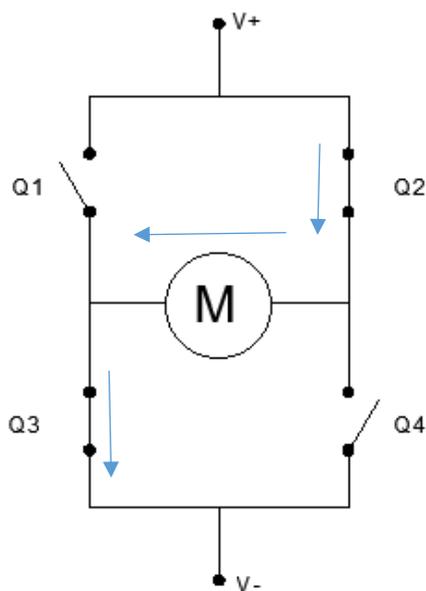
c) El último caso se presenta cuando el movimiento al final del día acciona el final de carrera SW1 abriéndolo y donde a la vez se está en situación de oscuridad;

$$R1 \gg$$

$$VR1 < R1$$

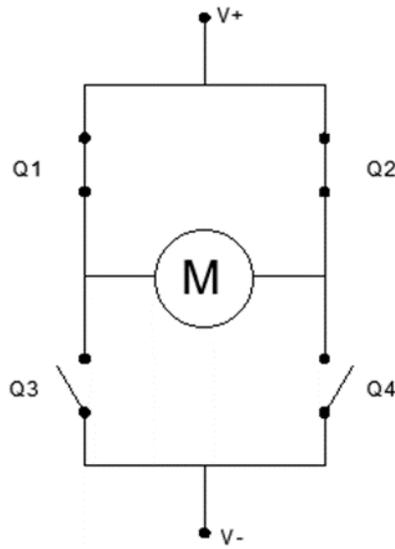
De las condiciones anteriores se llega a  $V_{sal}$  (+) y donde ya no actúa el Amp. Op. IC2 al estar abierto el interruptor SW1, de esta manera actúa IC1 polarizando en directa a Q7 el cual actúa en saturación como una llave cerrada, haciendo circular corriente por el relé RL1 para que de esta manera hacer actuar el interruptor de dos puntos y donde también se encuentra cerrado el final de carrera SW2 (debido que al comienzo del movimiento del mecanismo este pasa a posición de cerrado ya que deja de oprimirlo).

Prosiguiendo con la tensión aplicada (+) por medio de SW2 a Q5 en directa, este actúa como llave cerrada, circulando una  $I_c$  máxima y así el voltaje queda aplicado en R6 mientras que  $V_{ce}$  será 0, para polarizar a la rama izquierda, a Q1 (NPN) en inversa y actuando como una llave al corte (llave abierta) y a Q3 (PNP) en directa pasándolo a saturación (llave cerrada), como se observa en el gráfico siguiente.



El transistor Q6 al quedar sin actuar (sin recibir señal en su base) tendrá  $V_{ce}=12V$  y polariza en directa a Q2 (NPN, llave cerrada) y en inversa a Q4 (PNP, llave abierta).

De todo lo dicho en este punto c) el motor gira en sentido inverso (Oeste-Este) para posicionar al panel para un nuevo día, dejando cerrado el final de carrera SW1 y accionando el final de carrera SW2 (abierto), para dejar de polarizar a Q5 (NPN, llave abierta) para tener un valor de  $V_{ce} = 12V$  y así polarizar a Q1 en directa (llave cerrada) y Q3 en inversa (llave abierta) para volver a la misma situación presentada en el comienzo.

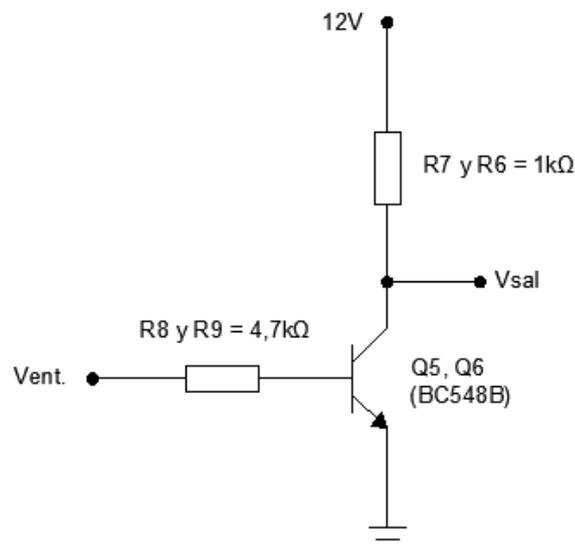


Se debe aclarar que los dos amplificadores operacionales quedan polarizados durante la noche, pero no actúa IC2 debido que al quedar polarizado también IC1 el RL1 queda energizado y por ende la llave de dos puntos sigue en la posición que tenía para hacer girar el motor de Oeste- Este por lo que no permite que actúe IC2 y como el final de carrera SW2 está pulsado en abierto no actúa tampoco IC1.

#### 7.4 Cálculo del voltaje en las bases de los transistores Q5 y Q6.

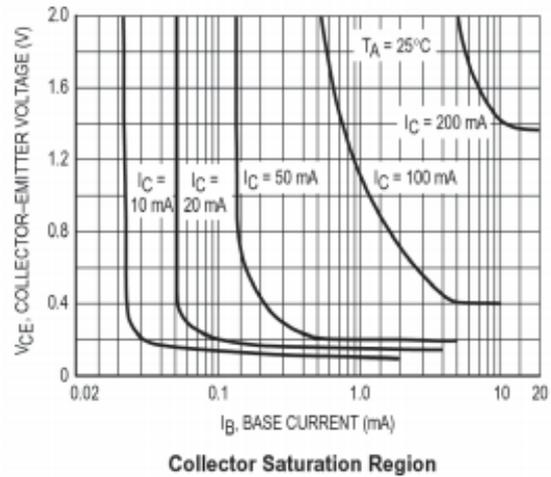
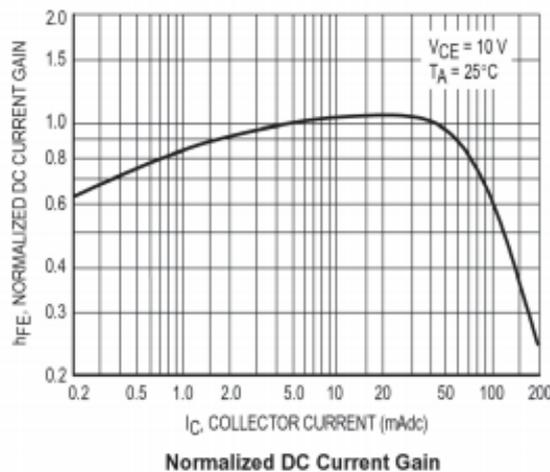
Este cálculo demostrará el voltaje necesario para llevar el transistor a saturación, es decir, trabajando el transistor como un interruptor cerrado.

Los dos transistores Q5 y Q6 son BC548B.





Curvas características:



Gráficas extraídas de Catálogo Weitron (data sheet), transistores de propósito general (página 3)

- ✓ Para el caso de saturación el  $V_{CE} = 0V$  y todo el voltaje de la fuente de  $12V$  cae sobre el resistor, teniéndose de esta manera:

$$I_{C(Sat)} = V_{CC} / R7 = 12V / 1K\Omega = 0,01Amp = 12mA \text{ (DC).}$$

- ✓ Se tiene una ganancia de corriente mínima  $\beta = 200$  para el modelo BC548B;

**ION CHARACTERISTICS**

<b>DC current gain</b> ( $V_{CE}=5V, I_C=2mA$ )	<b>BC546</b> <b>BC547</b> <b>BC548</b> <b>BC547A/BC548A</b> <b>BC546B/BC547B/BC548B</b> <b>BC546C/BC547C/BC548C</b>	$h_{FE}$	110 110 110 110 200 420	450 800 800 220 450 800	
<b>Collector-emitter saturation voltage</b> ( $I_C=100mA, I_B=5mA$ )		$V_{CE(sat)}$	-	0.3	V
<b>Base-emitter saturation voltage</b> ( $I_C=100mA, I_B=5mA$ )		$V_{BE(sat)}$	-	1	V
<b>Transition frequency</b> ( $V_{CE}=5V, I_C=10mA, f=100MHz$ )		$f_T$	150	-	MHz

Cuadro extraído de Catálogo Weitron (datasheet), transistores de propósito general. (Página 2)

$$I_B = I_{C(sat)} / \beta_{dc} = 12mA / 200 = 0,06mA$$

Este es el valor necesario de  $I_B$  para excitar el transistor hasta su punto de saturación.



De esta manera cuando el transistor se encuentra saturado,  $V_{BE} = 0,7V$  y si su resistencia de base es de  $4,7k\Omega$ , se podría calcular el valor necesario a aplicar en la base de ambos transistores para lograr la saturación, o sea, el valor de  $I_B$  hallado anteriormente.

$$V_{ent.} = R_B \times I_B + 0,7V = 4,7k\Omega \times 0,06mA + 0,7V = 0,982V$$

De esta manera se podrá calcular los valores de resistencia de  $R_1$  (LDR) en función a la variación de  $VR_1$ . De acuerdo a la ecuación (A) para  $IC_2$ :

$$V_{sal} = [6V \times R_4/R_1 - 12V \times R_4/R_1] + 6V \times R_4/VR_1 + 6V \quad (A)$$

- ✓ Si se adopta  $VR_1 = 30k\Omega$  (del intervalo entre 0 y  $50k\Omega$ ). Se tiene un valor de  $R_1$ :

$$V_{sal} - (6V \times R_4/VR_1 + 6V) = [6V \times R_4/R_1 - 12V \times R_4/R_1]$$

Luego:

$$V_{sal} - (6V \times R_4/VR_1 + 6V) = [6V \times R_4 - 12V \times R_4] \times 1/R_1$$

Entonces despejando, nos queda:

$$R_1 = [6V \times R_4 - 12V \times R_4] / [V_{sal} - (6V \times R_4/VR_1 + 6V)]$$

$$R_1 = [6V \times 1M\Omega - 12V \times 1M\Omega] / [0,982V - (6V \times 1M\Omega / 30K\Omega + 6V)] \approx 30K\Omega$$

Para trabajar al corte el transistor  $Q_6$ , se tendría una  $V_{sal} = 0V$  y de esta manera el valor de  $R_1$  (LDR) tendría que ser:

$$R_1 = [6V \times 1M\Omega - 12V \times 1M\Omega] / [0V - (6V \times 1M\Omega / 30K\Omega + 6V)] \approx 29K\Omega$$

- ✓ Si se adopta  $VR_1 = 10k\Omega$  (del intervalo entre 0 y  $50k\Omega$ ). Se tiene un valor de  $R_1$ :

$$V_{sal} - (6V \times R_4/VR_1 + 6V) = [6V \times R_4/R_1 - 12V \times R_4/R_1]$$

Luego:

$$V_{sal} - (6V \times R_4/VR_1 + 6V) = [6V \times R_4 - 12V \times R_4] \times 1/R_1$$

Entonces despejando, nos queda:

$$R1 = [6V \times R4 - 12V \times R4] / [V_{sal} - (6V \times R4 / VR1 + 6V)]$$

$$R1 = [6V \times 1M\Omega - 12V \times 1M\Omega] / [0,935V - (6V \times 1M\Omega / 10K\Omega + 6V)] \approx 10K\Omega$$

Nuevamente para trabajar al corte el transistor Q6 se tendría una  $V_{sal} = 0V$  y de esta manera el valor de R1 (LDR) tendría que ser:

$$R1 = [6V \times 1M\Omega - 12V \times 1M\Omega] / [0V - (6V \times 1M\Omega / 10K\Omega + 6V)] \approx 9,9K\Omega$$

## 7.5 Conclusiones

### Conclusiones específicas:

- ✓ Para valores de VR1 (potenciómetro) altos como  $30K\Omega$  se trabaja en valores de LDR altos, es decir entre 29 y  $30K\Omega$ , donde se obtienen los valores de  $V_{sal}$  suficientes para hacer trabajar a saturación y al corte el transistor Q6 respectivamente. Esto implica que a valores altos del LDR, su sensibilidad *es mayor* (cambio de valor de su resistencia, gran pendiente en la curva), para un pequeño rango o intervalo de intensidad lumínica.
- ✓ Para valores de VR1 (potenciómetro) bajos como  $10K\Omega$ , se trabaja en valores del LDR también bajos, es decir entre 10 y  $9,9K\Omega$ , donde se obtienen los valores de  $V_{sal}$  suficientes para hacer trabajar a saturación y al corte el transistor Q6 respectivamente. Esto implica que a valores bajos del LDR en  $\Omega$ , su sensibilidad *es menor* al cambio de intensidad lumínica, gran intervalo en Lux para un pequeño rango de  $\Omega$ .

### Conclusión general:

Si bien este circuito presenta una sencillez muy valorable y tiene además la virtud de que si los días son nublados en su totalidad no hace funcionar al motor, por lo que no absorberá energía del banco de baterías, tiene la gran desventaja de que, si la nubosidad (día nublado) se presenta en algún momento del día por un tiempo lo suficiente, como para que el seguimiento empiece a girar (buscar al sol) y si no lo encuentra, el sistema se posiciona nuevamente al Este para esperar un nuevo día, perdiendo la generación de energía de lo que resta de ese día.

Por estos motivos se elegirá la Plataforma Arduino como dispositivo de seguimiento solar automático, es una plataforma de creación de prototipos electrónicos de código abierto basada en la flexibilidad: hardware y software fáciles de usar.

## 8 Huella de carbono

Si nos basamos en una generación de energía anual (valor conservador) del doble a lo calculado para el caso de la estructura fija, se tiene así una energía anual de **2.400kWh**.

### FACTOR DE EMISIÓN DE CONSUMO ELÉCTRICO

	Consumo anual	Unidades de medida física	Factor de emisión (Kg de CO <sub>2</sub> eq/kWh)		Kg de CO <sub>2</sub> eq
Electricidad	2400	kWh	0,385	Kg de CO <sub>2</sub> eq/kWh	<b>924</b>

La tabla anterior fue hecha por:



*Es decir, se evitarían emitir 0,924 Tn de CO<sub>2</sub> a la atmosfera por año.*

En la tabla siguiente se muestra factores de emisión en tCO<sub>2</sub> por cada tipo de combustible fósil.

Por ejemplo se emite a la atmosfera 3,127 tCO<sub>2</sub> por cada Tn de Fuel Oil empleado para generar energía eléctrica.

Factor de emisión por combustible		
Combustible	Factores de Emisión	
Gas Natural (NG)	1,936	tCO <sub>2</sub> /dam <sup>3</sup>
Fuel Oil (FO)	3,127	tCO <sub>2</sub> /t
Gas oil (GO)	3,771	tCO <sub>2</sub> /t
CMi (Carbón Mineral) Nacional	2,441	tCO <sub>2</sub> /t
CMi (Carbón Mineral) Importado	2,441	tCO <sub>2</sub> /t
(Fuente : Tercera Comunicación Nacional Argentina, Págs. 237 y 241)		
Densidad del Gasoil	0,825	t/m <sup>3</sup>

Tabla 21, Factores de emisión por combustible.

Fuente: Tercera Comunicación Nacional Argentina, páginas 237 y 241.

De esta manera y en función al valor obtenido de 0,924 tn/CO<sub>2</sub> por año que se evitan emitir para generar 2400kWh anual se tienen la siguiente relación en tn de combustible que se evitaría combustionar:

Combustible	Factores de emisión		Volumen de Comb.
Gas Natural (GN)	1,936	tCO <sub>2</sub> /dam <sup>3</sup>	<b>0,477 dam<sup>3</sup></b>
Fuel – Oil (FO)	3,127	tCO <sub>2</sub> /t	<b>0,295 tn</b>
Gas – Oil (GO)	3,771	tCO <sub>2</sub> /t	<b>0,245 tn</b>
CMi (carbón mineral) Nac.	2,441	tCO <sub>2</sub> /t	<b>0,378 tn</b>
CMi (carbón mineral) Imp.	2,441	tCO <sub>2</sub> /t	<b>0,378 tn</b>

*Tabla 22, Volumen de emisión por tipo de combustible.*

# Parte II

# Mecánica



## 9. Seguidores Solares

Si bien en el inciso 2.2.2 se hizo una primera referencia de algunos tipos de seguidores para explicar cómo afecta el rendimiento de la instalación en función al modo de seguimiento solar, en este apartado se los volverá a mencionar.

Un seguidor solar es un dispositivo mecánico, que mediante una estructura soporta una o varias placas solares, a la vez es capaz de orientar las mismas de forma que estén lo más perpendicularmente posibles a los rayos solares. Las placas se orientan al moverse la estructura que las soporta, esta estructura puede moverse sobre uno o sobre dos ejes.

Si se trata de dos ejes, este hace un movimiento de Este-Oeste y Sur-Norte, si es de un eje, generalmente hace un movimiento de Este a Oeste. Este tipo de mecanismo sirve para mejorar la captación de energía solar.

### 9.1 Tipos de seguidores solares de 1 (un) eje

#### 9.1.1 Seguidor solar de eje polar

El eje está inclinado un ángulo igual a la latitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie de la placa coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al Sol. La velocidad de giro es de 15° por hora y se realiza de este a oeste.



*Figura 18, Seguidor solar de un eje polar.*

*<https://www.interempresas.net/Energia/Articulos/59462-Mecasolar-lanza-un-seguidor-polar-capaz-de-mover-hasta-114-4-kWp-con-un-solo-motor.html>*

### 9.1.2 Seguidor solar de eje vertical o acimutal.

El ángulo de la superficie es constante e igual a la latitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano local que contiene al Sol. La velocidad de giro es variable a lo largo del día y este giro se produce de este a oeste.



*Figura 19, Seguidor solar de eje vertical.*

*<http://www.sumiseran.es/contents/es/d18.html>*

### 9.1.3 Seguidor solar de eje horizontal

En el caso de eje horizontal, este está orientado en dirección este-oeste. El ángulo de giro se ajusta para que coincida con el ángulo de la altura solar (del sol).

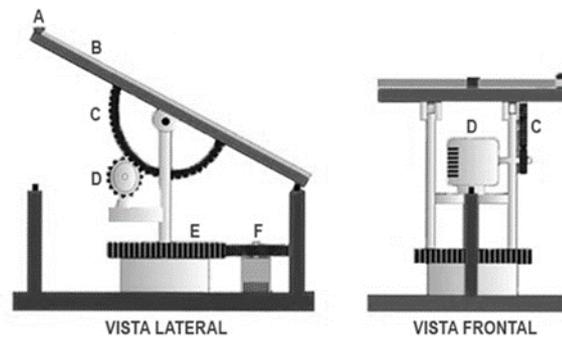


*Figura 20, Seguidor solar de eje horizontal.*

*<https://degeriberica.com/articulo-tecnico-viabilidad-de-la-instalacion-de-seguidores>*

## 9.2 Seguidor solar de 2 (dos) ejes

Un seguidor solar de dos ejes posee un movimiento compuesto por dos movimientos simples; un movimiento vertical y el otro horizontal. Mientras que B es la placa, C es el engranaje que permite el movimiento horizontal por medio del motor D, mientras que F es el engranaje o mecanismo que por medio del motor F permite el movimiento vertical.



*Figura 21, Seguidor solar de dos ejes.*

<https://es.dgitreducer.com/info/solar-tracker-i00019i1.html>



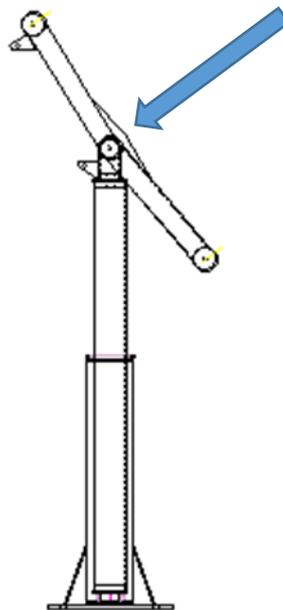
## 10. Cálculo de la fuerza del viento de diseño sobre la estructura.

Para el cálculo de las fuerzas de viento se utilizó el Reglamento Cirsoc 102, del Ministerio de Planificación Federal, Inversión pública y Servicios, Secretaria de Obras Públicas de la Nación, Julio 2005. Véase los cálculos en el Anexo.

### Consideraciones:

Si bien la superficie que ofrece los paneles solares estará inclinada un ángulo igual a la latitud de la localidad más  $10^\circ$  durante todo el año, se supondrá la peor condición para el cálculo, es decir, a la superficie se la considerará vertical al suelo o perpendicular a la dirección del viento.

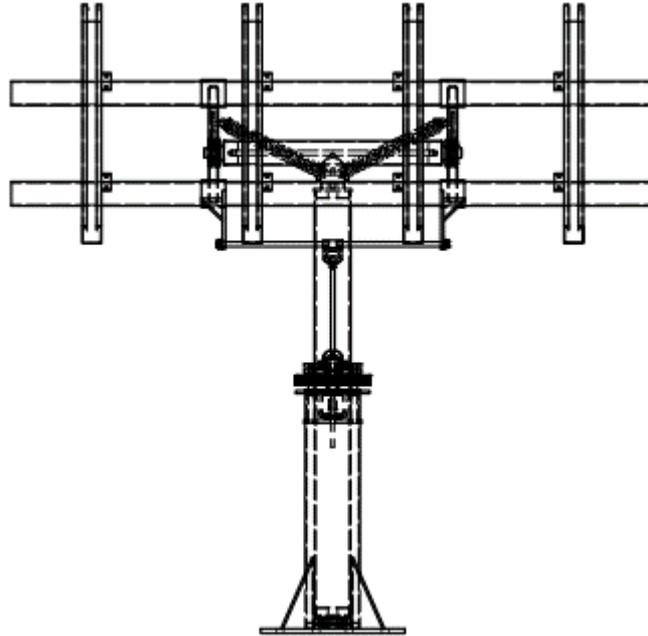
- Terreno: plano y abierto
- Dimensiones: 3m de ancho (o largo) por 2m de altura, es decir, un fila de 3 paneles dispuestos verticalmente sumando de altura de 2m y un ancho de 1m x 3.



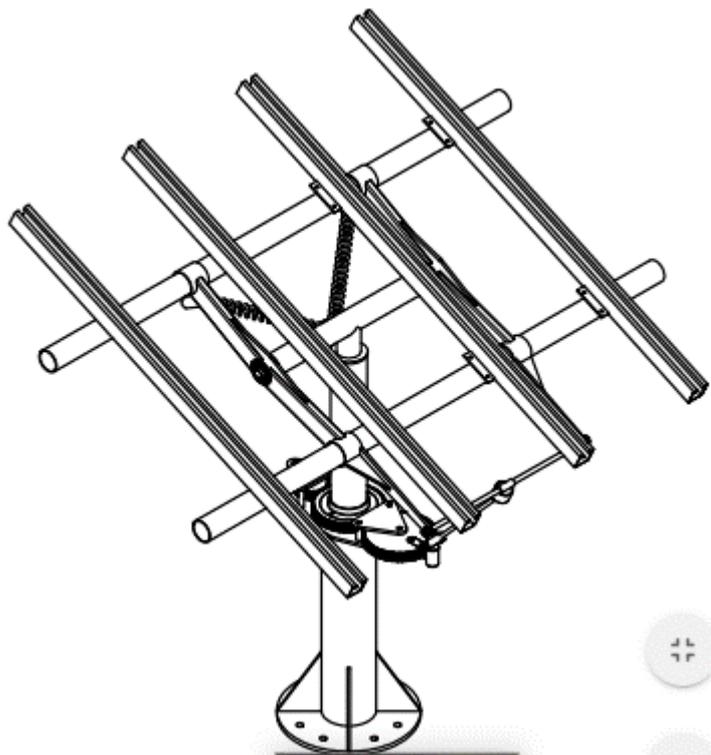
*Figura 22, Acción del viento sobre la estructura.*

**11. Cálculo de resistencia de los componentes de la estructura.**

11.1 Representación y designación de los componentes de la estructura.



*Figura 23, Vista anterior de la estructura.*



*Figura 24, Vista en perspectiva de la estructura.*

## 11.2 Cálculo de resistencia de las vigas tubulares

Para esto primero se debe determinar la fuerza aplicada sobre cada panel y luego representar la fuerza de los cuatro paneles aplicada sobre la viga.

La superficie de cada panel es:

$$\text{Sup.} = \text{Largo} \times \text{ancho} = 1,95\text{m} \times 0,99\text{m} = 1,93\text{m}^2$$

La fuerza del viento sobre cada panel (ver cálculo de la presión del viento en Anexo) es:

$$F_p = F \times \text{sup.} = 850 \text{ N/m}^2 \times 1,93\text{m}^2 = 1640\text{N} \approx \mathbf{170\text{kg}}$$
, como el panel se apoya en dos vigas, a esta fuerza se la divide a sus mitades = **85kg**

El peso de cada panel es de 23kg, más el peso por metro lineal de la viga tubular que es de 2,97kg/m, en total en cada punto de aplicación sobre la viga se tiene la siguiente fuerza de peso estructural:

$$P = 23\text{kg}/2 + 2,97\text{kg/m} \times (2,5\text{m}/3) = \mathbf{13,9\text{kg}}$$

Las dos fuerzas se encuentran a 90° por lo que la fuerza resultante será:

$$FR = (13,9^2 + 85^2)^{1/2} \approx \mathbf{85\text{kg}}$$

**Se concluye que se dimensionará dichas vigas solo por la acción del viento.**

Ahora si representamos el diagrama de cuerpo libre de la estructura se tiene:

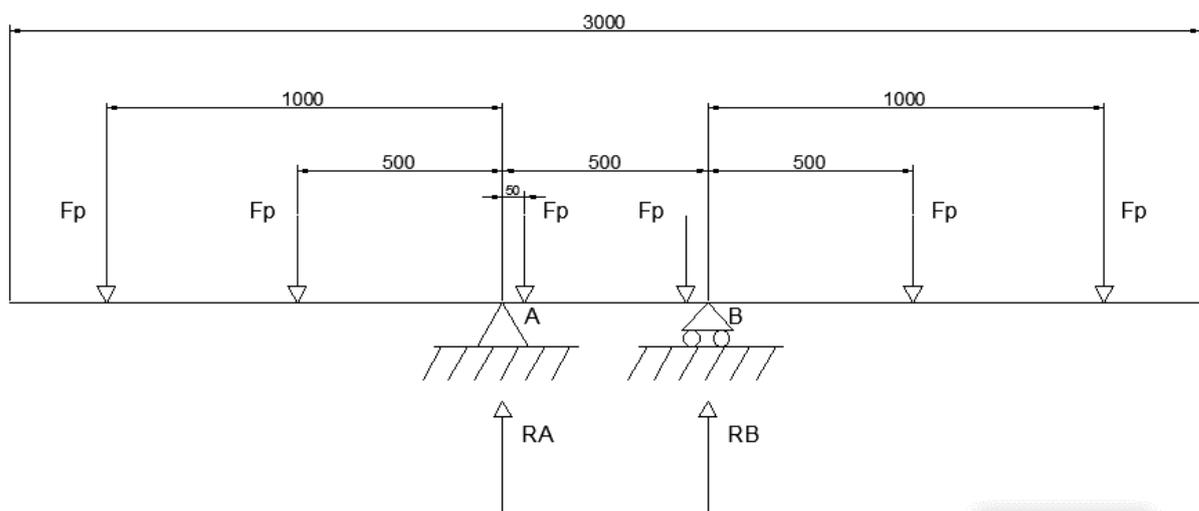


Fig. 25, Diagrama de cuerpo libre de la viga tubular.



- Cálculo de las reacciones:

$$\Sigma F_y = F_p \times 6 - R_A - R_B = 0, F_p = 42,5\text{kg}$$

$$\Sigma M_B = F_p \times 150\text{cm} + F_p \times 100\text{cm} - R_A \times 50\text{cm} + F_p \times 45\text{cm} + F_p \times 5\text{cm} - F_p \times (50+100)\text{cm}$$

$$R_A = \frac{F_p \times (150+100+45+5)\text{cm} - F_p \times (50+100)\text{cm}}{50\text{cm}}$$

$$R_A = \frac{42,5\text{kg} \times 300\text{cm} - 42,5\text{kg} \times 150\text{cm}}{50\text{cm}} = 127,5\text{kg}$$

$$\Sigma M_B = 2F_p \times 125\text{cm} + 2F_p \times 25\text{cm} - R_A \times 50\text{cm} - 2F_p \times 75\text{cm} =$$

$$R_A = \frac{2F_p \times (125+25)\text{cm} - 2F_p \times (75)\text{cm}}{50\text{cm}} = 127,5\text{kg}$$

Volviendo a la ecuación de equilibrio de sumatoria de fuerzas en el eje “y”, tenemos:

$$R_B = F_p \times 6 - R_A = 42,5\text{kg} \times 6 - 127,5\text{kg} = 127,5\text{kg}.$$

- Esfuerzos de corte:

Para  $x = 0\text{cm}$  desde la izquierda;

$$Q = F_p = 42,5\text{kg}$$

Para  $x = 50\text{cm}$ ;

$$Q = F_p \times 2 = 42,5\text{kg} \times 2 = 85\text{kg}$$

Para  $x = 100\text{cm}$ ;

$$Q = F_p \times 2 - R_A = 42,5\text{kg} \times 2 - R_A = 85\text{kg} - 127,5\text{kg} = -42,5\text{kg}$$

Para  $x = 105\text{cm}$ ;

$$Q = F_p \times 2 - R_A + F_p = 42,5\text{kg} \times 2 - R_A + = 85\text{kg} - 127,5\text{kg} + 42,5\text{kg} = 0\text{kg}$$

Se presenta una gráfica idéntica para el lado derecho si se comienza por el extremo derecho.

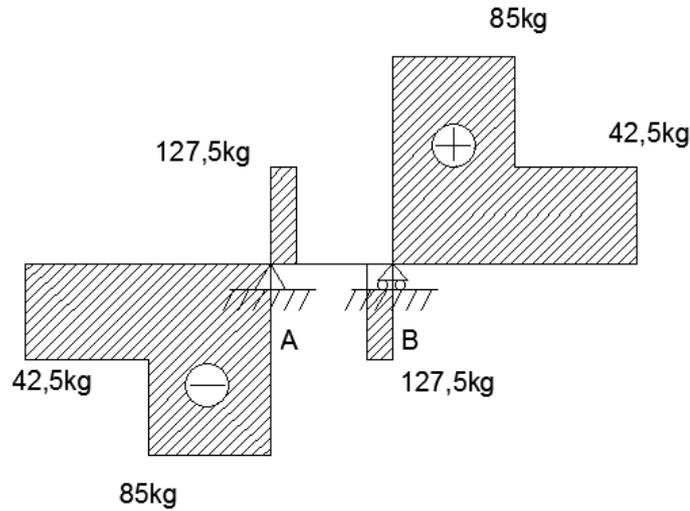


Fig. 26, Diagrama de esfuerzo de corte de la viga tubular.

- Cálculo a esfuerzo cortante:

$$\text{Área de la viga tubular: } A = \pi \times (r_2^2 - r_1^2) = \pi \times ((2,54\text{cm})^2 - (2,34\text{cm})^2) = 3,06\text{cm}^2$$

$$P_{\text{crit.}} = \tau_{\text{av}} \cdot \text{Área} = 1.476 \text{ kg/cm}^2 \cdot 3,06 \text{ cm}^2 = 4516,56\text{kg}$$

Siendo  $\tau_{\text{av}}$  la tensión a la cizalladura para un acero laminado en caliente con 0,2% de carbono.

La fuerza al corte es  $4516,56\text{kg}/127,5\text{kg} \approx 35,4$  veces menor que la fuerza crítica.

- Diagrama de momento flector:

$$\Sigma M_x = 0 \text{ cm desde la izquierda, posición de la primera carga } F_p.$$

$$\Sigma M = F_p \times 50\text{cm} - R_A \times 100 \text{ cm} =$$

$$M_{\text{fmáx}} = 42,5\text{kg} \times 50\text{cm} - 127,5\text{kg} \times 100\text{cm} = \mathbf{-10.625\text{kgcm}}$$

$$M_{\text{mint.}} = -M_{\text{fmáx}} + F_p \times 105\text{cm} = -10.625\text{kg} + 42,5\text{kg} \times 105\text{cm} = 6.162\text{kgcm}$$

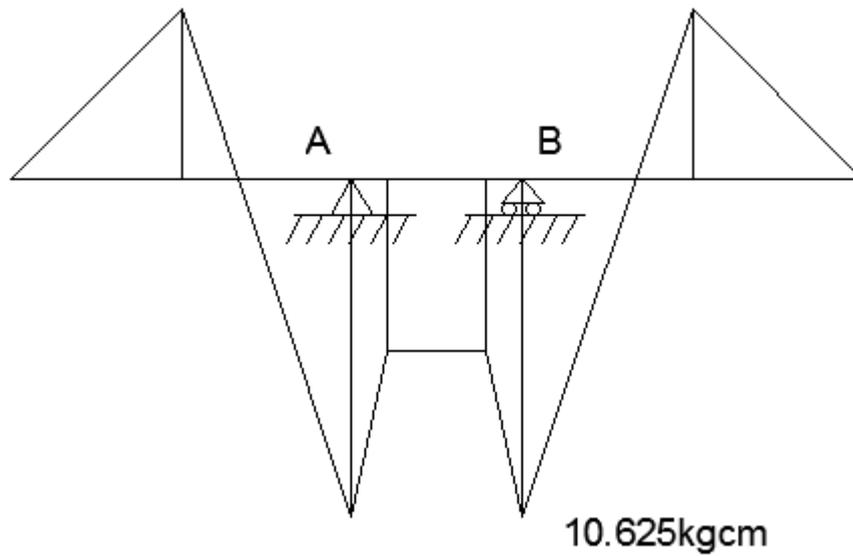


Fig. 27, Diagrama de momento flector de la viga tubular.

- Momento de Inercia del tubo de 2" de diámetro y espesor 3,2mm;

$$I_{x-x} = \pi/4 \times (r_2^4 - r_1^4) = \pi/4 \times [(2,54\text{cm})^4 - (2,22\text{cm})^4] = 13,614\text{cm}^4 \text{ (13,867cm}^4 \text{ de tabla)}$$

Por lo que la tensión axial a la fibra más alejada aplicando la fórmula de Navier será:

$$\sigma_{adm} = M_{f\text{m}\acute{a}\text{x}} \cdot y / I_{x-x} = 10625\text{kgcm} \cdot 2,54\text{cm} / 13,867\text{cm}^4 =$$

$$\mathbf{1.946,16\text{kg/cm}^2 < 3.167\text{kg/cm}^2}$$

Siendo “y” la distancia del eje neutro a la fibra más lejana.

El coeficiente de seguridad será de:

$$c_s = 3.167\text{kg/cm}^2 / 1946,17 \text{ kg/cm}^2 \approx \mathbf{1,627}$$

Siendo 3.167kg/cm<sup>2</sup> la *Resistencia a Tracción Mínima* equivalente a 310MPa para un tubo estructural redondo de denominación TE-20\*.

(\*) ASTM A 500, ASTM A 513 tipo 1 y 2.

- Cálculo de la flecha en función de la presión del viento;

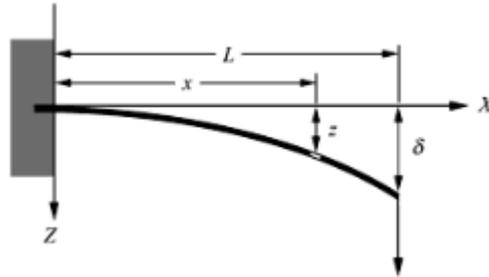


Figura extraída del Apunte; Teoría de Pandeo, unidad 3, Cátedra Estabilidad II, Prof. Ing. Tossone Hugo.

$$\delta_{\text{máx.}} = \frac{P x l^3}{3xExI} = \frac{85\text{kg} \quad x \quad (75\text{cm})^3}{3 \times 2,1 \times 10^6 \times 13,867\text{cm}^4} = 0,41\text{cm} = 4,10\text{mm}$$

$$\Theta = \frac{P x l^2}{2xExI} = \frac{85\text{kg} \quad x \quad (75\text{cm})^2}{2 \times 2,1 \times 10^6 \times 13,867\text{cm}^4} = 0,0082^\circ$$

- Cálculo de la flecha en función de la carga estática solamente;

$$\delta_{\text{máx.}} = \frac{P x l^3}{3xExI} = \frac{23\text{kg} \quad x \quad (75\text{cm})^3}{3 \times 2,1 \times 10^6 \times 13,867\text{cm}^4} = 0,11\text{cm} = 1,10\text{mm}$$

$$\Theta = \frac{P x l^2}{2xExI} = \frac{23\text{kg} \quad x \quad (75\text{cm})^2}{2 \times 2,1 \times 10^6 \times 13,867\text{cm}^4} = 0,0022^\circ$$

### 11.3 Cálculo de Resistencia de los apoyos en los extremos del cabezal.

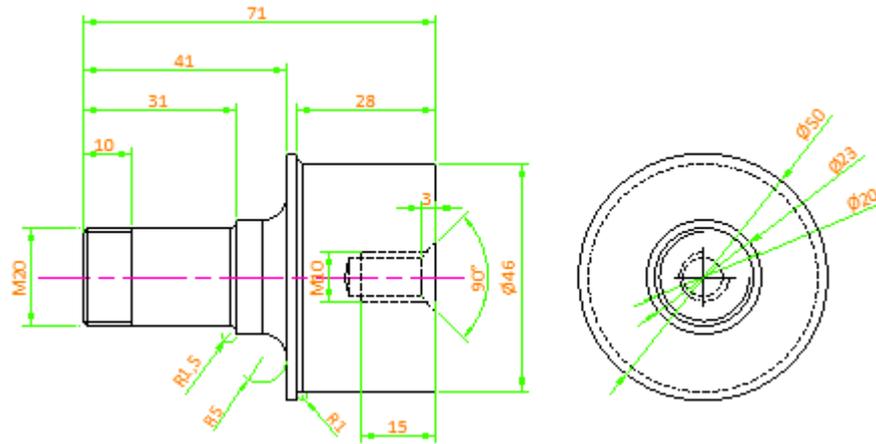


Figura 28, Apoyos de la estructura de paneles al cabezal.

Cálculo a esfuerzo cortante:

$$\text{Área del apoyo: } A = \pi \times r^2 = \pi \times 1\text{cm}^2 = 3,14\text{cm}^2$$

$$P_{\text{crit.}} = \tau_{\text{av}} \cdot \text{Área} = 1.476 \text{ kg/cm}^2 \cdot 3,14 \text{ cm}^2 = 4.634\text{kg}$$

Siendo  $\tau_{\text{av}}$  la tensión a la cizalladura para un acero laminado en caliente con 0,2% de carbono.

La fuerza al corte es  $4.634\text{kg} / (127,5\text{kg} \times 2) \approx 18$  veces menor que la fuerza crítica.

### 11.4 Cálculo de Resistencia del cabezal.

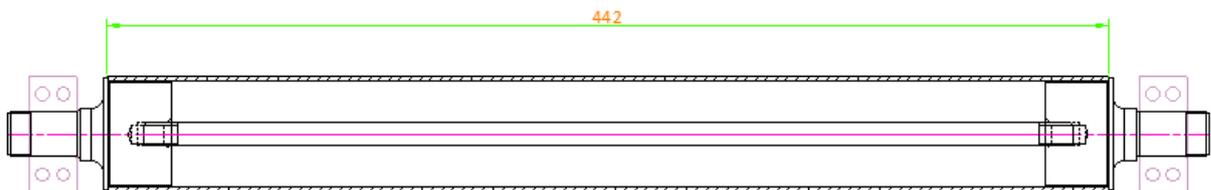


Figura 29, Diagrama de cuerpo libre del cabezal.

El mismo se compone de un tubo estructural redondo de 2" y 3,2mm de espesor, posee una longitud de 44,2cm y en su interior se aloja el eje horizontal, el cual sobresale de los extremos del cabezal y es ahí (en esos tramos sobresalientes) donde se apoyan las dos vigas



celosía que sostienen la estructura que soportará los paneles fotovoltaicos. Las fuerzas aplicadas en cada extremo son las ya calculadas por la presión del viento y el peso de los componentes de la estructura representada y hallada en el inciso anterior sobre cálculo de la resistencia del eje horizontal.

Para la representación del diagrama de cuerpo libre se considerará los vínculos en la posición de la pared del tubo vertical unido al tubo en cuestión por medio de un corte en boca de pescado.

- El diagrama de cuerpo libre es:

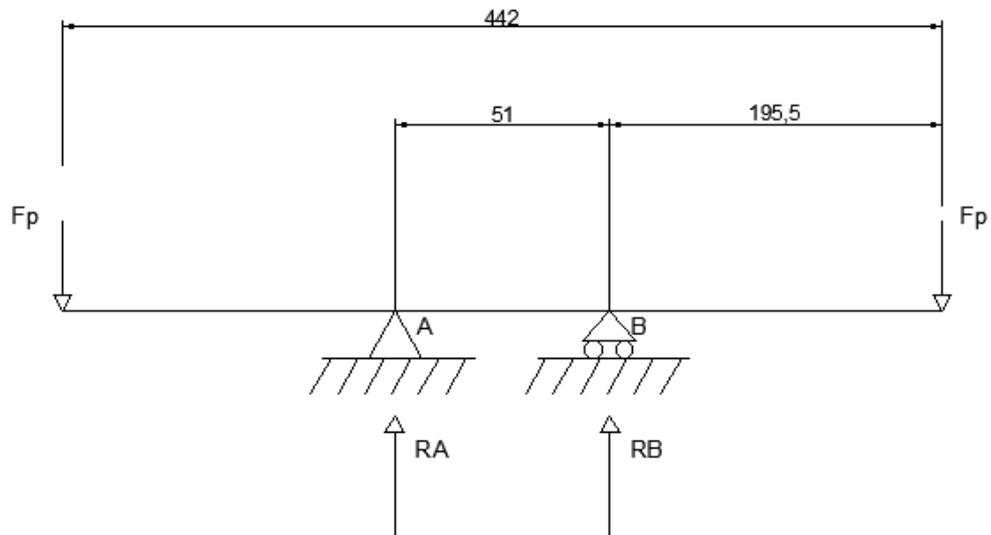


Fig. 30, Diagrama de cuerpo libre del cabezal.

- Cálculo de las reacciones:

$$\Sigma F_y = F_p \times 2 - R_A - R_B = 0, \text{ donde } F_p = 255\text{Kg}$$

$$\Sigma M_A = F_p \cdot 19,5\text{cm} + R_B \cdot 5,1\text{cm} - F_p \cdot (5,1+19,5)\text{cm} = 0$$

$$R_B = \frac{F_p \cdot (5,1+19,5)\text{cm} - F_p \cdot 19,5\text{cm}}{5,1\text{cm}}$$

$$R_B = \frac{255\text{kg} \cdot (5,1+19,5)\text{cm} - 255\text{kg} \cdot 19,5\text{cm}}{5,1\text{cm}} = 255\text{kg}$$



Volviendo a la ecuación de equilibrio de sumatoria de fuerzas en el eje “y”, tenemos:

$$R_A = F_p \times 2 - R_B = 255\text{kg} \times 2 - 255\text{kg} = 255\text{kg}$$

- Esfuerzos de corte:

Q para  $x = 0$  cm desde la izquierda;

$$Q = -F_p = -255\text{kg}$$

Q para  $x = 19,5$ cm;

$$Q = -F_p + R_A = -255\text{kg} + 255\text{kg} = 0\text{kg}$$

La misma representación se tiene para el extremo derecho.

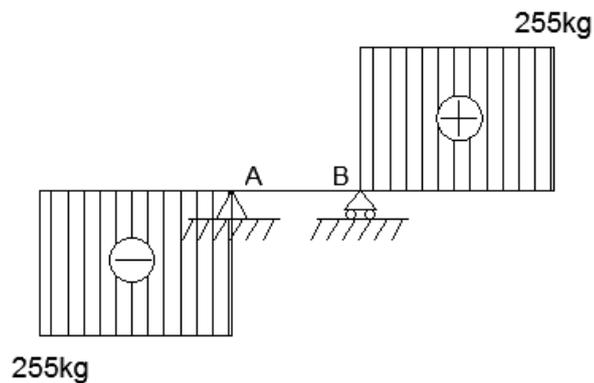


Fig. 31, Diagrama de esfuerzo de corte del cabezal.

- Cálculo a esfuerzo cortante:

Área del cabezal tubular de 2” y espesor 3,2mm;

$$A = \pi \times (r_2^2 - r_1^2) = \pi \times ((2,54\text{cm})^2 - (2,22\text{cm})^2) = 4,785\text{cm}^2$$

$$P_{\text{crit.}} = \tau_{\text{av}} \cdot \text{Área} = 1.476 \text{ kg/cm}^2 \times 4,785\text{cm}^2 = 7062\text{kg}$$

Siendo  $\tau_{\text{av}}$  la tensión a la cizalladura para un acero laminado en caliente con 0,2% de carbono.

La fuerza al corte es  $7062\text{kg}/255\text{kg} = 28$  veces menor que la fuerza crítica.

- Cálculo del momento flector:

$$M_f \text{ a } 0 \text{ cm desde la izq.} \Rightarrow F_p \times 0\text{cm} = -255\text{kg} \times 0\text{cm} = 0$$

$$M_f \text{ a } 19,5\text{cm} \Rightarrow -R_A \times 19,5\text{cm} = -255\text{kg} \times 19,5\text{cm} = -4985\text{kgcm}$$

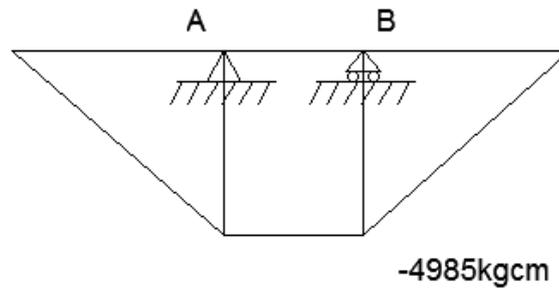


Figura 32, Diagrama de momento flector del cabezal.

Por lo que la tensión axial en la fibra más alejada aplicando la fórmula de Navier será:

$$I_{x-x} = \pi/4 \times (r_2^4 - r_1^4) = \pi/4 \times ((2,54\text{cm})^4 - (2,34\text{cm})^4) = 9,14\text{cm}^4$$

$$\sigma_{adm} = M_{f\text{máx}} \cdot y / I_{x-x} = 4.985\text{kgcm} \cdot 2,54\text{cm} / 9,14\text{cm}^4 =$$

$$\mathbf{1.385\text{kg/cm}^2 < 3.167\text{kg/cm}^2}$$

Siendo “y” la distancia del eje neutro a la fibra más lejana.

El coeficiente de seguridad será de:  $C_s = 3.167\text{kg/cm}^2 / 1385\text{kg/cm}^2 = \mathbf{2,28}$

- Cálculo de la flecha bajo la presión del viento

$$\delta_{\text{máx.}} = \frac{P \times l^3}{3 \times E \times I} = \frac{255\text{kg} \times (19,5\text{cm})^3}{3 \times 2,1 \times 10^6 \times 9,14\text{cm}^4} = 0,0328\text{cm} = 0,328\text{mm}$$

$$\Theta = \frac{P \times l^2}{2 \times E \times I} = \frac{255\text{kg} \times (19,5\text{cm})^2}{2 \times 2,1 \times 10^6 \times 9,14\text{cm}^4} = 0,00252^\circ$$

- Cálculo de la flecha bajo la acción de la carga estática;

$$\delta_{\text{máx.}} = \frac{P \times l^3}{3 \times E \times I} = \frac{23\text{kg} \times (19,5\text{cm})^3}{3 \times 2,1 \times 10^6 \times 9,14\text{cm}^4} = 0,00296\text{cm} = 0,0296\text{mm}$$

$$\Theta = \frac{P \times l^2}{2 \times E \times I} = \frac{23\text{kg} \times (19,5\text{cm})^2}{2 \times 2,1 \times 10^6 \times 9,14\text{cm}^4} = 0,000227^\circ$$

### 11.5 Cálculo de Resistencia del apoyo reticulado

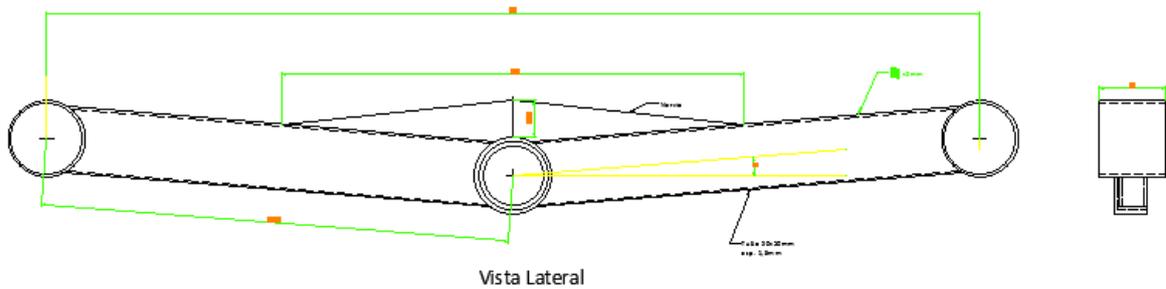


Figura 33, Estructura cabezal..

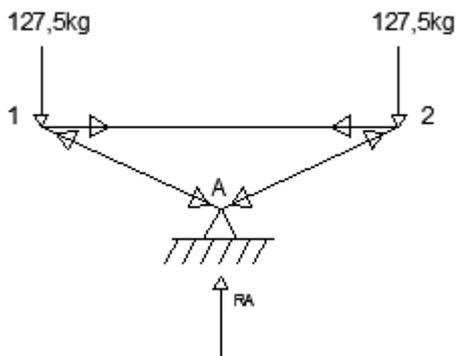


Fig. 34, Estados de esfuerzos de reacción en barras.

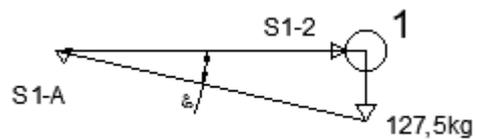


Fig. 35, Método de los Nudos.

Barra	Estado de la barra	Reacción en barra
1-2	Tracción	<i>Compresión</i>
1-A	Compresión	<i>Tracción</i>
2-A	Compresión	<i>Tracción</i>

Cálculo de los esfuerzos de las barras que componen el apoyo reticulado por el método de los nudos o de Cremona-Maxwell.

Nodo 1 = Nodo 2:

- Sumatoria de fuerza vertical;

$$\Sigma FV = F - S_{1-A} \sin 5^\circ = 0 \Rightarrow S_{1-A} = F / \sin (5)^\circ = 127,5\text{kg} / \sin (5)^\circ = 1463\text{kg}$$

- Sumatoria de fuerza horizontal;

$$\Sigma FH = S_{1-A} \cos (5^\circ) - S_{1-2} = 0 \Rightarrow S_{1-2} = 1463\text{kg} \cdot \cos (5)^\circ = 1457\text{kg}$$

- Cálculo de resistencia a tracción de la barra 1-2;

La barra 1-2 se conforma de una planchuela de espesor 6,35mm (1/4") x 30mm.

$$\sigma_{adm} = F \times 2 / \text{área} = 1457\text{kg} \times 2 / 1,9\text{cm}^2 = 1534\text{kg/cm}^2 < 2.460\text{kg/cm}^2.$$

Para el acero laminado en caliente con 0,2% de carbono la tensión de proporcionalidad es de 2460kg/cm<sup>2</sup>, siendo la tensión de cizalladura de 1.476 kg/cm<sup>2</sup>.

Se duplica la fuerza ya que se considera que sobre la barra actúan las fuerzas de los dos puntos o nodos en cuestión.

- Barras S<sub>1-A</sub> y S<sub>2-A</sub> a compresión, se calculará por pandeo con los extremos empotrados;

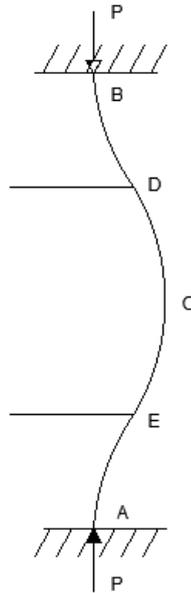


Figura 36, Esquema de columna empotrada en sus extremos.

Figura extraída del Apunte; Teoría de Pandeo, unidad 3, Cátedra Estabilidad II, Prof. Ing. Tossone Hugo.

Este caso de pandeo presenta una onda cosenoidal completa que tiene puntos de inflexión en D y E. Luego cada trozo extremo se comporta como una simple columna cantilever de longitud L/4, de esta manera se tiene por Euler;

$$P_{cr.} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{L_e^2}$$

Donde;

P<sub>cr.</sub>: Carga crítica,

E: es el módulo de elasticidad que para el acero es  $2,1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ ,

I : es el momento de Inercia en cualquiera de los dos ejes x-x o y-y al ser un área cuadrada, es decir, se tiene un único pandeo para ambos ejes.

L<sub>e</sub>: longitud efectiva de pandeo.

Pero primero se calculará la esbeltez para determinar la aplicabilidad de la fórmula de Euler, es decir, si la tensión crítica de pandeo es mayor al límite de proporcionalidad dándose esto para una esbeltez menor a la esbeltez límite, no será aplicable la fórmula de Euler, donde la esbeltez mínima se calcula de la siguiente manera:

$$\lambda_{\text{lim}} = \pi \cdot (E/\sigma_p)^{1/2}$$

Donde;

$\lambda_{\text{lim}}$  : esbeltez límite

E: Modulo de elasticidad =  $2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

$\sigma_p$  : límite de fluencia mínimo para TE-20 (tubo rectangular) =  $2.748 \text{ kg/cm}^2$

$$\lambda_{\text{lim}} = \pi \cdot (2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 / 2.748 \text{ kg/cm}^2)^{1/2} = 86,84$$

y la esbeltez de la barra es:

$$\lambda = L_e / i_{\text{min}}$$

Donde;

$\lambda$  : esbeltez

$L_e$  : longitud equivalente =  $\alpha \cdot L = 0,5 \times L = 0,5 \times 35 \text{ cm} = 17,5 \text{ cm}$

$i_{\text{min}}$  : radio de giro =  $1,098 \text{ cm}$

Entonces:

$$\lambda = 0,5 \times 35 \text{ cm} / 1,098 \text{ cm} = 15,93 < 86,84$$

De esta manera se comprueba que no es aplicable la ecuación de Euler, este es un caso de pandeo con deformaciones anelásticas, por lo que se aplicará el Método Empírico experimental de Tetmajer, el cual propuso ajustar los resultados de los ensayos con una línea que en particular para el acero es una recta del tipo:

$$\sigma_k = \alpha - b \cdot \lambda$$

Donde;

$\alpha$  y  $b$  son coeficientes que dependen del tipo de material, por ejemplo para el acero St 37 (A-37 ó F24):  $\alpha=310 \text{ MPa}$ ,  $b = 1,14 \text{ MPa}$ .

Para esbelteces muy pequeñas, la tensión  $\sigma_k$  según la recta de Tetmajer, se acercaría al valor  $310 \text{ MPa}$ . No obstante como el material alcanza la fluencia aproximadamente para el valor de  $\sigma_f = 240 \text{ MPa}$ , dicha tensión de  $310 \text{ MPa}$  no se puede alcanzar.

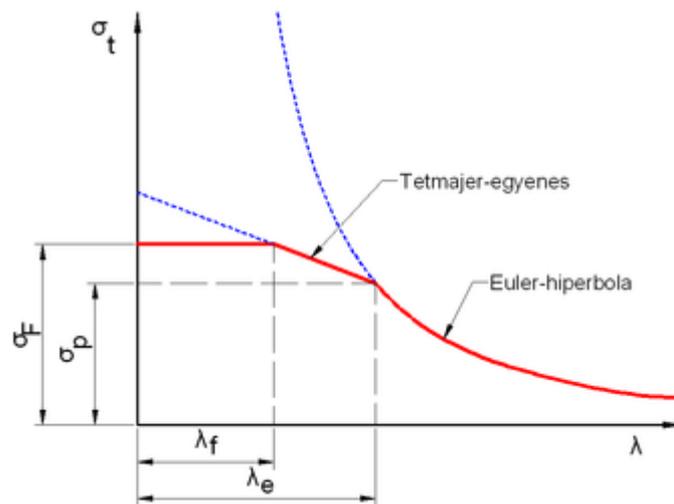


Fig. 37, Gráfica de la recta de Tetmajer e Hipérbola de Euler.

Figura extraída del Apunte; Teoría de Pandeo, unidad 3, Cátedra Estabilidad II, Prof. Ing. Tossone Hugo.

Se observa en la gráfica que la recta de Tetmajer solo es aplicable entre la tensión de fluencia ( $\sigma_f$ ) y la tensión de proporcionalidad ( $\sigma_p$ ).

De esta manera se tiene:

$$\sigma_k = 310\text{MPa} - 1,14\text{MPa} \cdot 15,93 = 292\text{MPa} < 310\text{MPa}$$

Para esbelteces muy pequeñas los valores de la tensión crítica se alinearán sobre la recta horizontal de valor  $\sigma_f$  (tensión de fluencia).

Se aplicará el dimensionado “directo” de barras comprimidas (Método “Domhke”).

Este método se denomina “directo”, porque su aplicación evita realizar muchos tanteos en el proceso de dimensionado y verificación al pandeo.

Los pasos son los siguientes;

1. Se calcula;

$$\zeta = ((Z \cdot \sigma_{adm} \cdot Le^2) / P)^{1/2}$$

Donde;

Z: coeficiente de semejanza obtenido de tabla.  $Z = 28 \cdot t/a$ , siendo t el espesor y “a” el valor de un lado.

$\sigma_{adm}$ : tensión admisible

Le: longitud equivalente =  $\alpha \cdot L = 0,5 \cdot 35\text{cm} = 17,5\text{cm}$

P: Carga = 1423kg



Entonces se tiene:

$$Z = 28 \cdot 1,6\text{mm} / 50\text{mm} = 0,896$$

$$z = ((0,896 \cdot 2.748\text{kg/cm}^2 \cdot (17,5\text{cm})^2) / 1423\text{kg})^{1/2} = 23$$

2. Con ese valor de  $z$  se entra en la tabla de  $\omega = f(z)$  para el acero que corresponda (St-37, St-52).

Para un acero St-37;  $\omega = 1,045$

3. Con el valor de  $\omega$  obtenido se calcula un primer valor de la sección F:

$$F = P \cdot \omega / \sigma_{adm}$$

$$F = 1423\text{kg} \cdot 1,045 / 2748\text{kg/cm}^2 = 0,541\text{cm}^2$$

4. Se busca en la tabla de perfiles la sección más próxima, pero ya se ha elegido un tipo de caño estructural 20x50mm por 1,6mm de espesor con un área de 2,138cm<sup>2</sup>, que supera ampliamente lo calculado y con un radio de giro de 1,74cm.

5. Con la sección seleccionada se procede a calcular la esbeltez, la cual ya ha sido determinada anteriormente y dio un valor de 15,93.

6. Con el valor de la esbeltez se busca  $\omega$  en la tabla “Coeficiente de pandeo según la norma DIN 4114” (de doble entrada)  $\omega = f(\lambda)$  para el acero correspondiente, que en nuestro caso es el St-37. De esta manera  $\omega$  es 1,04 (que es el valor mínimo tabulado).

7. Se verifica entonces que:

$$P / F \leq \sigma_{adm} / \omega$$

Donde F (sección) y  $\omega$  son los valores obtenidos de la sección previamente seleccionada del paso 6.

$$1423\text{kg} / 2,138\text{cm}^2 \leq 2748\text{kg/cm}^2 / 1,045$$

$$665,57 \text{ kg/cm}^2 \leq 2629,66\text{kg/cm}^2$$



Se puede apreciar que la sección seleccionada previamente verifica y posee un gran margen de seguridad, aún así se comprobará por la sección que resulta del cálculo del método Domhke que era de  $0,538\text{cm}^2$ .

$$1423\text{kg} / 0,541\text{cm}^2 \leq 2748\text{kg/cm}^2 / 1,045$$

$$2630\text{kg/cm}^2 \leq 2629,66\text{kg/cm}^2$$

Se observa que para la sección obtenida por el método se estaría en el límite sin margen de seguridad.

## **11.6 Cálculo de Resistencia de la columna móvil.**

### **11.6.1 Cálculo al corte y flexión.**

- Datos técnicos del tubo seleccionado:

Diámetro:  $3'' = 76,2\text{mm}$

Área:  $7,34\text{cm}^2$

Espesor:  $3,20\text{mm}$

I y-y :  $49,89\text{cm}^4$

i :  $2,6\text{cm}$

Peso:  $5,76\text{ kg/m}$

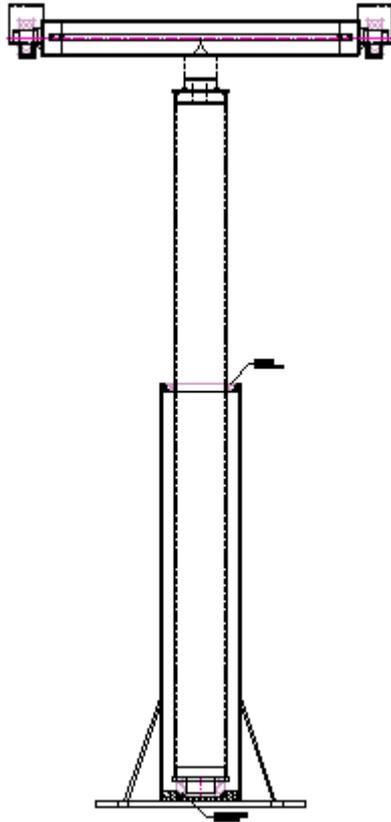


Figura 38, Esquema de la columna fija portante.

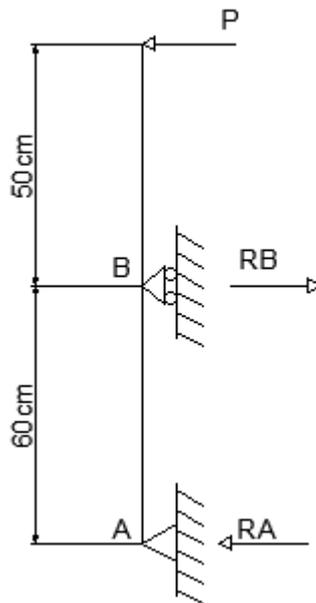


Fig. 39, Esquema de cuerpo libre de la columna fija portante.



Cálculo de las reacciones:

$\Sigma F_x = R_A + P_t - R_B = 0 \Rightarrow R_B = R_A + P_t = 425\text{kg} + 510\text{kg}$  (Carga total de la acción del viento).

$R_B = 935\text{kg}$

$\Sigma M_B = R_A \cdot 60\text{cm} - P_t \cdot 50\text{cm} \Rightarrow R_A = \frac{510\text{kg} \times 50\text{cm}}{60\text{cm}} = 425\text{kg}$

- El diagrama de esfuerzo de corte es:

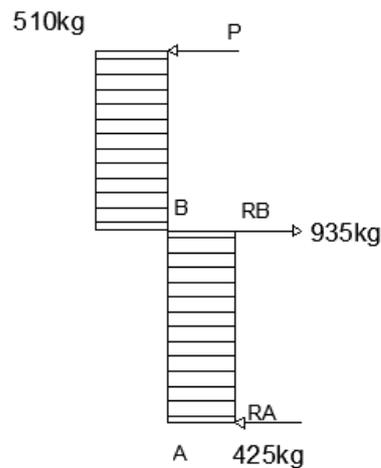


Figura 40, Diagrama de esfuerzo de corte.

- El momento flector máximo resulta.

$\Sigma M_f$  desde  $y=0\text{cm}$ ,  $M_f = 0$

$\Sigma M_f$  en B desde  $y = 93,15\text{cm}$ ,  $M_f = P_t \cdot 50\text{cm} = 510\text{kg} \times 50\text{cm} = 25.500\text{kgcm}$

$\Sigma M_f$  en A desde  $y= 110\text{cm}$ ,  $M_f = P_t \cdot (50 + 60)\text{cm} - R_B \times 60\text{cm} =$

$M_f = 510\text{kg} \times (50 + 60)\text{cm} - 935\text{kg} \times 60\text{cm} = 0$

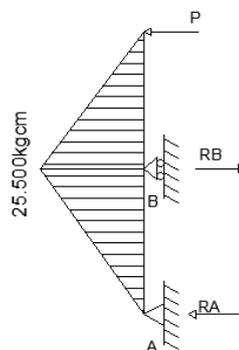


Figura 41, Diagrama de momento flector.

- Cálculo por esfuerzo de corte;

$$P_{crit.} = \tau_{av} \cdot \text{Área} = 1.476 \text{ kg/cm}^2 \times 7,34\text{cm}^2 = 10.833\text{kg}$$

Siendo  $\tau_{av}$  la tensión a la cizalladura para un acero laminado en caliente con 0,2% de carbono.

La fuerza al corte es  $10.833\text{kg}/942\text{kg} = 11,5$  veces menor que la fuerza crítica.

- A flexión;

$$\sigma_1 = M_{f\text{máx}} \cdot y / I_{x-x} = 25.500\text{kgcm} \cdot 3,81\text{cm} / 49,89\text{cm}^4 = 1.947,38\text{kg/cm}^2$$

Siendo “y” la distancia del eje neutro a la fibra más lejana.

Este valor de tensión que se presenta en la fibra más alejada se representa en tracción en unas fibras y compresión en el lado opuesto del eje neutro, como se observa en la figura siguiente representada por una recta.

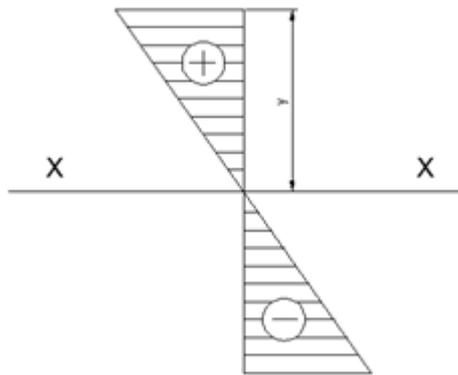


Figura 42, Diagrama de tensiones axiales.

Si a este diagrama le sumamos el diagrama de tensión normal a compresión que sufre la parte de la columna conformada por el eje vertical entre su extremo libre y el vínculo A.

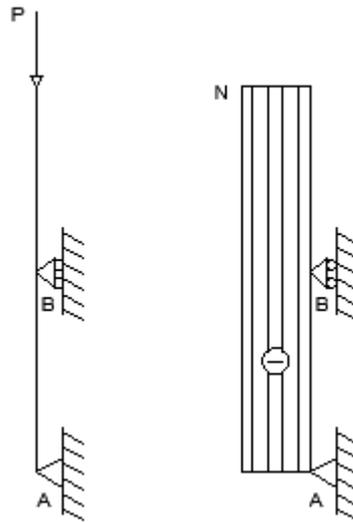


Figura 43, Diagrama de cuerpo libre y de tensiones normales.

La tensión normal es creada por el peso del conjunto que integra el cabezal y eje horizontal más el eje vertical móvil.

Dicho peso total resulta de los siguientes componentes (ítem):

- Paneles Fotovoltaicos:  $3 \times 23\text{kg} = 69\text{kg}$
- Vigas de apoyo de paneles:  $2 \times 3\text{m} \times 3,75\text{kg/m} = 22,5\text{kg}$
- Cabezal:
  - Apoyos de vigas sobre cabezal:  $4 \times 0,05 \times 2,72\text{kg/m} = 1,64\text{kg}$
  - Eje horizontal:  $0,454\text{m} \times 2,40\text{kg/m} = 1,1\text{kg}$
  - Estructuras reticulada:  $0,35\text{m} \times 4 \times 1,64\text{kg/m} = 2,29\text{kg}$
  - Elementos restantes:  $5\text{kg}$
- Columna vertical móvil:  $1,10\text{m} \times 5,76\text{kg/m} = 6,33\text{kg}$

$$\text{Peso total} = 107,866\text{kg} \approx \mathbf{108\text{kg}}$$

De esta manera y teniendo una sección de la columna vertical:

$$A = \pi \times ((r_2)^2 - (r_1)^2) = \pi \times ((3,81\text{cm})^2 - (3,49\text{cm})^2) = 7,34\text{cm}^2$$

De esta manera el valor de la tensión de compresión que actúa en todas las fibras del caño compuesto es de:

$$\sigma_2 = P / A = 108\text{kg} / 7,34\text{cm}^2 = 14,71\text{kg/cm}^2$$

Por lo que este valor de tensión será sumado al valor de la tensión axial a compresión generado por la flexión, entonces:

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_1 + \sigma_2 = 1.947,38\text{kg/cm}^2 + 14,71\text{kg/cm}^2 = 1962,1\text{kg/cm}^2 < \sigma_{\text{adm}} = 2748\text{kg/cm}^2$$

El coeficiente de seguridad es de:

$$C_s = 2.748\text{kg/cm}^2 / 1.962,1\text{kg/cm}^2 = 1,4$$

### 11.6.2 Cálculo al pandeo, Tramo: Cabezal y vínculo B

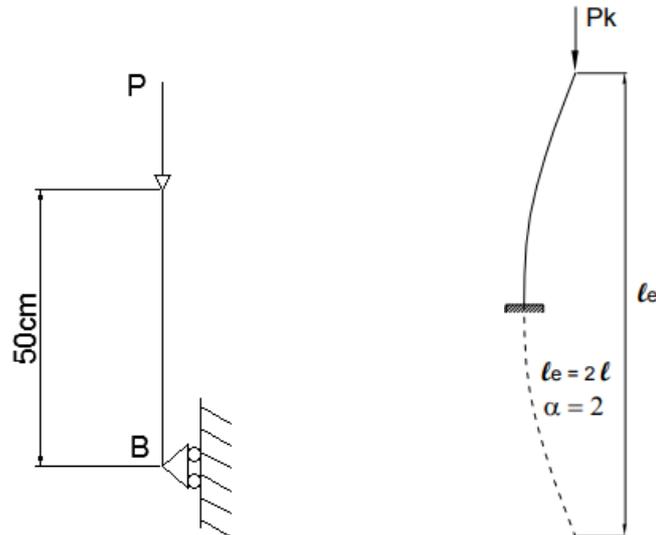


Figura 44, Diagrama de cuerpo libre y de longitud efectiva de pandeo.

Figura extraída del Apunte; Teoría de Pandeo, unidad 3, Cátedra Estabilidad II, Prof. Ing. Tossone Hugo.

Este caso es el de una columna AB empotrada en A y libre en B donde a la vez se aplica la carga centrada a la columna, se supone que la columna es perfectamente recta y de sección transversal uniforme, también se supone que el material es homogéneo y que se comporta elásticamente. La ecuación de Euler para este caso es;

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{x-x}}{4 \cdot L_e^2} =$$

Donde;

$P_{cr}$  : Carga critica,

E: es el modulo de elasticidad que para el acero es  $2,1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ ,

$I_{x-x}$  : es el momento de Inercia en cualquiera de los dos ejes x-x o y-y al ser un área cuadrada, es decir, se tiene un único pandeo para ambos ejes.

$L_e$ : longitud efectiva de pandeo =  $\alpha \cdot L = 2 \cdot L = 2 \cdot 50\text{cm} = 100\text{cm}$

Pero primero calcularemos la esbeltez para determinar la aplicabilidad de la formula de Euler, es decir, si la tensión critica de pandeo es mayor al límite de proporcionalidad dandose esto para una esbeltez menor a la esbeltez límite, no será aplicable la formula de Euler, donde la esbeltez mínima se calcula de la siguiente manera:

$$\lambda_{lim} = \pi \cdot (E/\sigma_p)^{1/2}$$

Donde;

$\lambda_{lim}$  : esbeltez límite

E: Modulo de elasticidad =  $2,1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$

$\sigma_p$  : tensión de proporcionalidad =  $2.460 \text{kg/cm}^2$

$$\lambda_{lim} = \pi \cdot (2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 / 2.460 \text{kg/cm}^2)^{1/2} = 91,78$$

y la esbeltez de la barra es:

$$\lambda = L_e / i_{min}$$

Donde;

$\lambda$  : esbeltez

$L_e$  : longitud equivalente =  $\alpha \times L = 2 \times 50\text{cm} = 100\text{cm}$

$i_{min}$  : radio de giro =  $(I_{x-x} / A)^{1/2} = 2,6\text{cm}$



De esta manera:

$$\lambda = 100\text{cm} / 2,6\text{cm} = 38,46 < 91,78$$

De esta manera se comprueba que no es aplicable la ecuación de Euler, este es un caso de pandeo con deformaciones anelásticas, por lo que se aplicará el Método Empírico experimental de Tetmajer, el cual propuso ajustar los resultados de los ensayos con una línea que en particular para el acero es una recta del tipo:

$$\sigma_k = \alpha - b \cdot \lambda$$

Donde;

$\alpha$  y  $b$  son coeficientes que dependen del tipo de material, por ejemplo para el acero St 37 (A-37 ó F24):  $\alpha=310\text{MPa}$ ,  $b = 1,14\text{MPa}$ .

Para esbelteces muy pequeñas, la tensión  $\sigma_k$  según la recta de Tetmajer, se acercaría al valor 310. No obstante como el material alcanza la fluencia aproximadamente para el valor de  $\sigma_f = 240\text{MPa}$ , dicha tensión de 310 MPa no se puede alcanzar.

De esta manera se tiene:

$$\sigma_k = 310\text{MPa} - 1,14\text{MPa} \cdot 38,46 = 266,15\text{MPa} < 310\text{MPa}$$

Para esbelteces muy pequeñas los valores de la tensión crítica se alinearán sobre la recta horizontal de valor  $\sigma_f$ , vista en la gráfica 35.

Se aplicará el dimensionado “directo” de barras comprimidas (Método “Domhke”).

Este método se denomina “directo” como ya se explicó en el inciso anterior.

Los pasos son los siguientes;

1. Se calcula;

$$\bar{\lambda} = ((Z \cdot \sigma_{adm} \cdot Le^2) / P)^{1/2}$$

Donde,

Z: coeficiente de semejanza obtenido de tabla,  $Z = 28 \cdot t / d$ , siendo  $t$  el espesor y “ $d$ ” el valor del diámetro.

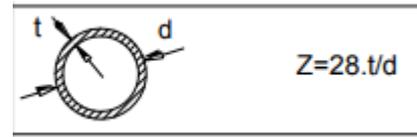
$\sigma_{adm}$ : tensión admisible

Le: longitud equivalente =  $\alpha \cdot L = 2 \cdot 50\text{cm} = 100\text{cm}$

P: Carga = 108kg

Entonces se tiene:

$$Z = 28 \cdot 3,2\text{mm} / 76,2\text{mm} = 1,175$$



$$\bar{z} = ((1,175 \cdot 2460\text{kg/cm}^2 \cdot (100\text{cm})^2) / 108\text{kg})^{1/2} = 517,34$$

2. Con ese valor de  $\bar{z}$  se entra en la tabla de  $\omega = f(\bar{z})$  para el acero que corresponda (St-37, St-52).

Como  $\bar{z}$  es mayor a 180 se aplica la siguiente ecuación;

$$\text{Para un acero St-37; } \omega = \bar{z} / 76,95 = 517,34 / 76,95 = 6,72$$

3. Con el valor de  $\omega$  obtenido se calcula un primer valor de la sección F:

$$F = P \cdot \omega / \sigma_{\text{adm}}$$

$$F = 108\text{kg} \cdot 6,72 / 2460\text{kg/cm}^2 = 0,29\text{cm}^2$$

4. Se busca en la tabla de perfiles la sección más próxima, pero ya se ha diseñado con un tubo estructural redondo de 76,2mm de diámetro exterior por 3,2mm de espesor con un área transversal de 7,34cm<sup>2</sup> y un radio de giro de 2,6cm.
5. Con la sección seleccionada se procede a calcular la esbeltez, la cual ya ha sido determinada anteriormente y dio un valor de 38,46.
6. Con el valor de la esbeltez se busca  $\omega$  en la tabla “Coeficiente de pandeo según la norma DIN 4114” (de doble entrada)  $\omega = f(\lambda)$  para el acero correspondiente, que en nuestro caso es el St-37. De esta manera  $\omega$  es 1,12. Se verifica entonces que:

$$P / F \leq \sigma_{\text{adm}} / \omega$$

Donde F (sección) y  $\omega$  son los valores obtenidos de la sección previamente seleccionada y del paso 6.

$$108\text{kg} / 7,34\text{cm}^2 \leq 2.460\text{kg/cm}^2 / 1,12$$

$$14,71 \text{ kg/cm}^2 \leq 2.196,43\text{kg/cm}^2$$



Se puede apreciar que la sección seleccionada previamente no solo verifica sino que está sobredimensionada para este esfuerzo en particular, pero ya se observó que el esfuerzo crítico es a flexión debida a la acción del viento.

### 11.6.3 Cálculo al pandeo, Tramo: Cabezal y vínculo B con carga excentrica.

$$\sigma_{c.\max} = \frac{P}{F} \left[ 1 + \frac{e \cdot c}{i_y^2} \cdot \sec \left( \frac{\ell}{2 \cdot i_y} \sqrt{\frac{P}{F \cdot E}} \right) \right]$$

Donde

P: carga = 108kg

F: sección = 7,34cm<sup>2</sup>

E: modulo elástico = 2,1 x 10<sup>6</sup> kg/cm<sup>2</sup>

iy: radio de giro = 2,6cm

Iy: 49,89cm<sup>4</sup>

e: exentricidad de la carga = 7cm

c: distancia a la fibra considerada = 10,8cm

l: longitud de la columna = 50cm

$$\sigma_{c.\max.} = 108/7,34 \times [ 1 + 7 \times 10,8 / (2,6)^2 \times \sec (50 / (2 \times 2,6) \times (108 / (7,34 \times 2,1 \times 10^6))^{0,5}) ]$$

$$\sigma_{c.\max.} = 179,27 \text{kg/cm}^2$$

La deformación máxima resulta de:

$$\delta = e \cdot \frac{1 - \cos \frac{k \cdot \ell}{2}}{\cos \frac{k \cdot \ell}{2}}$$

Siendo:

$$\frac{k \cdot \ell}{2} = \frac{\ell}{2} \cdot \sqrt{\frac{P}{E \cdot I_y}}$$

$$K \times l / 2 = 50/2 \times (108/2,1 \times 10^6 \times 49,89)^{0,5} = 0,025 \text{rad} \cong 1,45^\circ$$

$$\delta = 7 \times ((1 - \cos(1,43)) / \cos(1,45)) = 0,00225 \text{cm} = 0,0225 \text{mm}$$

11.6.4 Cálculo al pandeo, Tramo: vínculo B al vínculo A.

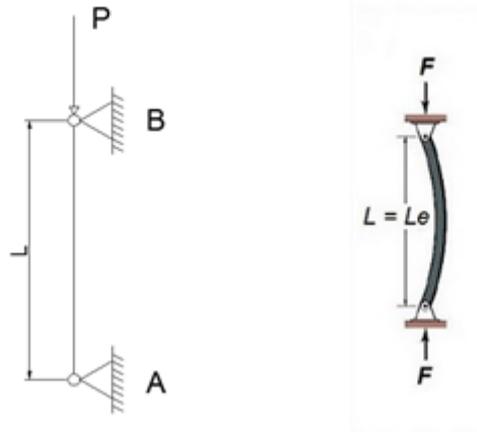


Figura 45, Diagrama de cuerpo libre y de longitud efectiva de pandeo.

<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn131.html>

Este caso es el de una columna AB donde se aplica la carga centrada a la columna, se considera que la columna es perfectamente recta y de sección transversal uniforme, también se considera que el material es homogéneo y que se comporta elásticamente. La ecuación de Euler para este caso es;

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{x-x}}{4 \cdot L_e^2} =$$

Donde;

$P_{cr}$  : Carga crítica,

E: es el modulo de elasticidad que para el acero es  $2,1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ ,

$I_{x-x}$  : es el momento de Inercia en cualquiera de los dos ejes x-x o y-y al ser un área cuadrada, es decir, se tiene un único pandeo para ambos ejes.

$L_e$ : longitud efectiva de pandeo  $= \alpha \cdot L = 2 \cdot L = 2 \cdot 60\text{cm} = 120\text{cm}$

Pero primero calcularemos la esbeltez para determinar la aplicabilidad de la formula de Euler, es decir, si la tensión crítica de pandeo es mayor al límite de proporcionalidad dandose



esto para una esbeltez menor a la esbeltez límite, no será aplicable la formula de Euler, donde la esbeltez mínima se cálcula de la siguiente manera:

$$\lambda_{\text{lim}} = \pi \cdot (E/\sigma_p)^{1/2}$$

Donde;

$\lambda_{\text{lim}}$  : esbeltez límite

E: Modulo de elasticidad =  $2,1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$

$\sigma_p$  : tensión de proporcionalidad =  $2.460 \text{kg/cm}^2$

$$\lambda_{\text{lim}} = \pi \cdot (2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 / 2.460 \text{kg/cm}^2)^{1/2} = 91,78$$

y la esbeltez de la barra es:

$$\lambda = L_e / i_{\text{min}}$$

Donde;

$\lambda$  : esbeltez

$L_e$  : longitud equivalente =  $\alpha \times L = 2 \times 60 \text{cm} = 120 \text{cm}$

$i_{\text{min}}$  : radio de giro =  $(I_{x-x} / A)^{1/2} = 2,6 \text{cm}$

De esta manera:

$$\lambda = 120 \text{cm} / 2,6 \text{cm} = 46,15 < 91,78$$

De esta manera se comprueba que no es aplicable la ecuación de Euler, este es un caso de pandeo con deformaciones anelásticas, por lo que se aplicará el Método Empírico experimental de Tetmajer, el cual propuso ajustar los resultados de los ensayos con una línea que en particular para el acero es una recta del tipo:

$$\sigma_k = a - b \cdot \lambda$$

Donde;

$a$  y  $b$  son coeficientes que dependen del tipo de material, por ejemplo para el acero St 37 (A-37 ó F24):  $a=310 \text{MPa}$ ,  $b = 1,14 \text{MPa}$ .

Para esbelteces muy pequeñas, la tensión  $\sigma_k$  según la recta de Tetmajer, se acercaría al valor 310. No obstante como el material alcanza la fluencia aproximadamente para el valor de  $\sigma_f = 240\text{MPa}$ , dicha tensión de 310 MPa no se puede alcanzar.

De esta manera se tiene:

$$\sigma_k = 310\text{MPa} - 1,14\text{MPa} \cdot 46,15 = 257,38\text{MPa} < 310\text{MPa}$$

Para esbelteces muy pequeñas los valores de la tensión crítica se alinearán sobre la recta horizontal de valor  $\sigma_f$ , vista en la gráfica 35.

Se aplicará el dimensionado “directo” de barras comprimidas (Método “Domhke”).

Este método se denomina “directo” como ya se explicó en el inciso anterior.

Los pasos son los siguientes;

1. Se calcula;

$$\xi = ((Z \cdot \sigma_{adm} \cdot Le^2) / P)^{1/2}$$

Donde,

Z: coeficiente de semejanza obtenido de tabla,  $Z = 28 \cdot t/d$ , siendo t el espesor y “d” el valor del diámetro.

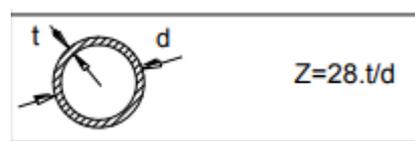
$\sigma_{adm}$ : tensión admisible

Le: longitud equivalente =  $\alpha \cdot L = 2 \cdot 60\text{cm} = 120\text{cm}$

P: Carga = 108kg

Entonces se tiene:

$$Z = 28 \cdot 3,2\text{mm} / 76,2\text{mm} = 1,175$$



$$\xi = ((1,175 \cdot 2460\text{kg/cm}^2 \cdot (120\text{cm})^2) / 108\text{kg})^{1/2} = 620,8$$

2. Con ese valor de  $\zeta$  se entra en la tabla de  $\omega = f(\zeta)$  para el acero que corresponda (St-37, St-52).

Como  $\zeta$  es mayor a 180 se aplica la siguiente ecuación;

$$\text{Para un acero St-37; } \omega = \zeta / 76,95 = 620,8/76,95 = 8,07$$

3. Con el valor de  $\omega$  obtenido se calcula un primer valor de la sección F:

$$F = P \cdot \omega / \sigma_{adm}$$

$$F = 108\text{kg} \cdot 8,07 / 2460\text{kg/cm}^2 = 0,35\text{cm}^2$$

4. Se busca en la tabla de perfiles la sección más próxima, pero ya se ha diseñado con un tubo estructural redondo de 76,2mm de diámetro exterior por 3,2mm de espesor con un área transversal de 7,34cm<sup>2</sup> y un radio de giro de 2,6cm.
5. Con la sección seleccionada se procede a calcular la esbeltez, la cual ya ha sido determinada anteriormente y dio un valor de 46,15.
6. Con el valor de la esbeltez se busca  $\omega$  en la tabla “Coeficiente de pandeo según la norma DIN 4114” (de doble entrada)  $\omega = f(\lambda)$  para el acero correspondiente, que en nuestro caso es el St-37. De esta manera  $\omega$  es 1,13. Se verifica entonces que:

$$P / F \leq \sigma_{adm} / \omega$$

Donde F (sección) y  $\omega$  son los valores obtenidos de la sección previamente seleccionada y del paso 6.

$$108\text{kg} / 7,34\text{cm}^2 \leq 2.460\text{kg/cm}^2 / 1,13$$

$$14,71 \text{ kg/cm}^2 \leq 2.177\text{kg/cm}^2$$

Se puede apreciar que la sección seleccionada previamente no solo verifica sino que está sobredimensionada para este esfuerzo en particular, pero ya se observó que el esfuerzo crítico es a flexión debida a la acción del viento.

### 11.7 Cálculo de resistencia de la columna fija

En este caso se tendrá en cuenta el esfuerzo a flexión debida a la acción del viento actuando en el cabezal, se considerará en el centro del mismo y la columna como empotrada en su base.

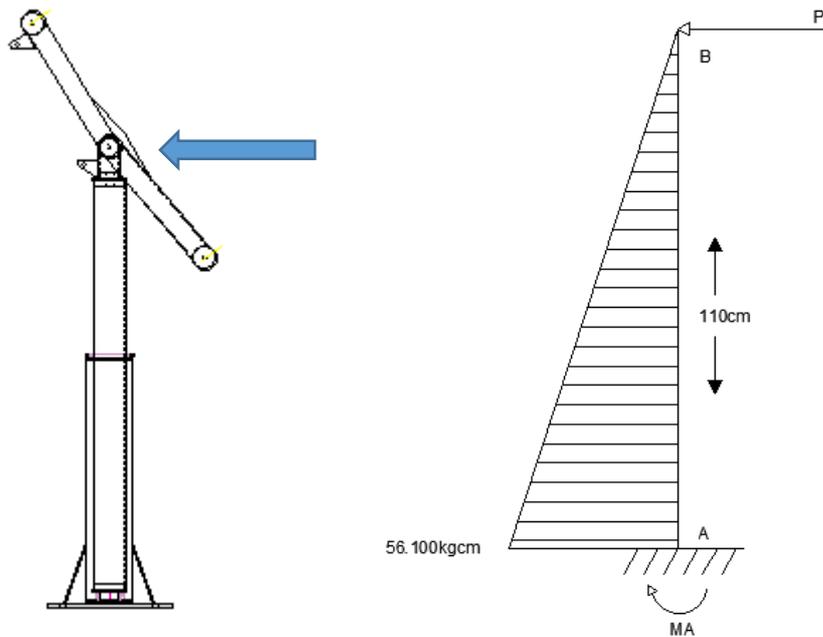


Figura 46, Acción del viento y diagrama de momento flector.

Cálculo de las reacciones:

$$\Sigma F_x = R_A - P_t = 0 \Rightarrow R_A = P_t = 510\text{kg (Carga total de la acción del viento).}$$

$$\Sigma M_B = R_A \cdot 110\text{cm} = 510\text{kg} \cdot 110\text{cm} = 56.100\text{kgcm} = M_A$$

Por lo que la tensión axial en la fibra más alejada aplicando la fórmula de Navier será:

$$\sigma = M_{f\text{máx}} \cdot y / I_{x-x} = 56.100\text{kgcm} \times 5,7\text{cm} / 175,67\text{cm}^4 = 1820\text{kg/cm}^2 < 3167\text{kg/cm}^2$$

Siendo 3.167kg/cm<sup>2</sup> la Resistencia a Tracción Mínima equivalente a 310MPa para un tubo estructural redondo de denominación TE-20\*.

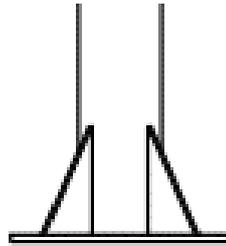
Siendo “y” la distancia del eje neutro a la fibra más lejana.

El coeficiente de seguridad es de:

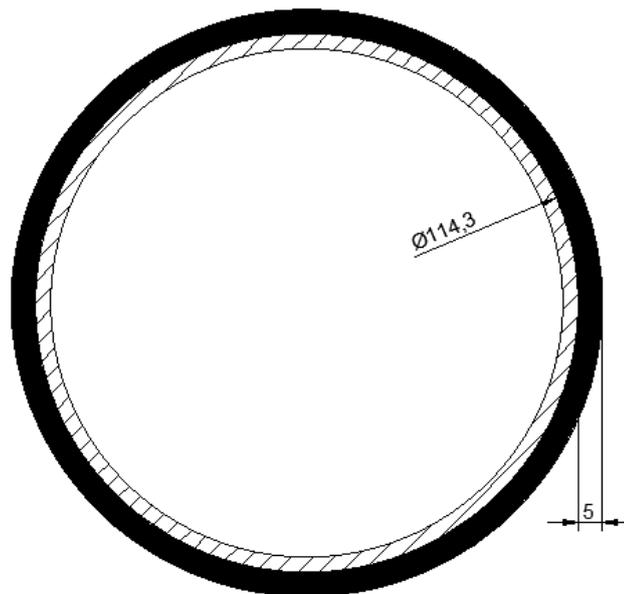
$$C_s = 3167\text{kg/cm}^2 / 1820\text{kg/cm}^2 = 1,74$$

### 11.8 Cálculo de Resistencia de la soldadura de la columna fija

La misma se basa suponiendo fija la planchuela de anclaje al hormigón y se calculará en base a la teoría expuesta por Joseph Edward Shigley y Charles R. Mischke.



*Figura 47, Esquema de cartelas soldadas a la columna inferior y la misma soldada a la placa de anclaje al hormigón.*



*Figura 48, Esquema sobre las dimensiones de la columna fija (montante) y el cordón de soldadura.*



Área de garganta (donde  $h$  es el espesor del cordón, borde):

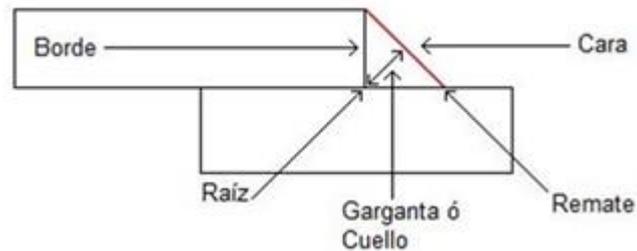


Fig. 63, Principales partes geométricas de un cordón de soldadura.

$$A = 1,414 \cdot \pi \cdot h \cdot r$$

$$A = 1,414 \cdot \pi \cdot 0,5\text{cm} \cdot (11,43\text{cm}/2 + 0,5)\text{cm} = 13,80\text{cm}^2$$

Segundo momento de área unitario:

$$I_u = \pi \cdot r^3 = \pi \cdot (6,215\text{cm})^3 = 754,18\text{cm}^3$$

Entonces, el segundo momento de área basado en la garganta de la junta es;

$$I = 0,707 \cdot h \cdot I_u$$

$$I = 0,707 \cdot 0,5\text{cm} \cdot 754,18\text{cm}^3 = 266,6\text{cm}^4$$

esfuerzo normal se halla ahora que es:

$$\tau = \sigma = M \cdot c / I = 56.100\text{kgcm} \cdot (6,215\text{cm}) / 266,6\text{cm}^4 = 1307,81 \text{ kg/cm}^2$$

siendo;

M: Momento flector = 56.100kgcm

c: la distancia del centro a la fibra más alejada del cordón = 6,215cm.

I: segundo momento de área basado en la garganta de la junta.



Ahora se especificarán en la tabla siguiente las propiedades mínimas a la tensión del metal soldante para soldadura al arco.

<b>NÚMERO DE ELECTRODO AWS</b>	<b>RESISTENCIA ÚLTIMA (MPa)</b>	<b>RESISTENCIA DE FLUENCIA (MPa)</b>	<b>ELONGACIÓN (%)</b>
E60xx	427	345	17-25
E70xx	482	393	22
E80xx	551	462	19
E90xx	620	531	14-17
E100xx	689	600	13-16
E120xx	827	737	14

*Tabla 16, Propiedades mínimas a la tensión del metal soldante para soldadura de arco. Extraído del Libro; Soldadura de los aceros, Aplicaciones – Manuel Reina Gomez, Tabla 2; Propiedades Mecánicas – página 133.*

Si convertimos el valor obtenido en  $\text{kg/cm}^2$  a MPa resulta 128,25, para lo cual aplicando un electrodo del E60xx en adelante se estará con seguridad en la soldadura.

Las cartelas se agregan para obtener un refuerzo de seguridad y rigidización.

## 11.9 Cálculo de Resistencia de las soldaduras de las cartelas de la columna inferior.

### 11.9.1 Cordones de la base o cateto menor (paralelo a la placa)

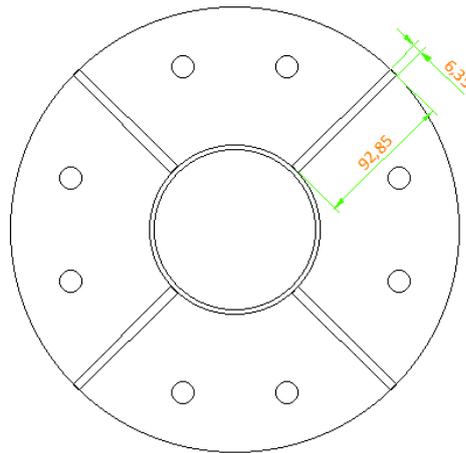


Figura 49, Esquema de cartelas distribuidas cada 90° en la columna inferior.

Se recomienda por norma española de la EAE (Estructuras de Acero en Edificación) que el ancho de la garganta (ver fig. 63) tiene que ser  $> 3\text{mm}$  para chapas de espesor menor a 10mm, y la chapa que se está utilizando es de 1/4" igual a 6,35mm de espesor.

En nuestro caso los lados o bordes del cordón tendrán 5mm, por lo que la garganta será de 3,53mm.

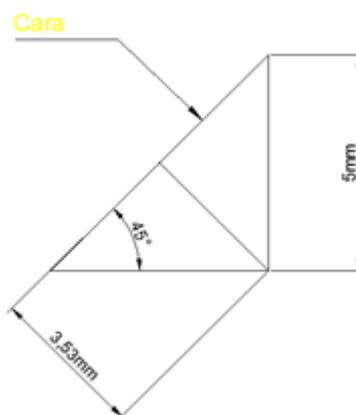
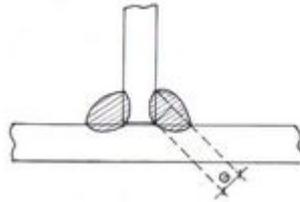


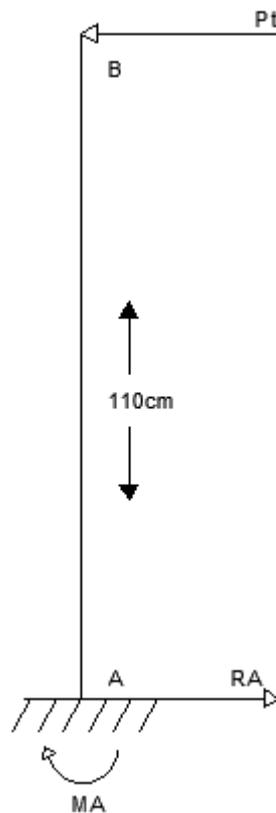
Figura 50, Esquema sobre medidas del cordón de soldadura.

La soldaduras que se ejecutarán en las cartelas, en la base del cateto menor que apoya sobre la placa de anclaje, será mediante soldadura en ángulo con unión a tope en T, donde G es la garganta de la soldadura.



*Figura 51, Esquema de soldadura en ángulo con unión a tope en T.*  
<https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd6731.pdf>

Para nuestro caso los cordones de soldadura del lado de la base de la cartela paralela con la placa de fijación al hormigón estarán sometidos a flexión según la fuerza horizontal (acción del viento) que actúa sobre el cabezal y a una distancia (brazo de palanca) de 110cm.



*Figura 52, Esquema de momento flector aplicado sobre las bases de las cartelas.*



Por otro lado, si se tiene que  $e \gg L$  (brazo de palanca  $\gg$  longitud del cordón de soldadura), es decir, si el momento flector es grande comparado con el esfuerzo cortante, puede utilizarse la fórmula simplificada siguiente según la EAE (Estructuras de Acero en Edificación), para el cálculo de la resistencia del cordón:

$$\sigma_c^* = \frac{3.55 \times F \times e}{a \times L^2} < \sigma_u$$

donde;

$\sigma_c^*$  : tensión de comparación

F: carga = Pt = 510kg

e: brazo de palanca

F x e: Momento flector = 56.100kgcm

L: longitud del cordón

a: valor de garganta del cordón

$\sigma_u$ : resistencia del cordón

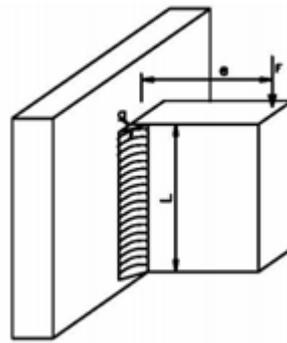


Figura 53, Esquema de ejemplo de indicación de parámetros de soldadura sometida a esfuerzo a flexión.  
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn46.html>

Entonces;

$$\sigma_c^* = \frac{3.55 \times 56.100 \text{kgcm}}{(0,353 \text{cm}) \times (6,215 \text{cm})^2} < \sigma_u$$

$$\sigma_c^* = 14.606,1 \text{kg/cm}^2$$

Pero teniendo en cuenta que son 2 cartelas de cada lado del eje y-y como se observa en la figura 65, en total 4, multiplicamos por 4 la distancia del cordón.

$$\sigma_c^* = \frac{3.55 \times 56.100 \text{kgcm}}{(0,353) \times (4 \times 6,215 \text{cm})^2} < \sigma_u$$

$$\sigma_c^* = 912,88 \text{ kg/cm}^2, \text{ que equivale a } 89,52 \text{MPa}$$

Por lo cual según el resultado anterior para soldar las cartelas se deberá usar electrodo AWS E60xx en adelante con una valor de tensión de fluencia de 345Mpa.

Ahora si aplicamos la teoría de Joseph Edward Shigley y Charles R. Mischke expuesta en la obra titulada Diseño en Ingeniería Mecánica, Ed. Mc Graw Hill (5° edición).

Se tiene;

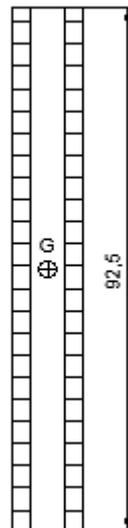


Figura 54, cordones de soldadura de las bases de la cartela paralelos al plano de acción del momento flector.

De esta manera:

$$\text{Área de garganta: } A = 1,414 \cdot h \cdot d$$

$$\text{Segundo momento de área unitario: } I_u = d^3/6$$

$$\text{Segundo momento del área basada en la garganta de la junta: } I = 0,707 \cdot h \cdot I_u$$

Así:

$$I_u = d^3/6 = (6,215 \text{cm})^3/6 = 60,02 \text{cm}^3$$

$$I = 0,707 \cdot h \cdot I_u = 0,707 \cdot 0,5 \text{cm} \cdot 60,02 \text{cm}^3 = 21,21 \text{cm}^4$$

Entonces:

$$\sigma = M \cdot c / I = 56.100\text{kgcm} \cdot (6,215\text{cm}/2) / 21,21\text{cm}^4 = 8.219,27 \text{ kg/cm}^2$$

Pero como tenemos 4 cartelas fraccionaremos el esfuerzo a flexión aplicado a las a todas ellas.

Entonces:

$$\sigma = M/4 \cdot c / I = 56.100\text{kgcm}/4 \cdot (6,215\text{cm}/2) / 21,21\text{cm}^4 = 2.054,82\text{kg/cm}^2$$

que equivale a 201,51MPa.

Por lo que se debería usar un electrodo clasificado por la AWS (American Welding Society) de E60xx en adelante.

En la siguiente figura se podra apreciar la decodificación de los electrodos estandarizados por AWS (American Welding Society);

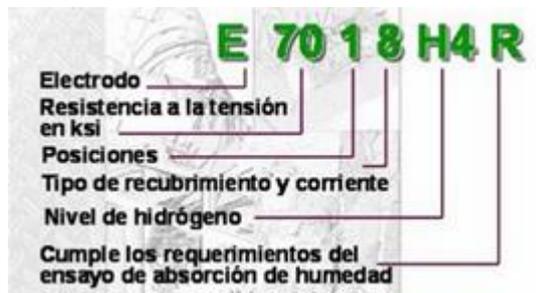


Fig. 71, Clasificación AWS para electrodos.  
<https://www.slideshare.net/AlejoPerEz6/manual-soldadura.->

**11.9.2 Cálculo de resistencia de soldadura de los cordones del lado mayor, paralelos al eje longitudinal de la columna, de las cartelas**

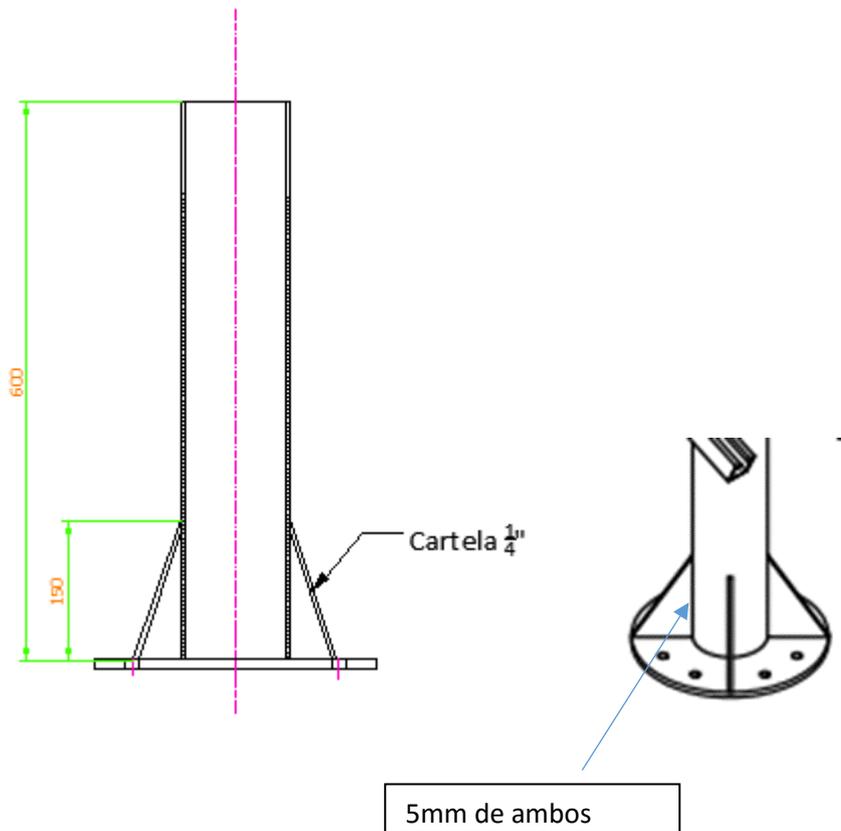
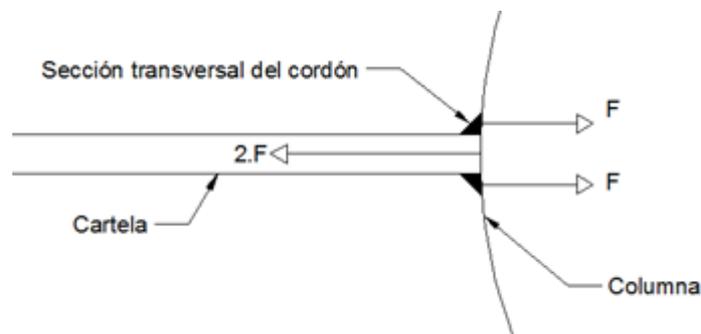
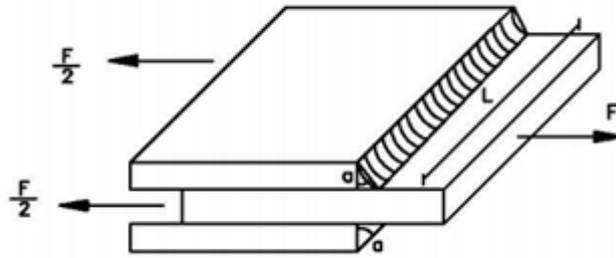


Figura 55, representación del cordón de soldadura paralelo al eje longitudinal de la columna.

La misma será calculada como junta a traslape, con dos filetes transversales y la fuerza aplicada será la carga del viento en el sentido perpendicular a la superficie del lado mayor de la placa.



a)



b)

Figura 56, Representación de soldadura en columna (a) y analogía con una sollicitación de juntas a traslape con dos filetes transversales (b).

Figura b; <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn46.html>

La fuerza somete al cordón a dos esfuerzos, uno cortante y el otro normal. Como se aprecia en la parte aislada siguiente.



Figura 57, representación a esfuerzos cortante y normal en el cordón de soldadura.

Donde;

$$\tau = 1,414 \cdot F / h \cdot L$$

Siendo:

$\tau$ : esfuerzo cortante

F: carga = la misma se calculará mediante la regla de la palanca, es decir,

$$M_f = 510\text{kg} \cdot 2 \cdot d$$



Donde;

d : distancia desde el punto de aplicación de la carga hasta la base.

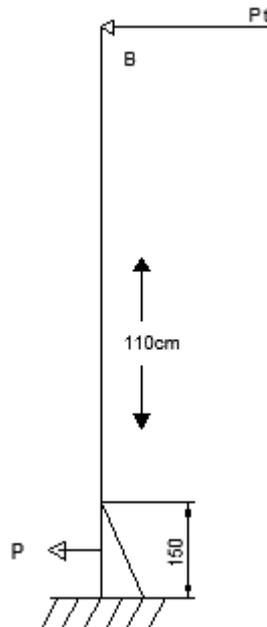


Figura 58, representación de fuerza normal aplicada sobre el canto mayor de la cartela.

$$MF = 255\text{kg} \cdot 2 \cdot 110\text{cm} = 56.100\text{kgcm}$$

A este momento se lo divide por la distancia desde la base al centro del área del canto mayor de la cartela (paralelo al eje de la columna), que posee una longitud total de 30cm, entonces se tiene:

$$F \cdot 2 = Mf / 15\text{cm} = 56.100\text{kgcm} / 7,5\text{cm} = 7.480 \text{ kg} \Rightarrow F / 2 = 3.740\text{kg}$$

h: lado del cordón = 0,5cm

L: Longitud del cordón = 15cm

$$\tau = 1,414 \cdot F / h \cdot L = 1,414 \cdot 3740\text{kg} / (0,5\text{cm} \cdot 15\text{cm}) = 705,11\text{kg/cm}^2 < 1476\text{kg/cm}^2$$

$$\sigma_x = F/A = F/(0,707 \cdot h \cdot L) = 3.740\text{kg}/(0,707 \cdot 0,5\text{cm} \cdot 15\text{cm}) = 705,33\text{kg/cm}^2 < 2460\text{kg/cm}^2$$



Como se observa los esfuerzos a los que están sometidos los cordones de las cartelas de sentido paralelo del eje longitudinal a la columna son inferiores a los calculados a flexión en las bases de las mismas, y esto teniendo en cuenta solo una cartela, ahora bien si dividimos la carga por 4 cartelas (2 de cada lado del eje y-y) como lo muestra la fig. 53, se tiene;

$$\tau = 1,414 \cdot (F/4) / h \cdot L = 1,414 \cdot (3.740\text{kg} / 4) / (0,5\text{cm} \cdot 15\text{cm}) = 176,28\text{kg}/\text{cm}^2$$

$$\sigma_x = F/A = (F/4)/(0,707 \cdot h \cdot L) = (3.740\text{kg} / 4)/(0,707 \cdot 0,5\text{cm} \cdot 15\text{cm}) = 176,33\text{kg}/\text{cm}^2$$

### 11.10 Cálculo de Resistencia del acero del anclaje en tracción –

#### Reglamento CIRSOC 201.

La resistencia nominal  $N_{sa}$  controlada por el acero de un anclaje traccionado, se deberá evaluar mediante cálculos basados en las propiedades del material del anclaje y en sus dimensiones físicas.

Norma aplicable al material <sup>1</sup>	Grado o tipo	Diámetro (in.)	Resistencia a la tracción, para el diseño, $f_{ut}$ (ksi)	Resistencia a la tracción, mín. (ksi)	Tensión de fluencia, mín.		Alargamiento, mín		Reducción del área, mín. (%)
					ksi	método	%	longitud	
AWS D1.1 <sup>2</sup>	B	1/2 - 1	60	60	50	0,2 %	20	2 in.	50
ASTM A 307 <sup>3</sup>	A	≤ 4	60	60	–	–	18	2 in.	–
	C	≤ 4	58	58-80	36	–	23	2 in.	–
ASTM A 354 <sup>4</sup>	BC	≤ 4	125	125	109	0,2 %	16	2 in.	50
	BD	≤ 4	125	150	130	0,2 %	14	2 in.	40
ASTM A 449 <sup>5</sup>	1	≤ 1	120	120	92	0,2 %	14	4D	35
		1 – 1-1/2	105	105	81	0,2 %	14	4D	35
		> 1-1/2	90	90	58	0,2 %	14	4D	35
ASTM F 1554 <sup>6</sup>	36	≤ 2	58	58-80	36	0,2 %	23	2 in.	40
	55	≤ 2	75	75-95	55	0,2 %	21	2 in.	30
	105	≤ 2	125	125-150	105	0,2 %	15	2 in.	45

Tabla 23, Propiedades de los materiales usados para los anclajes hormigonados in situ.

Tabla extraída del Apéndice D de ACI 318, año 2002, del AISC (American Institute of Steel Construction), página 3, capítulo 34, Anclaje en hormigón.

La resistencia nominal  $N_{sa}$  de un anclaje o grupo de anclajes traccionado deberá ser igual o menor que:

$$N_{sa} \leq n \cdot A_{se} \cdot f_{uta}$$

siendo:

$f_{uta}$ : la resistencia a la tracción especificada del acero de los anclajes, que se debe adoptar igual o menor que el menor de los valores obtenidos entre  $1,9 f_{ya}$  o 875 MPa.



$n$  : el número de anclajes traccionados en el grupo.

$A_{se}$ : área efectiva de la sección transversal del anclaje, en  $mm^2$ .

Diámetro del anclaje ( $d_b$ ) (in.)	Área bruta del anclaje ( $in.^2$ )	Área efectiva del anclaje ( $A_{se}$ ) ( $in.^2$ )	Superficie de apoyo de las cabezas y tuercas ( $A_{brg}$ ) ( $in.^2$ )			
			Cuadrada	Cuadrada pesada	Hexagonal	Hexagonal pesada
0,250	0,049	0,032	0,142	0,201	0,117	0,167
0,375	0,110	0,078	0,280	0,362	0,164	0,299
0,500	0,196	0,142	0,464	0,569	0,291	0,467
0,625	0,307	0,226	0,693	0,822	0,454	0,671
0,750	0,442	0,334	0,824	1,121	0,654	0,911
0,875	0,601	0,462	1,121	1,465	0,891	1,188
1,000	0,785	0,606	1,465	1,855	1,163	1,501
1,125	0,994	0,763	1,854	2,291	1,472	1,851
1,250	1,227	0,969	2,228	2,773	1,817	2,237
1,375	1,485	1,160	2,769	3,300	2,199	2,659
1,500	1,767	1,410	3,295	3,873	2,617	3,118
1,750	2,405	1,900	--	--	--	4,144
2,000	3,142	2,500	--	--	--	5,316

Tabla 24, Propiedades dimensionales de los anclajes roscados hormigonados in situ.

Tabla extraída del Apéndice D de ACI 318, año 2002, del AISC (American Institute of Steel Construction), página 4, capítulo 34 Anclaje en hormigón.

De esta manera y según tablas anteriores se tiene, para un perno de anclaje de acero ASTM A 307 (acero dúctil) de diámetro  $\frac{1}{2}$  in los siguientes datos;

Área efectiva del anclaje,  $A_{se}$ :  $0,142in^2 \equiv 91,61mm^2$  (tabla 21)

Resistencia a la tracción para el diseño de grado o tipo "A",  $f_{uta}$  :  $60ksi \equiv 413,69MPa$  (tabla 20)

De esta manera se tiene:

$$N_{sa} = 4 \cdot 91,61mm^2 \cdot 413,69N/mm^2 = 151.598,24N \equiv 15.468,63kg$$

El requisito básico para el acero del anclaje es:

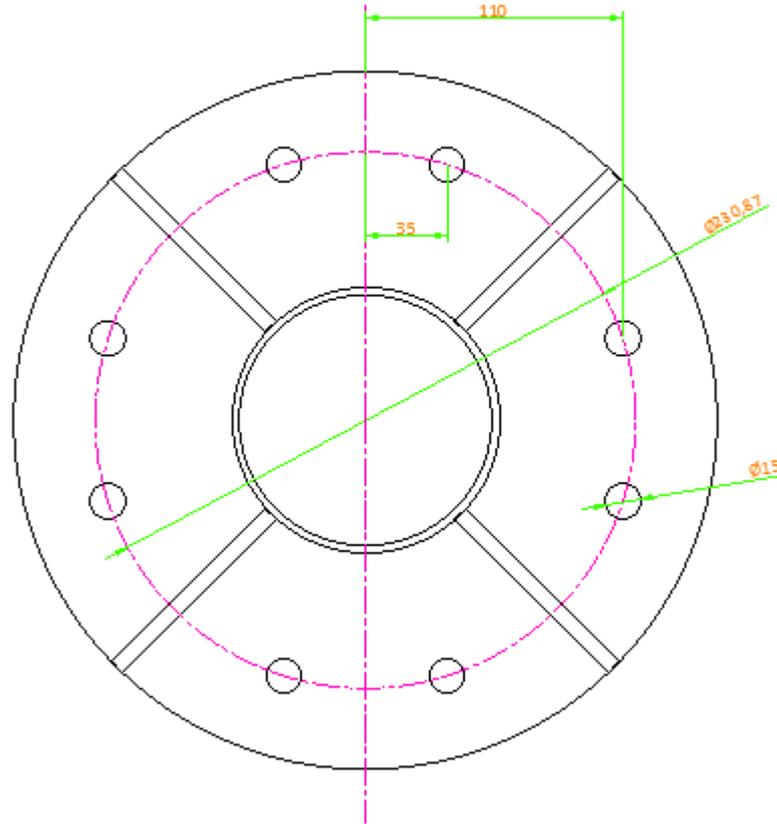
$$\Phi \times N_{sa} \geq N_u$$

dónde:

$\phi$ : coeficiente de reducción = 0,75

$N_u$ : carga mayorada, es decir;  $N_u = 1,4 \times$  Carga

**11.11 Cálculo de la fuerza actuante y verificación con respecto a la resistencia nominal.**



*Figura 59, esquema de ubicación de los 4 pernos de anclaje que trabajan a tracción sobre la base de la columna inferior.*

La distancia media de acción de la fuerza resultante del momento que ejerce la carga, desde el centro de la columna, es;

$$\text{Distancia media} = (2 \cdot 11\text{cm} + 2 \cdot 3,5\text{cm}) / 4 = 7,25\text{cm}$$

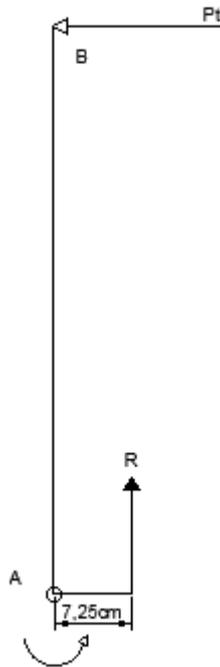


Figura 60, Diagrama de cuerpo libre y aplicación de la regla de la palanca.

El momento flector ejercido por la carga es de;

$$M_f = 2 \cdot P \cdot 110\text{cm} = 2 \cdot 255\text{kg} \cdot 110\text{cm} = 56.100\text{kgcm}$$

La fuerza resultante es;

$$F = M_f / \text{Dist. M.} = 56.100\text{kgcm} / 7,25\text{cm} = 7.737,93\text{kg}$$

Si pasamos ahora a calcular la carga mayorada se tiene:

$$N_u = 1,4 \times 7.737,93\text{kg} = 10.833,1\text{kg}$$

De esta manera se comprueba que:

$$0,75 \cdot 15.469,21\text{kg} \geq N_u$$

$$11.601,91\text{kg} \geq 10.833,1\text{kg}$$

**11.12 Distancias a los bordes, separaciones y espesores requeridos para impedir la falla por hendimiento.**

La mínima separación entre centros de anclajes deberá ser  $4do$  para anclajes hormigonados in situ, no sometidos a torque. Donde  $do$  es el diámetro exterior del anclaje, o diámetro del vástago de un perno con cabeza, bulón con cabeza o bulón con gancho, en mm.

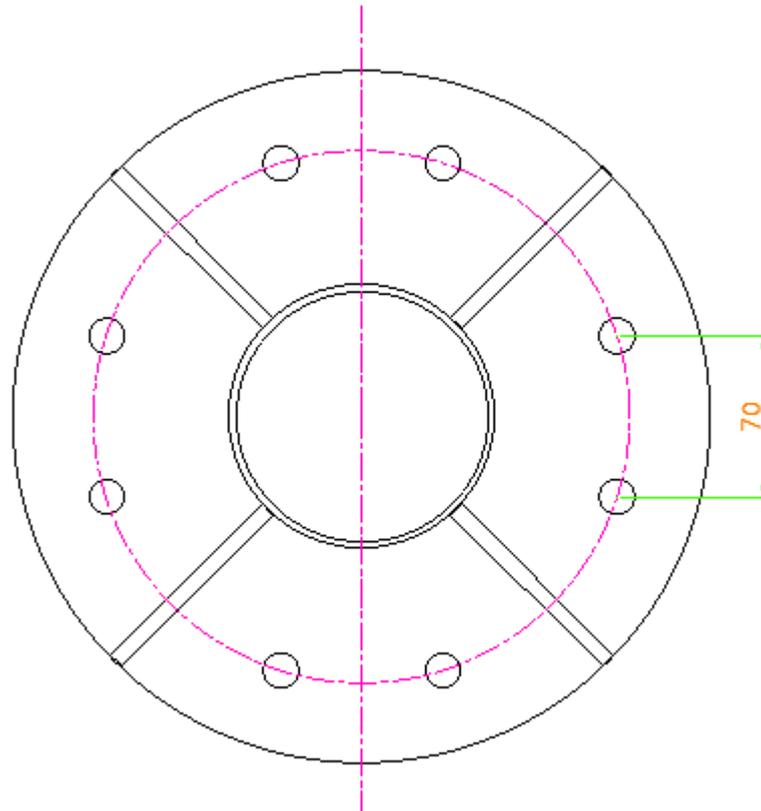


Figura 61, esquema de distancia entre pernos de anclaje.

Se observa que;

$$4 \times do = 4 \times 12,7\text{mm} = 50,8\text{mm} < 70\text{mm}, \text{ verifica!!}$$

Las distancias mínimas a los bordes, para los anclajes con cabeza hormigonados in situ, que no serán sometidos a torque, deberán ser  $6do$ .

$$6 \times do = 6 \cdot 12,7\text{mm} = 76,2\text{mm}$$

Los orificios de la placa de fijación de la columna al hormigón se encuentran en un círculo de diámetro de 230mm, por lo que el diámetro mínimo de la base de hormigón será de 382mm que equivale en pulgada a 15in.

### 11.13 Determinación de la longitud de empotramiento (hef) requerida en base al desprendimiento del hormigón del anclaje.

Un "grupo de anclajes" se define como: "un número de anclajes de aproximadamente igual profundidad de empotramiento efectiva, donde la separación entre uno o más anclajes adyacentes es menor que tres veces su profundidad de empotramiento."

Como la separación entre los anclajes es de 6 in., si la profundidad de empotramiento es mayor que 2in los debemos tratar como un grupo. Aunque no conocemos la profundidad de empotramiento, se asumirá que se aplicarán los requisitos para grupos de anclajes.

El requisito básico para un grupo de anclajes es:

$$\phi N_{cbg} \geq U_n$$

Dónde:  $\phi = 0,70$  (ver tabla siguiente)

Como no hay armadura suplementaria se aplica la Condición B (por ejemplo, no hay armadura en forma de horquillas rodeando a los anclajes y anclada en el hormigón).

Resistencia determinada por	Factor de reducción de la resistencia, $\phi$ , a utilizar con las combinaciones de cargas de:			
	Sección 9.2		Apéndice C	
<b>Elemento de acero dúctil</b>				
Tracción, $N_s$	0,75		0,80	
Corte, $V_s$	0,65		0,75	
<b>Elemento de acero frágil</b>				
Tracción, $N_s$	0,65		0,70	
Corte, $V_s$	0,60		0,65	
<b>Hormigón</b>	Condición		Condición	
	A	B	A	B
<b>Corte</b>				
Desprendimiento del hormigón, $V_{cb}$ y $V_{cbg}$	0,75	0,70	0,85	0,75
Arrancamiento del hormigón, $V_{cp}$	0,70	0,70	0,75	0,75
<b>Tracción</b>				
Pernos con cabeza, bulones con cabeza o bulones con gancho				
Desprendimiento del hormigón y descascamiento del recubrimiento lateral de hormigón, $N_{cb}$ , $N_{cbg}$ , $N_{sb}$ y $N_{sbg}$	0,75	0,70	0,85	0,75
Arrancamiento del anclaje, $N_{pn}$	0,70	0,70	0,75	0,75
Anclajes incorporados al hormigón endurecido, clasificados de acuerdo con ACI 355.2 en las siguientes categorías:				
<b>Categoría 1 (Baja sensibilidad a la incorporación al hormigón y elevada confiabilidad)</b>				
Desprendimiento del hormigón y descascamiento del recubrimiento lateral de hormigón, $N_{cb}$ , $N_{cbg}$ , $N_{sb}$ y $N_{sbg}$	0,75	0,65	0,85	0,75
Arrancamiento del anclaje, $N_{pn}$	0,65	0,65	0,75	0,75
<b>Categoría 2 (Mediana sensibilidad a la incorporación al hormigón y mediana confiabilidad)</b>				
Desprendimiento del hormigón y descascamiento del recubrimiento lateral de hormigón, $N_{cb}$ , $N_{cbg}$ , $N_{sb}$ y $N_{sbg}$	0,65	0,55	0,75	0,65
Arrancamiento del anclaje, $N_{pn}$	0,55	0,55	0,65	0,65
<b>Categoría 3 (Elevada sensibilidad a la incorporación al hormigón y baja confiabilidad)</b>				
Desprendimiento del hormigón y descascamiento del recubrimiento lateral de hormigón, $N_{cb}$ , $N_{cbg}$ , $N_{sb}$ y $N_{sbg}$	0,55	0,45	0,65	0,55
Arrancamiento del anclaje, $N_{pn}$	0,45	0,45	0,55	0,55

Tabla extraída del Apéndice D de ACI 318, año 2002, del AISC (American Institute of Steel Construction),  
página 8, capítulo 34 Anclaje en hormigón.



La **condición A** se aplica cuando las potenciales superficies de falla del hormigón son cruzadas por armadura suplementaria dimensionada para fijar el prisma potencial de falla del hormigón al elemento estructural.

La **condición B** se aplica cuando no se dispone esta armadura suplementaria, o cuando controla la resistencia al arrancamiento del anclaje o del hormigón.

$$N_{cbg} = A_N / A_{No} \cdot \psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \psi_3 \cdot N_b$$

donde:

$N_{cbg}$ : resistencia nominal al desprendimiento del hormigón por tracción de un grupo de anclajes.

Como es probable que esta conexión sea afectada tanto por los efectos del grupo de anclajes como por los efectos de la proximidad al borde, la longitud de empotramiento  $h_{ef}$  no se puede determinar a partir de una solución cerrada. Por lo tanto se debe suponer una longitud de empotramiento, determinar la resistencia de la conexión, y luego comparar este valor con la resistencia requerida.

Suponer una longitud de empotramiento efectiva  **$h_{ef} = 12 \text{ in.}$**

Nota: La longitud de empotramiento efectiva  $h_{ef}$  del perno soldado es igual a la longitud de empotramiento efectiva del perno más el espesor de la placa de fijación empotrada.

- Determinar  $A_N$  y  $A_{No}$ :

$A_N$ : es el área proyectada de la superficie de falla, la cual se aproxima mediante un círculo de diámetro con una distancia igual a  $1,5h_{ef}$  (en este caso  $1,5 \times 12 \text{ in} = 18 \text{ in.}$ ) del centro de los anclajes, donde el círculo que contiene los pernos es de  $230 \text{ mm} \approx 9,05 \text{ in.}$

De esta manera el diámetro total será:

$$D = 9,05 \text{ in} + 18 \text{ in} \cdot 2 = 45,05 \text{ in}$$

$$A_N = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot (45,05 \text{ in})^2 / 4 = 1593,96 \text{ in}^2$$

$$A_{No} = 9 \cdot h_{ef}^2 = 9 \cdot (12 \text{ in})^2 = 1296 \text{ in}^2$$

Verificar:

$$A_N \leq n \cdot A_{No}$$



$$1.593,96\text{in}^2 \leq 4 \cdot 1296\text{in}^2 = 5.184\text{in}^2 \text{ Verifica!!}$$

Determinar  $\psi_1$ :

$\Psi_1 = 1$  (no hay excentricidad en la conexión)

Determinar  $\psi_2$ :

$\Psi_2 = 1$  si  $c_{\min} \geq 1,5 \text{ hef}$  ( $c_{\min}$  = distancia mínima del centro del anclaje al borde)

Determinar  $\psi_3$ :

$\Psi_3 = 1,25$  para anclajes hormigonados in situ.

Determinar  $N_b$ :

$$N_b = 24 \cdot (f'c)^{1/2} \cdot \text{hef}^{1,5}$$

Dónde:

$f'c$  = resistencia especificada a la compresión del hormigón = 6000 Psi

$\text{hef}$  = longitud efectiva de empotramiento del grupo de anclaje = 12in.

Entonces:

$$N_b = 24 \cdot (6000\text{psi})^{1/2} \cdot (12\text{in})^{1,5} = 77.249,96\text{lb}$$

De esta manera se calcula  $N_{cbg}$ , resistencia nominal al desprendimiento del hormigón por tracción de un grupo de anclajes:

$$N_{cbg} = A_N / A_{No} \cdot \psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \psi_3 \cdot N_b$$

$$N_{cbg} = 1593,96\text{in}^2 / 1296\text{in}^2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,25 \cdot 77249,96\text{lb} = 118.762,87\text{Lb} \equiv 53.869\text{kg}$$

La verificación final de la hipótesis considerada ( $\text{hef} = 12 \text{ in.}$ ) se satisface si se satisfacen los requisitos de la ecuación;

$$\phi N_{cbg} \geq N_u$$

$$0,7 \times 53.869\text{kg} \geq 10.833,1\text{kg}$$

$$37.708,95\text{kg} \geq 10.833,1\text{kg} \text{ Verifica!!}$$

## 12 Diseño y cálculo de resistencia del par de engranaje.

### 12.1 Geometría del engranaje mayor o conducido.

El engranaje mayor o conducido está formado por una media corona soldada a la columna intermedia de la estructura en un plano paralelo al suelo, mientras que el engranaje conductor estará ubicado en el motorreductor que estará en posición vertical, el cual se fijará a la columna inferior que se fija a la base de hormigón.

La definición de una transmisión por engranajes pasa por el conocimiento de las variables que definen la geometría del diente que se talla en la rueda. A continuación se definen dichas variables:

- Paso ( $p$ ): también llamado paso circular o circunferencial (en adelante simplemente paso) es la distancia medida sobre la circunferencia primitiva (circunferencia que definiría la superficie por la cual el engranaje rueda sin deslizar) entre puntos homólogos de dos dientes consecutivos. Según se aprecia en la figura siguiente el paso es igual a la suma del grueso del diente y el ancho entre dientes consecutivos.

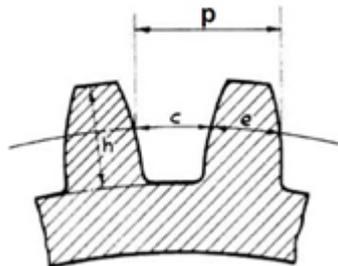


Figura 62, Esquema representativo del paso del diente.

Figura 2 extraída de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn150.html>

Matemáticamente el paso se define por la siguiente relación:

$$P = \frac{\pi \times d}{Z}$$

Siendo:

$p$ ; el paso del diente (en mm);

$d$ ; el valor del diámetro primitivo (en mm);

$Z$ ; el número de dientes.



- Módulo (m): es la relación que existe entre el diámetro primitivo del engranaje y el número de dientes (Z) que contiene la rueda, (concretamente el cociente entre el diámetro primitivo y el número de dientes,  $m = d/Z$ ). Para que dos engranajes puedan engranar deben tener el mismo módulo, m. Paso (p) y módulo (m) están relacionados a través de la siguiente expresión:

$$p = m \times \pi$$

El módulo se mide en milímetros, al igual que el paso. En la siguiente tabla se incluyen los valores de paso y módulo normalizados, junto con los valores de espaciado entre dientes, y de espesor y profundidad de dientes.

Módulo. . . . .	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25
Paso . . . . . mm.	3,14	3,93	4,71	5,5	6,28	7,07	7,85	8,64	9,42	10,21
Espacio entre dientes. »	1,57	1,97	2,36	2,75	3,14	3,54	3,93	4,32	4,71	5,11
Espesor del diente. »	2,17	2,71	3,25	3,79	4,33	4,87	5,42	5,96	6,5	7,04
Módulo. . . . .	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75
Peso. . . . . mm.	11	11,78	12,56	13,35	14,13	14,92	15,70	16,49	17,28	18,06
Espacio entre dientes. »	5,5	5,89	6,29	6,68	7,07	7,46	7,86	8,25	8,64	9,03
Espesor del diente. »	7,58	8,13	8,67	9,21	9,75	10,29	10,83	11,38	11,92	12,46
Módulo. . . . .	6	6,25	6,5	7	7,5	8	9	10	11	12
Paso. . . . . mm.	18,84	19,64	20,42	21,99	23,56	25,13	28,27	31,42	34,56	37,7
Espacio entre dientes. »	9,43	9,82	10,21	11	11,78	12,57	14,14	15,71	17,28	18,85
Espesor del diente. »	13	13,54	14,08	15,17	16,25	17,32	19,5	21,67	23,83	26
Módulo. . . . .	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Paso. . . . . mm.	40,84	43,98	47,12	50,27	53,41	56,55	59,69	62,83	65,97	69,12
Espacio entre dientes. »	20,42	21,99	23,56	25,13	26,70	28,27	29,85	31,42	32,98	34,56
Espesor del diente. »	28,17	30,33	32,5	34,67	36,83	39	41,17	43,33	45,5	47,67
Módulo. . . . .	25	28	30	32	35	38	40	50		
Paso. . . . . mm.	78,54	87,96	94,25	100,53	109,96	109,38	125,66	157,08		
Espesor del diente. »	39,27	43,98	47,12	50,26	54,98	59,69	62,83	78,54		
Profundidad del diente. »	53,9	60,4	64,7	69	75,5	81,9	86,3	107,8		

Tabla 25, Pasos y módulos normalizados.

Extraída como Tabla 1 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn150.html>

Se partirá de un diámetro primitivo predefinido al igual que el número de dientes, que será de:

$d = 150\text{mm}$  (diámetro primitivo) y,

$z = 75$  dientes,

De esta manera se tiene el siguiente módulo;

$$m = d/z = 150\text{mm}/75 = 2\text{mm},$$

Por lo que de la tabla 23 se obtiene los siguientes datos al saber el valor del módulo;

- Paso (p), se lo puede calcular mediante la expresión siguiente;

$$p = m \cdot \pi = 2\text{mm} \cdot 3,14 = 6,28\text{mm}$$

- Espacio entre dientes y espesor del diente = 3,14mm
- Profundidad del diente = 4,33 mm

- Paso Diametral o Diametral Pitch (dp): en el sistema inglés de unidades se emplea como unidad la pulgada (in) y en el cálculo de engranajes se utiliza el llamado diametral pitch (dp). El diametral pitch o paso diametral es el cociente entre el número de dientes (Z) y el diámetro primitivo (d), expresado en pulgadas.

$$Dp = Z/d$$

$$dp = 75 / 5,905\text{in} = 12,70$$

Obsérvese que entre el paso (p) y el diametral pitch (dp) se cumple la relación siguiente:

$$dp \times p = \pi$$

Por otro lado, la relación entre el paso diametral o diametral pitch (dp) y el módulo (m) es el siguiente:

- Adendo o altura de cabeza (ha): es la distancia radial entre la circunferencia primitiva y la cabeza del diente. Para un perfil de referencia normalizado,  $ha = m$ .

$$ha = m = 2\text{mm}$$

- Dedendo o altura de pie (hf): es la distancia radial entre la raíz del diente y la circunferencia primitiva. Para un perfil de referencia normalizado,  $hf = 1,25 \cdot m$ .

$$hf = 1,25 \cdot m = 1,25 \cdot 2\text{mm} = 2,5\text{mm}$$



- Circunferencia de cabeza ( $R_a$ ): es la circunferencia que limita a los dientes exteriormente. El valor de este diámetro es:

$$R_a = 150 + 2 \cdot h_a = 150 + 2 \cdot 2\text{mm} = 154\text{mm}$$

- Circunferencia de pie ( $R_f$ ): es la circunferencia que limita el hueco entre dientes por su parte inferior. El valor de este diámetro es:

$$R_f = d - 2 \cdot h_f = 150\text{mm} - 2 \cdot 2,5\text{mm} = 145\text{mm}$$

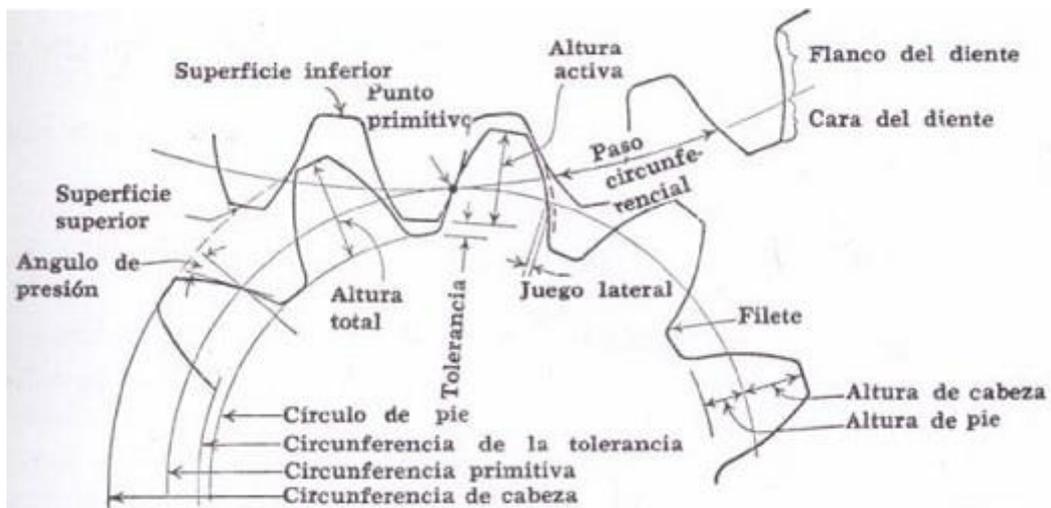


Figura 63, Nomenclatura del engranaje.

Imagen extraída como figura 3 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn150.html>.

- Altura total ( $h$ ): es igual a la suma de las alturas de cabeza y de pie. Para un perfil de referencia normalizado,  $h = 2,25 \cdot m$ .

$$h = 2,25 \cdot 2\text{mm} = 4,5\text{mm}$$

- Holgura o juego lateral: es el espacio que queda libre al engranar una pareja de dientes. Esta holgura siempre será necesaria para permitir una cierta deformación o deflexión que se produce en los dientes, además de permitir el paso del lubricante o para la expansión térmica que sufre el metal del engranaje al calentarse.

- Juego en cabeza o tolerancia ( $c$ ): es el espacio que queda entre la cabeza de un diente y el fondo del espacio interdental de la rueda con que engrana.



Suele tomar un valor,  $c = 0,25 \cdot m$ .

$$c = 0,25 \cdot 2\text{mm} = 0,5\text{mm}$$

- Altura de trabajo o activa ( $h_w$ ): es la diferencia entre la altura total del diente y el juego,

$h_w = h - c$ . Para un perfil de referencia normalizado,  $h_w = 2 \cdot m$ .

$$h_w = 2 \cdot 2\text{mm} = 4\text{mm}$$

- Espesor del diente ( $s$ ): el espesor del diente es el que viene medido sobre la circunferencia primitiva. Para un perfil de referencia normalizado,  $s = m \cdot \pi / 2$ .

$$s = 2\text{mm} \cdot \pi / 2 = 3,14\text{mm}$$

- Hueco ( $e$ ): es el hueco entre dientes medido sobre la circunferencia primitiva. Para un perfil de referencia normalizado,  $e = m \cdot \pi / 2$ .

$$e = 2\text{mm} \cdot \pi / 2 = 3,14\text{mm}$$

- Cara del diente: es la parte de la superficie del diente que queda entre la circunferencia primitiva y la de cabeza.

- Flanco del diente: es la parte de la superficie del diente que queda entre la circunferencia primitiva y la de pie.

- Anchura de flanco ( $b$ ): es la anchura del diente medida en dirección paralela al eje.

Como valor inicial de anchura de la cara del diente se suele tomar un valor comprendido entre:

$$3p < b < 5p.$$

Es decir, donde  $p$  es el paso circular:

$$3 \cdot 6,28\text{mm} < b < 5 \cdot 6,28\text{mm}$$

$$18,84\text{mm} < b < 31,4\text{mm}$$

Se adoptará un ancho de flanco igual a 20mm.



- Ángulo de presión ( $\alpha$ ): es el ángulo que forma la línea de presión (que es la línea normal a la superficie del diente en el punto de contacto entre dos engranajes) con la tangente a ambas circunferencias primitivas.

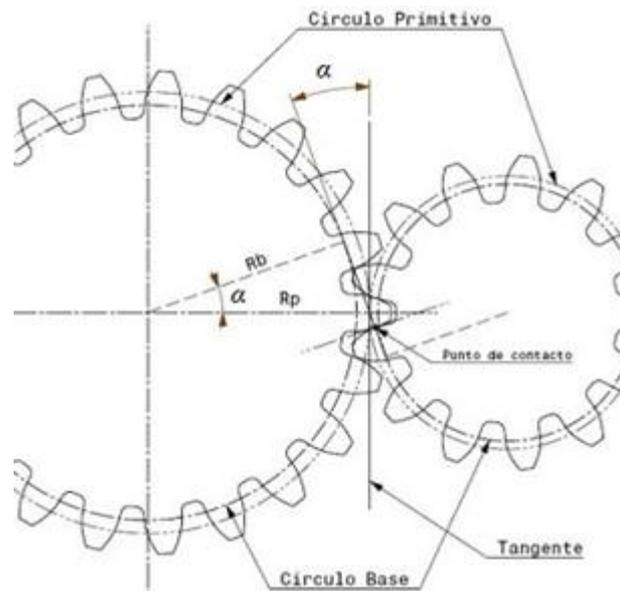


Figura 64, Esquema sobre el ángulo de presión ( $\alpha$ ).

Imagen extraída como figura 4 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn150.html>

La relación geométrica entre el ángulo de presión ( $\alpha$ ) y los radios de la circunferencia base ( $R_b$ ) y circunferencia primitiva ( $R_p$ ), es la siguiente:

$$R_b = R_p \cdot \cos\alpha$$

Los valores del ángulo de presión están en función del número de dientes, siendo algunos de sus valores los siguientes:

Nº. de dientes, (Z)	Ángulo de presión, ( $\alpha$ )
8	25°
10	22° 30'
15	20°
20	17° 30'
25	15°
30	14° 30'

Tabla 26, Valores de angulos de presión según cantidad de dientes  
Tabla extraída de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn150.html>

Nuestra rueda conductora (motriz) tendrá una cantidad de dientes de 35 (modulo 2 y  $D_p = 70\text{mm}$ ) por lo que su ángulo de presión es igual a  $14,30^\circ$ .

## 12.2 Geometría del engranaje menor o conductor.

El principio fundamental o condición de engrane entre dos dientes se basa en que el perfil de éstos debe ser tal que la normal trazada por el punto de contacto entre los dos dientes pase siempre por un punto  $O$  que se sitúa en la línea que une los dos centros de rotación de los engranajes, y que las distancias entre dicho punto  $O$  y los respectivos centros, coincida con sus correspondientes radios primitivos.

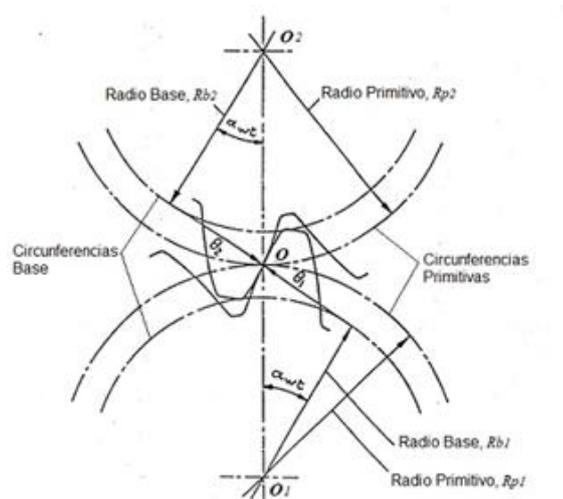


Figura 65, Plano de la sección transversal.

Imagen extraída como figura 5 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn150.html>

Para que la relación de transmisión permanezca constante es necesario que el centro de rotación sea un punto fijo, es decir, que la normal a la superficie de los dientes en su punto de contacto, o sea, la línea de presión, pase en cualquier posición por un punto fijo de la línea de centros. A los perfiles que cumplen esta condición se les dicen que son perfiles conjugados y cumplen con la condición de engrane.

Además existe una condición geométrica que establece el tamaño de los dientes. Para que dos ruedas dentadas puedan engranar deben tener el mismo paso "p" o lo que es lo mismo, el mismo módulo "m", ya que  $p = m \cdot \pi$ .

Matemáticamente el paso se define por la siguiente relación:

$$P = \frac{\pi \times d}{Z}$$

Siendo:

P; paso del diente (en mm);

d; valor del diámetro primitivo (en mm);

Z; número de dientes.

De esta ecuación y eligiendo previamente un número de dientes se averigua el diámetro primitivo de la rueda conductora;

Para  $z = 35$  dientes, se tiene;

$$d = p \cdot z / \pi = 6,28\text{mm} \cdot 35 / \pi = 70\text{mm}$$

La geometría del diente de la rueda menor es la misma que para la rueda conducida o mayor.

Lo único que cambia es el valor de la circunferencia de pie, de cabeza y el diámetro primitivo hallado anteriormente, por lo que se tiene;

- Circunferencia de cabeza (Ra): es la circunferencia que limita a los dientes exteriormente. El valor de este diámetro es:

$$Ra = 70 + 2 \cdot ha = 70 + 2 \cdot 2\text{mm} = 74\text{mm}$$

- Circunferencia de pie (Rf): es la circunferencia que limita el hueco entre dientes por su parte inferior. El valor de este diámetro es:

$$hf = 1,25 \cdot m = 1,25 \cdot 2\text{mm} = 2,5\text{mm}$$

$$Rf = d - 2 \cdot hf = 70\text{mm} - 2 \cdot 2,5\text{mm} = 65\text{mm}$$

### 12.3 Tornillo Sin-Fin y su Rueda

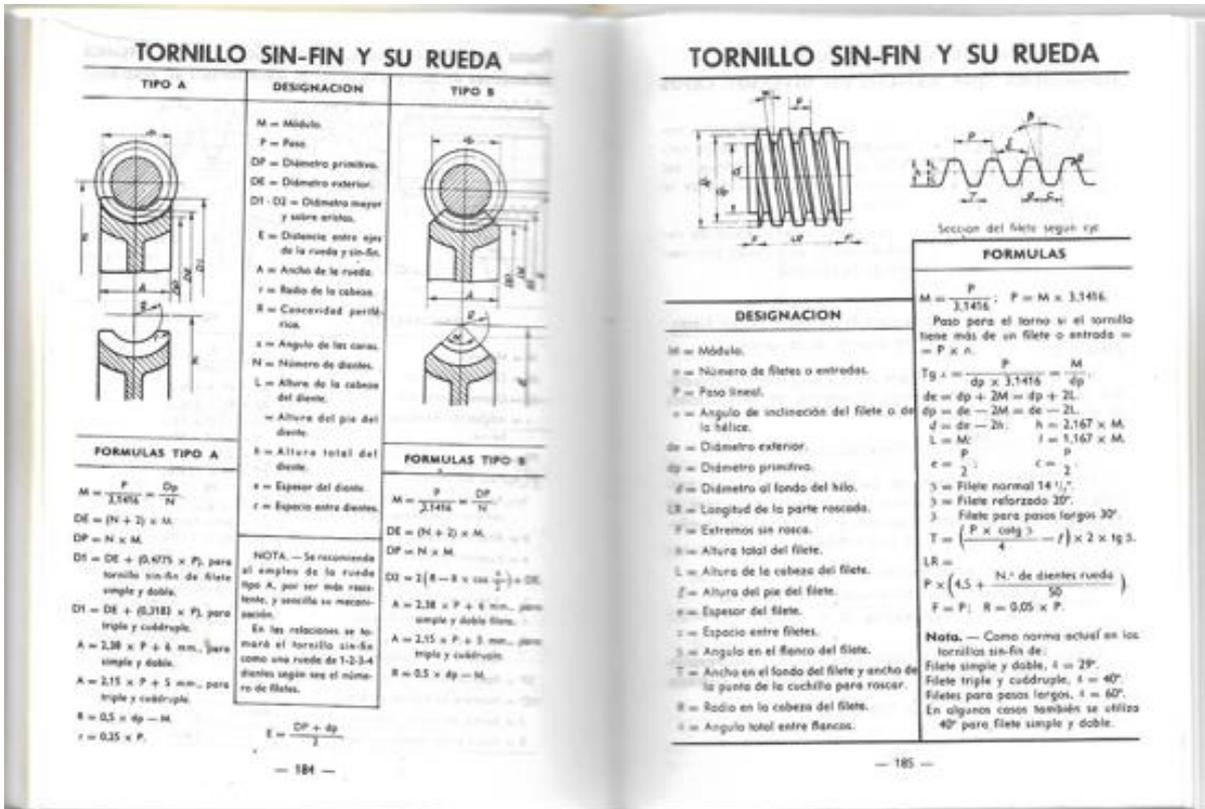


Imagen Extraída del Libro; Máquinas, Cálculos de Taller – Casillas (paginas 184 y 185).

Se empleará la rueda Tipo A, por ser más sencilla su mecanizado aparte de ser más resistente, de esta manera se tiene:

$$M = Dp / N = 75\text{mm}/25 = 3\text{mm}$$

$$P = M \times 3,1416 = 3 \times 3,1416 = 9,42$$

$$DE = (N+2) \times M = (25+2) \times 3 = 81\text{mm}$$

$$D1 = DE + (0,4775 \times P) = 81\text{mm} + (0,4775 \times 9,42) = 85,49\text{mm}$$

$$A = 2,38 \times P + 6\text{mm} = 2,38 \times 9,42 + 6\text{mm} = 28,419\text{mm}$$

$$R = 0,5 \times dp - M = 0,5 \times 30\text{mm} - 3\text{mm} = 12\text{mm}$$

$$E = (Dp + dp)/2 = (75\text{mm} + 30\text{mm})/2 = 52,5\text{mm}$$

Datos del Sin-Fin:

$$M = P/3,1416 = 9,42\text{mm}/3,1416 = 3\text{mm}$$

$$dp = (8 \text{ a } 12) \times M$$

Se adoptará 10;

$$dp = (10) \times M = 10 \times 3\text{mm} = 30\text{mm}$$

$$de = dp + 2 \times M = 30\text{mm} + 2 \times 3\text{mm} = 36\text{mm}$$

$$h = 2,167 \times M$$

$$h = 2,167 \times 3\text{mm} = 6,501\text{mm}$$

$$d = de - 2 \times h = 36\text{mm} - 2 \times 6,501 = 23\text{mm}$$

$$L = M = 3\text{mm}$$

$$e = c = P/2 = 9,42\text{mm}/2 = 4,71\text{mm}$$

$$\text{tg } \alpha = M/dp \Rightarrow \alpha = \text{arctg}(3\text{mm}/30\text{mm}) = 5,71^\circ$$

$$\delta \text{ (ángulo total entre flancos)} = 29^\circ \text{ (para filetes simples)}$$

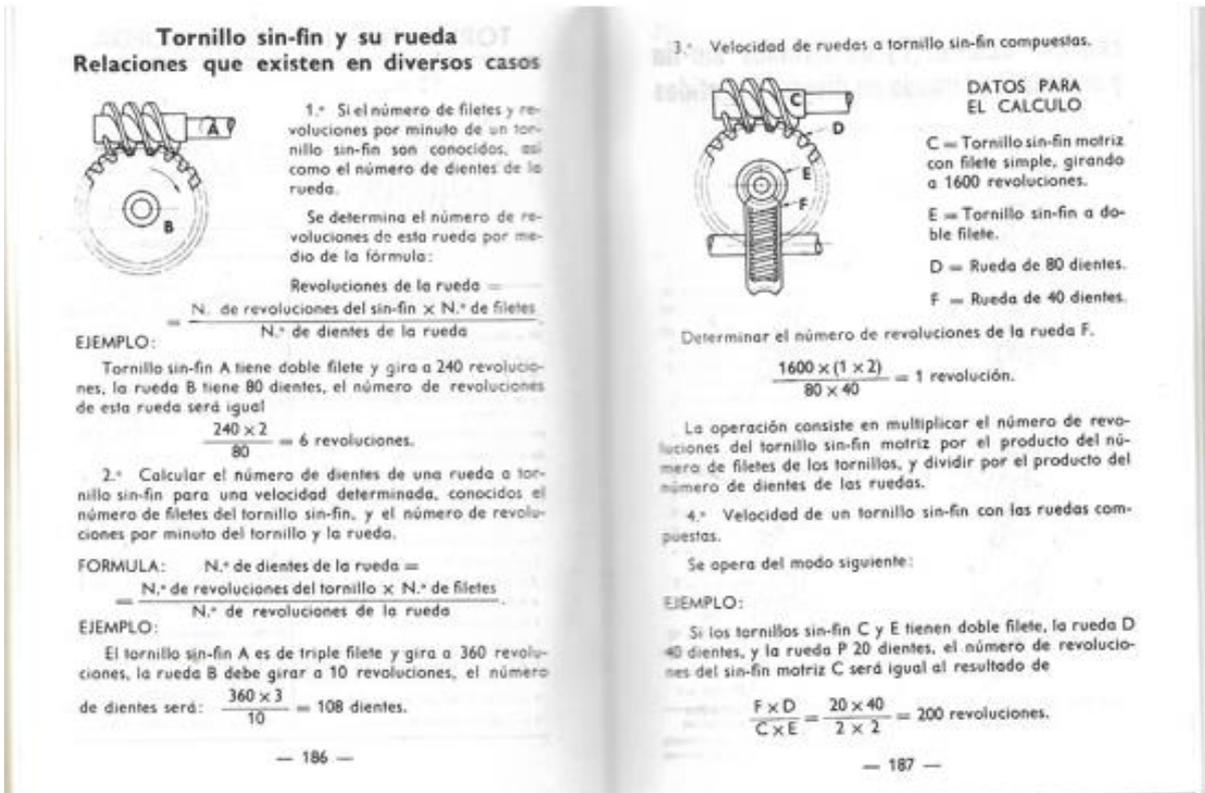


Imagen Extraída del Libro; Máquinas, Cálculos de Taller – Casillas, (páginas 186 y 187)



Cálculo de relación de velocidades entre sin-fin y rueda:

Datos;

RPM Sin-fin = 4RPM

Nº filetes = 1

N (número de dientes rueda) = 25 dientes

$$\text{Nº rev. de la rueda} = \frac{\text{Nº de rev. Del sin-fin} \times \text{Nº de filetes}}{\text{Núm. dientes de la rueda}} =$$

$$\text{RPM rueda} = \frac{4\text{RPM} \times 1 \text{ filete}}{25\text{dientes}} = 0,16\text{RPM}$$

Relación de velocidades entre Corona central y piñón:

$$D1 \times n1 = D2 \times n2$$

Para que la corona central de media vuelta implica que  $n1 = 0,5\text{Rev.}$

$$n2 = D1/D2 \times n1 = 150\text{mm}/75\text{mm} \times 0,5\text{Rev} = 1\text{Rev.}$$

Para que la corona central de media vuelta ( $180^\circ$ ) se necesita que el piñón de una vuelta completa ( $360^\circ$ ).

De esta manera se requiere que si en 1 minuto el piñón gira a  $4\text{Rev.}$ , se tendrá que el piñón a girado:

$$0,16 \text{ Revoluciones} \equiv 360^\circ \times 0,16 = 57,6^\circ$$

Para calcular el tiempo necesario que el sin-fin debe girar para lograr en el piñón una vuelta completa, se hace:

Para  $41,04^\circ$  de giro del piñón----- $4\text{Rev.}$  del sin-fin

Para  $360^\circ$  (una vuelta)----- X Rev. del sin-fin

$$\frac{360^\circ \times 4\text{Rev.}}{57,6^\circ} = 25\text{Revoluciones}$$

De esta manera se concluye que el motor debe girar 35 vueltas para lograr una vuelta completa en el piñon, ahora bien en tiempos de funcionamiento significa que:

Para 4 rev. de giro del sin-fin----- 1 minuto

Para 35rev. ----- X minutos de funcioanmiento del sin-fin

$$\frac{25\text{Rev.} \times 1\text{min}}{4\text{Rev.}} = 6,25\text{min.} \equiv 0,104\text{hs}$$

Como el motor debe funcionar por día en girar en ambos sentidos, primero en la dirección Este-Oeste gradualmente y luego continuo en inversa para el proximo día, se tiene un funcionamiento del motor de  $2 \times 6,25\text{min.} = 12,5\text{min.} = 0,208\text{hs.}$

## 12.4 Verificación de la Resistencia de los dientes de engrane.

### 12.4.1 Resistencia a flexión

Para el cálculo de la resistencia a flexión del diente se parte de una serie de consideraciones que van a simplificar el proceso, y que a la vez quedarán siempre del lado de la seguridad.

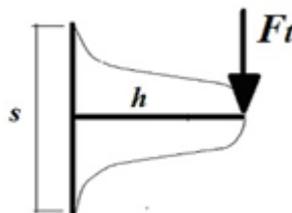


Fig. 97, Esquema de un diente sometido a flexión como una viga en voladizo.  
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>



Por un lado, el perfil del diente se va a considerar que trabaja como si se tratara de una viga o barra en voladizo (o en ménsula) donde se le aplica una carga puntual en su extremo (Ft), que simula a la sollicitación que se transmite una pareja de dientes cuando entran en contacto. En realidad, la zona de contacto no se realiza en la punta del diente, sino que tendrá lugar en una zona de la cara del diente situada más abajo, por lo que si se considera aplicada en su extremo, las tensiones resultantes en la base del diente serán mayores que las reales, y se estaría del lado de la seguridad.

Y por otro lado, también se considerará a efectos de cálculo, que en cada momento sólo existe una pareja de dientes en contacto que absorbe toda esta fuerza transmitida, cuando en realidad y si el diseño se ha realizado correctamente (lo que supone trabajar con un grado de recubrimiento mayor a uno) en cada momento habrá más de una pareja de dientes en contacto que se distribuyan la fuerza transmitida, por lo que realmente el esfuerzo que soportará cada diente será menor que el de aquí considerado.

Supuesto lo anterior, comencemos con el cálculo a flexión de un diente. Como se ha dicho, para calcular su resistencia a flexión se considerará que el diente trabaja como si fuera una viga o barra en voladizo cargada en su extremo.

Como toda barra sometida a flexión, el cálculo de su nivel tensional ( $\sigma$ ) viene determinada por la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad [1]$$

Siendo;

M; el valor del momento flector en un punto de la barra, y

W; es el valor del módulo resistente de la sección en ese punto.

Por otro lado, el módulo resistente de la sección del diente vendrá dado por la siguiente expresión (considerada en la base del diente):

$$W = \frac{I}{y_{\max}} =$$

en la que:



I: es el momento de inercia del perfil del diente respecto al eje neutro de su sección. En este caso,  $I = b \cdot s^3 / 12$ , donde s es espesor del diente en la base y b es la anchura de la cara del diente, medida paralela a su eje.

$y_{\text{máx}}$  : es la distancia del eje neutro de la sección transversal del diente a la fibra más alejada de la misma.

En este caso,  $y_{\text{máx}} = s/2$ , con s el espesor del diente en su base.

En otro orden de cosas, como el momento flector máximo se alcanza en la base del diente, éste toma el siguiente valor:

$$M = F_t \cdot h$$

Siendo h la altura total del diente, desde su base a la punta, y  $F_t$  es el valor de la fuerza tangencial transmitida de un diente a otro.

Sustituyendo los anteriores valores en la expresión de la tensión [1], se obtendrá el valor que alcanza ésta en la base del diente, siendo:

$$\sigma = \frac{6 \cdot F_t \cdot h}{b \cdot s^2}$$

De la anterior expresión los parámetros s y h son puramente geométricos del perfil del diente, y pueden ser sustituidos por una nueva expresión que esté en función del módulo (m) y de un nuevo factor Y llamado factor de Lewis.

Despejando de la anterior expresión la fuerza tangencial ( $F_t$ ) transmitida, y teniendo en cuenta la anterior consideración, se tendrá lo siguiente:

$$F_t = \sigma \cdot b \cdot m \cdot Y \quad [2]$$

Donde:

B; es la anchura del diente medida paralela a su eje,

m; es el módulo e

Y; es el llamado factor de Lewis, que depende exclusivamente de la geometría del diente, de la norma de dentado y del número de dientes, y cuya expresión es la siguiente:

$$Y = \frac{s^2}{\dots}$$

$$6 \cdot m \cdot h$$

El valor de la fuerza tangencial máxima ( $F_{t,m\acute{a}x}$ ) que podría transmitir el diente por limitaciones de resistencia a flexión se obtendría sustituyendo el valor de la tensión ( $\sigma$ ) por el valor de la tensión máxima admisible que soporta el diente (generalmente se suele considerar el límite elástico del material ( $\sigma_y$ ) del cual está fabricado el diente, es decir,  $\sigma_{adm} = \sigma_y$ ).

De esta manera se obtendría el valor de la máxima fuerza que podría transmitir el diente por flexión:

$$F_{t,m\acute{a}x} = \sigma_{adm} \cdot b \cdot m \cdot Y$$

El factor de Lewis ( $Y$ ) depende de los parámetros  $s$  y  $h$ , que en la mayoría de los casos resulta muy difícil de medir. Por ello, es frecuente calcular el factor de Lewis ( $Y$ ) a partir de expresiones más simples que proporcionen valores bastante aproximados, o mediante tabla como la que se muestra a continuación:

<b>Factor de Lewis, Y</b>			
Número de dientes	$\alpha = 14,5^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	Diente corto
10	0,056	0,064	0,083
11	0,061	0,072	0,092
12	0,067	0,078	0,099
13	0,071	0,083	0,103
14	0,074	0,088	0,108
15	0,078	0,092	0,111
16	0,080	0,094	0,115
17	0,083	0,096	0,117
18	0,085	0,098	0,120
19	0,088	0,100	0,123
20	0,090	0,102	0,125
21	0,092	0,104	0,127
23	0,094	0,106	0,130
25	0,097	0,108	0,133
27	0,099	0,111	0,136
30	0,101	0,114	0,139
34	0,104	0,118	0,142
38	0,106	0,122	0,145
43	0,109	0,126	0,147
50	0,111	0,130	0,151
60	0,113	0,134	0,154
75	0,115	0,138	0,158
100	0,117	0,142	0,161
150	0,119	0,146	0,165
300	0,122	0,150	0,170
Cremallera	0,124	0,154	0,175

Tabla extraída como n° 1 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

Si no se tiene acceso a la tabla anterior, se puede emplear también las siguientes expresiones para el cálculo del Factor de Lewis (Y), en función del ángulo de presión ( $\alpha$ ) de tallado del diente y del número de dientes (Z) del engranaje. Así,

- Para un ángulo de presión,  $\alpha = 15^\circ \approx 14,5^\circ$  resulta:

$$Y = \frac{2 \cdot Z}{15 \cdot (Z + 10)}$$

$$Y = \frac{2 \cdot 35}{15 \cdot (35 + 10)}$$

de esta manera se tiene que  $Y = 0,104$

Por otro lado, la anterior expresión [2] que proporciona la fuerza tangencial ( $F_t$ ) transmitida al diente, está obtenida aplicando sólo la estática, es decir, no tiene en cuenta los efectos dinámicos producidos durante el movimiento de giro del engranaje.

En efecto, la velocidad de rotación del engranaje introduce nuevas fuerzas ligadas a la inercia de las masas en movimiento, que van a producir un incremento de la fuerza transmitida al diente.

Para tener en cuenta este efecto se corrige la expresión [2] afectándola de un coeficiente  $C_s$  de mayoración de la carga, en función de la velocidad de giro ( $v$ ) medida en la circunferencia primitiva ( $v = \omega \cdot r$ , donde  $\omega$  es la velocidad angular de giro en rad/s, y  $r$  es el radio primitivo).

- Para  $v < 600$  m/min:

$$C_s = \frac{180 + v}{180}$$

Para saber a qué velocidad tangencial gira el engrane se realizará primero un prediseño del motor y motorreductor.

El mismo será un motorreductor DC de 12/24Volts de entrada, con las siguientes características;

- Denominación: Motor 25W + caja reductora
- Eje: Diámetro: 8 mm, Largo: 30 mm
- Motorreductor: Diámetro 37 mm, Largo 125 a 150 mm (según las etapas)
- V nominal = 12V, 24V
- $I_o$  (I de vacío) = 0.5 A
- I nominal = 1.5 A,
- Velocidad (rpm): 0.8, 1.8, 4, 7.5, 17, 25, 30, 44, 66, 100, 177, 266, 400, 1066, 1600.



- Adoptamos ***4RPM***  $\equiv 0,418\text{rad/seg.}$
- Cupla máxima = 56, 88 kg.cm  $\equiv 5,57 \text{ N.m}$
- M2 (Par nominal) = 500 N.cm = 5 N.m = 51 kgcm

La expresión matemática que define la potencia que transmite un eje de transmisión en función del par de fuerzas y de su velocidad angular de giro, es la siguiente:

$$P = T \cdot \omega$$

siendo,

P, la potencia transmitida por el eje, en W (vatios);

T, es el par de fuerzas que desarrolla, en N·m = 5,57Nm

$\omega$ , es la velocidad angular, en rad/s. = 0,418 rad/seg.

$$P = 5,57\text{Nm} \cdot 0,418\text{rad/seg.} = 2,33\text{W}$$

Donde Rp2 es el radio primitivo del engranaje conductor que se acopla al motoreductor, siendo;

$$Rp2 = 37,5\text{mm}$$

$$\omega2 \text{ (conductora)} = 2 \cdot \pi \cdot n2/60\text{seg} = 2 \cdot \pi \cdot 4\text{rpm}/60\text{seg} = 0,418\text{rad/seg.}$$

$$V1 = V2 = R2 \cdot \omega2 = 0,0375\text{m} \cdot 0,418\text{rad/seg.} = 0,0157\text{m/seg}$$

$$\omega1 \text{ (conducida)} = V1 / R1 = 0,0157\text{m/seg.} / 0,075\text{m} = 0,21\text{rad/seg.} \equiv 2\text{RPM}$$

El valor de la velocidad tangencial es común para ambos engranajes.

De esta manera podemos ahora calcular el coeficiente Cs,

$$Cs = \frac{180 + 0,0157\text{m/seg.}}{180}$$

$$Cs = 1$$

El valor del coeficiente es despreciable debido a la baja velocidad tangencial.



Por lo tanto, la expresión que proporcionaría la fuerza transmitida al diente, considerando los efectos dinámicos, quedaría de la siguiente forma:

$$F_t = \sigma \cdot b \cdot m \cdot Y \cdot C_s$$

Si reemplazamos el valor de la tensión por la tensión admisible del material elegido, obtendremos el valor de la fuerza tangencial máxima que puede soportar el diente a flexión.

$$F_{tmax.} = \sigma_{adm} \cdot b \cdot m \cdot Y \cdot C_s$$

**PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACEROS**

Los valores indicados para aceros laminados en caliente (HR, *hot-rolled*) y estirados en frío (CD, *cold-drawn*) son valores mínimos estimados que suelen esperarse en el intervalo de tamaños de  $\frac{3}{8}$  a  $1\frac{1}{2}$  pulg. Un valor mínimo está aproximadamente varias desviaciones estándares por debajo de la media aritmética. Los valores mostrados para aceros con tratamiento térmico son los llamados valores típicos. Un valor típico no es el medio ni el mínimo. Puede obtenerse mediante un control cuidadoso de las especificaciones de compra y el tratamiento térmico, junto con la inspección y ensayo continuos. Las propiedades indicadas en esta tabla provienen de varias fuentes y se cree que son representativas. Sin embargo, hay tantas variables que afectan estas propiedades que su naturaleza aproximada debe reconocerse claramente.

Número UNS	Número AISI	Procesamiento	Resistencia de fluencia kpsi †	Resistencia a la tensión kpsi †	Elongación en 2 pulg %	Reducción en área %	Dureza Brinell H <sub>B</sub>
G10100	1010	HR	26	47	28	50	95
		CD	44	53	20	40	105
G10150	1015	HR	27	50	28	50	101
		CD	47	56	18	40	111
G10180	1018	HR	32	58	25	50	116
		CD	54	64	15	40	126
		HR	33	56	25	45	121
G10350	1035	CD	60	78	10	35	167
		HR	39	72	18	40	143
		CD	67	80	12	35	163
		Estirado a 800°F	81	110	18	51	220
G10400	1040	Estirado a 1000°F	72	103	23	59	201
		Estirado a 1200°F	62	91	27	66	180
		HR	42	76	18	40	149
		CD	71	85	12	35	170
G10450	1045	Estirado a 1000°F	86	113	23	62	235
		HR	45	82	16	40	163
G10500	1050	CD	77	91	12	35	179
		HR	49	90	15	35	179
		CD	84	100	10	30	197

Tabla 26, Propiedades mecánicas de aceros, denominación AISI.  
Extraída como tabla n° 2 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn150.html>

De la tabla anterior si se elige un acero AISI 1010 HR (laminado en caliente) se tiene un valor de resistencia a la fluencia de 26Kpsi que equivale a  $18,27\text{kg/mm}^2$ .



De esta manera se tiene:

$$F_{tmax.} = 18,27\text{kg/mm}^2 \cdot 20\text{mm} \cdot 2 \cdot 0,104 \cdot 1 = 76\text{kg}$$

Este resultado es el valor de la fuerza máxima que se puede aplicar sobre los dientes de la rueda conductora, mientras que para la rueda conducida de igual características en sus propiedades mecánicas se puede aplicar una fuerza máxima de valor como se calculará a continuación;

Primero se calcula el factor de Lewis para un número de dientes igual a 75;

$$Y = \frac{2 \cdot 75}{15 \cdot (75 + 10)}$$

$$Y = 0,117$$

La fuerza máxima para esta rueda que posee un ancho de flanco y modulo igual que la rueda conductora, será de:

$$F_{tmax.} = \sigma_{adm} \cdot b \cdot m \cdot Y \cdot C_s$$

$$F_{tmax.} = 18,27\text{kg/mm}^2 \cdot 20\text{mm} \cdot 2 \cdot 0,117 \cdot 1 = 85,5\text{kg}$$

La fuerza aplicada sobre el diente mediante el par máximo producido por el motorreductor es:

$$F_t = M_{2m\acute{a}x.} / R_{p2} = 0,568\text{kgm} / 0,0375\text{m} = 15,14\text{kg}$$

Ahora si calculamos la fuerza real que se aplicará sobre los dientes, la misma resultará del momento resistente que surge de la reacción N ejercida por el peso de la estructura sobre el rodamiento de agujas de empuje axial y radial (rodamiento cónico). Ver Item siguiente.



### 12.4.2 Par de arranque

El par de arranque de un rodamiento se define como el momento de fricción que el rodamiento debe superar para empezar a girar. Por lo tanto, solo se deben considerar el momento de fricción deslizante, de rodadura y el momento de fricción de los sellos, *si corresponde*. Se puede calcular el par de arranque a una temperatura ambiente de 20 a 30 °C (70 a 85 °F) usando:

$$M_{start} = M_{rr} + M_{sl} \text{ (Vease Cálculo en Anexo)}$$

Donde;

$M_{start}$ : momento de fricción de arranque [Nmm]

$M_{rr}$ : momento de fricción de rodadura [Nmm]

$M_{sl}$ : momento de fricción deslizante [Nmm]

$M_{seal}$  = momento de fricción de los sellos [Nmm], *solo si corresponde*.

Sin embargo, el par de arranque puede ser considerablemente superior en los rodamientos de rodillos con un ángulo de contacto grande. Puede ser hasta cuatro veces superior en los rodamientos de rodillos cónicos de las series 313, 322 B, 323 B y T7FC,

Ahora bien, si pasamos a calcular la fuerza resistente que se tendrá en el diente de la rueda conducida, es decir, el engranaje unido a la columna móvil (corona principal), tendremos que dividir este par resistente por la distancia o brazo de palanca (radio primitivo del engranaje);

$$F_t = M_r / R_p = 3,52 \text{kgcm} / 7,5 \text{cm} = \mathbf{0,469 \text{kg}}$$

Ahora si pasamos a calcular el valor de la tensión producida por la flexión en los dientes de ambas ruedas con dicha fuerza generada:

$$\sigma = \frac{6 \cdot F_t \cdot h}{b \cdot s^2}$$

$$\sigma = \frac{6 \cdot 0,469 \text{kg} \cdot 4,33 \text{mm}}{20 \text{mm} \cdot (3,14 \text{mm})^2} = 0,0618 \text{kg/mm}^2$$

$$\sigma_{adm} = 18,27 \text{kg/mm}^2 > 0,0618 \text{kg/mm}^2$$

## 12.5 Resistencia a fatiga del diente

Se entiende, que por la manera de trabajar de los dientes de un engranaje, éstos van a estar sometido a unas cargas fluctuantes y cíclicas en el tiempo que hagan que su agotamiento por fatiga sea, en la mayoría de las ocasiones, la causa principal de fallo. Estas cargas generan en la base del diente una concentración de tensiones, tal como se muestra en la figura siguiente.

La rotura por fatiga de la base del diente es lo que se va a estudiar en este apartado.

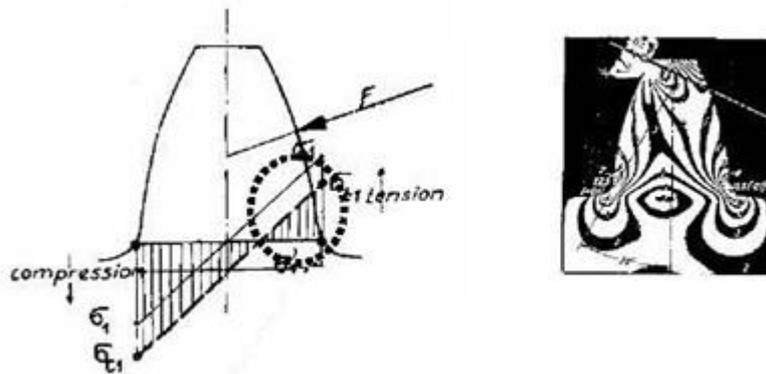


Figura 65, Distribución de tensiones en la base del diente.

Figura extraída como figura 4 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

La manera de proceder para el cálculo de la resistencia por fatiga de los dientes de un engranaje sería la siguiente:

- 1°.- Se calcularía la tensión por fatiga a flexión ( $\sigma$ ), según AGMA, originada en la base del diente.
- 2°.- Para el tipo de material empleado en la fabricación del engranaje, su durabilidad exigida en tiempo de funcionamiento, condiciones de trabajo y fiabilidad establecidas, se calcula una tensión admisible ( $\sigma_{adm}$ ).
- 3°.- De la comparación de ambas tensiones, se obtendría un coeficiente de seguridad ( $n$ ), expresado como:

$$n = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma}$$

Se considera de buena práctica que el coeficiente de seguridad,  $n > 3$ . A continuación se explica cómo calcular las tensiones  $\sigma$  y  $\sigma_{adm}$ .

En primer lugar se procede a calcular la tensión por flexión ( $\sigma$ ) a fatiga del material originada por las condiciones de trabajo en la base del diente. Para ello se suele emplear la siguiente expresión de base empírica, según AGMA:

$$\sigma = \frac{K_a \cdot K_m \cdot K_s}{K_v} \cdot \frac{F_t}{b \cdot J \cdot m}$$

donde:

$F_t$  : es la fuerza tangencial transmitida al diente;

$b$  : es el ancho del diente (flanco);

$m$  : es el módulo del engranaje;

$J$  : es el factor AGMA

$K_a$  : es el factor de aplicación;

$K_m$  : es el factor de distribución de la carga sobre la cara del diente;

$K_s$  : es el factor de tamaño;

$K_v$  : es el factor dinámico.

-  $J$  es el factor AGMA y surge de la siguiente tabla:

Se adoptará para un engranaje conductor de 35 dientes y un engranaje conducido de 75 dientes de la tabla 27 siguiente;

**Tabla 13-5 FACTOR GEOMÉTRICO  $J$  DE LA AGMA PARA EL CASO DE DIENTES**  
**CON  $\phi = 20^\circ$ ,  $a = 1.000$  pulg,  $b = 1.250$  pulg  $\gamma_f = 0.300$  pulg**

Número de dientes	Número de dientes del engrane conectado						
	17	25	35	50	65	300	1000
18	0.324 04	0.332 14	0.338 40	0.344 04	0.350 50	0.355 94	0.361 12
19	0.330 29	0.338 78	0.345 37	0.351 34	0.358 22	0.364 05	0.369 63
20	0.336 00	0.344 85	0.351 76	0.358 04	0.365 32	0.371 51	0.377 49
21	0.341 24	0.350 44	0.357 64	0.364 22	0.371 86	0.378 41	0.384 75
22	0.346 07	0.355 59	0.363 06	0.369 92	0.377 92	0.384 79	0.391 41
24	0.354 68	0.364 77	0.372 75	0.380 12	0.388 77	0.396 26	0.403 64
26	0.362 11	0.372 72	0.381 15	0.388 97	0.398 21	0.405 25	0.414 11
28	0.368 60	0.379 67	0.388 51	0.396 73	0.406 50	0.415 04	0.423 51
30	0.374 62	0.385 80	0.395 00	0.403 59	0.413 83	0.422 83	0.431 79
34	0.383 94	0.396 11	0.405 94	0.415 17	0.426 24	0.436 04	0.445 86
38	0.391 70	0.404 46	0.414 80	0.424 56	0.436 33	0.446 80	0.457 35
45	0.402 23	0.415 79	0.426 85	0.437 35	0.450 10	0.461 52	0.473 10
50	0.408 08	0.422 08	0.433 55	0.444 48	0.457 78	0.469 75	0.481 93
60	0.417 02	0.431 73	0.443 83	0.455 42	0.469 60	0.482 43	0.495 57
75	0.426 20	0.441 63	0.454 40	0.466 68	0.481 79	0.495 54	0.509 70
100	0.435 61	0.451 80	0.465 27	0.478 27	0.494 37	0.509 09	0.524 35
150	0.445 30	0.462 26	0.476 45	0.490 23	0.507 16	0.523 12	0.539 54
300	0.455 26	0.473 04	0.487 98	0.502 56	0.520 78	0.537 65	0.555 33
Cremañera	0.465 54	0.484 15	0.499 88	0.515 29	0.534 67	0.552 72	0.571 73

Tabla 27, Factor geométrico  $J$  de la AGMA.

Tabla 13-5 extraída de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

Se adoptará un valor de  $J$  de 0,421

-  $K_a$  es el factor de aplicación:

El factor de aplicación ( $K_a$ ), dependiendo del tipo de trabajo que desarrolle el engranaje, toma uno de los valores mostrados en la siguiente tabla:

FUENTE DE ENERGÍA	CARGA EN LA MÁQUINA IMPULSADA		
	Uniforme	Choque Moderado	Choque Fuerte
Uniforme	1,00	1,25	> 1,75
Choque Ligero	1,25	1,50	> 2,00
Choque Mediano	1,50	1,75	> 2,25

Tabla 28, Factor de aplicación ( $k_a$ )

Extraída como tabla 3 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>



Se adoptará un factor  $K_a = 1$ , para fuente de energía “Uniforme” y para carga en la máquina impulsada “Uniforme”.

-  $K_m$  es el factor de distribución de la carga:

El factor de distribución de la carga ( $K_m$ ), dependiendo de la condición de soporte del engranaje y su anchura, toma uno de los valores mostrados en la siguiente tabla:

CONDICIÓN DE SOPORTE	ANCHO DE LA CARA, pulgadas (mm.)			
	$\leq 2$ (50)	6 (150)	9 (225)	$\geq 16$ (400)
Montaje exacto, con bajas holguras en cojinetes, deflexiones mínimas. Engranajes de precisión.	1,30	1,40	1,50	1,80
Montajes menos rígidos, engranajes menos precisos, con contacto a todo lo ancho de la cara.	1,60	1,70	1,80	2,00
Exactitud y montaje de modo que exista contacto incompleto con la cara	$> 2,00$			

Tabla 29, Factor de distribución de la carga ( $K_m$ )

Extraída como tabla 4 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

Se adoptará un factor  $K_m = 1,30$  para condición de soporte de “Engranajes de precisión” y ancho de la cara  $< 2$ in (50,8mm).

-  $K_s$  es el factor de tamaño:

El factor de tamaño ( $K_s$ ), tiene como objetivo tener en cuenta de alguna manera una posible falta de uniformidad en las propiedades del material del diente a lo largo de su geometría.

No obstante, siempre que se realice una adecuada elección del tipo de acero en función del tamaño del engranaje, del tratamiento térmico y del proceso de templado o endurecimiento, AGMA recomienda utilizar un factor de tamaño igual a la unidad. En caso contrario, o que no haya seguridad al respecto, se debe emplear un factor  $K_s > 1$ .

-  $K_v$  es el factor dinámico:

El factor de dinámico ( $K_v$ ), dependiendo de la velocidad lineal en la línea de paso del engranaje, toma los valores mostrados en la siguiente tabla:

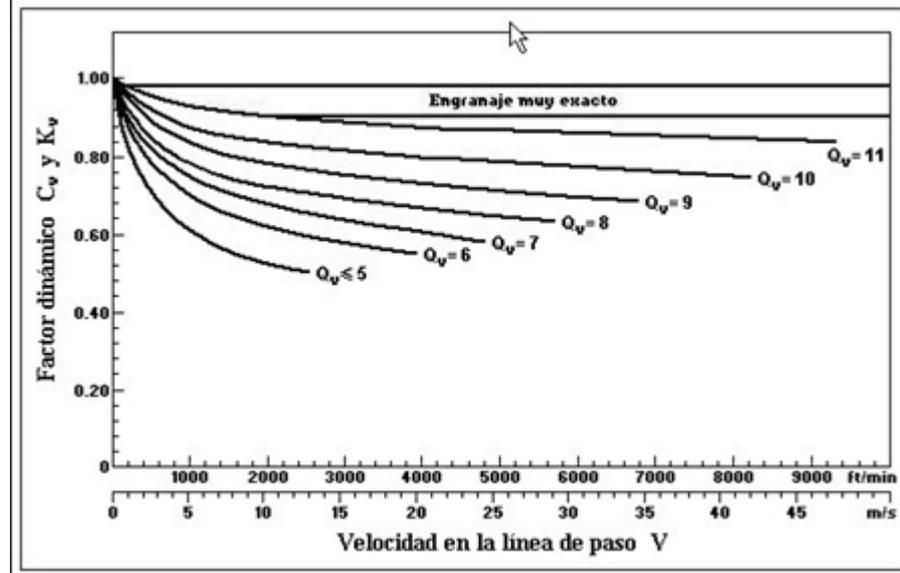


Gráfico 17, Factor dinámico (kv)

Extraída como tabla 5 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

Los valores de Qv son los denominados índices de calidad que para los valores de 3 a 7 se incluyen los engranajes de calidad comercial y para los índices de 8 a 12 son los de calidad de precisión.

Al tener una velocidad tangencial o lineal muy baja igual 0,0656m/seg. se tendrá un factor dinámico próximo a la unidad.

De esta manera se tiene en la ecuación de la tensión por flexión:

$$\sigma = \frac{1 \cdot 1,30 \cdot 1}{1} \cdot \frac{0,469kg}{20mm \cdot 0,421 \cdot 2mm}$$

$$\sigma = 0,0362kg/mm^2$$

Una vez obtenido la tensión de flexión por fatiga a la que trabaja el diente, el siguiente paso es determinar su máxima tensión admisible ( $\sigma_{adm}$ ) para comparación. Para el cálculo de la tensión admisible del engranaje ( $\sigma_{adm}$ ) se emplea la siguiente expresión empírica, según AGMA:

$$\sigma_{adm} = \frac{S_T \cdot K_L}{K_T \cdot K_R}$$



donde:

ST: es la resistencia a flexión;

KL: es el factor de duración;

KT: es el factor de temperatura;

KR: es el factor de fiabilidad.

- ST es la resistencia a flexión:

El valor de la resistencia a flexión del material (ST), se puede tomar de los valores mostrados en la siguiente tabla:

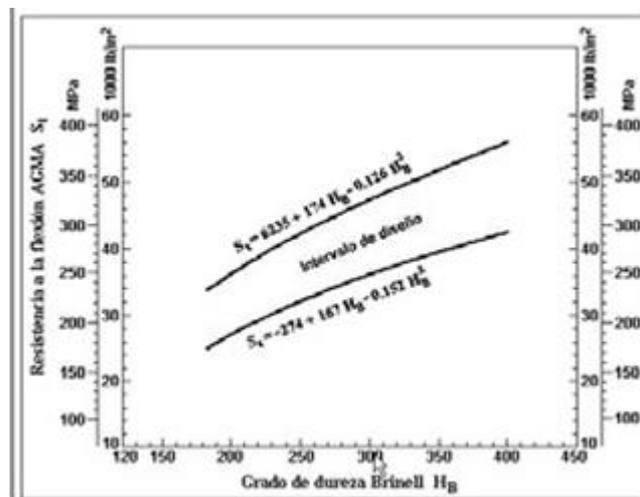


Gráfico 18, Resistencia a flexión (ST)

Extraída como tabla 6 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

Para el acero AISI 1010 HR de dureza Brinell HB 95 se tiene un valor de ST en la zona de intervalo de diseño;

$$ST = 150\text{MPa} \equiv 15,29\text{kg/mm}^2$$

- KL es el factor de duración:

El factor de duración (KL), dependiendo del número de ciclos de la vida útil para la cual se diseñe el engranaje, toma los valores mostrados en la siguiente tabla:

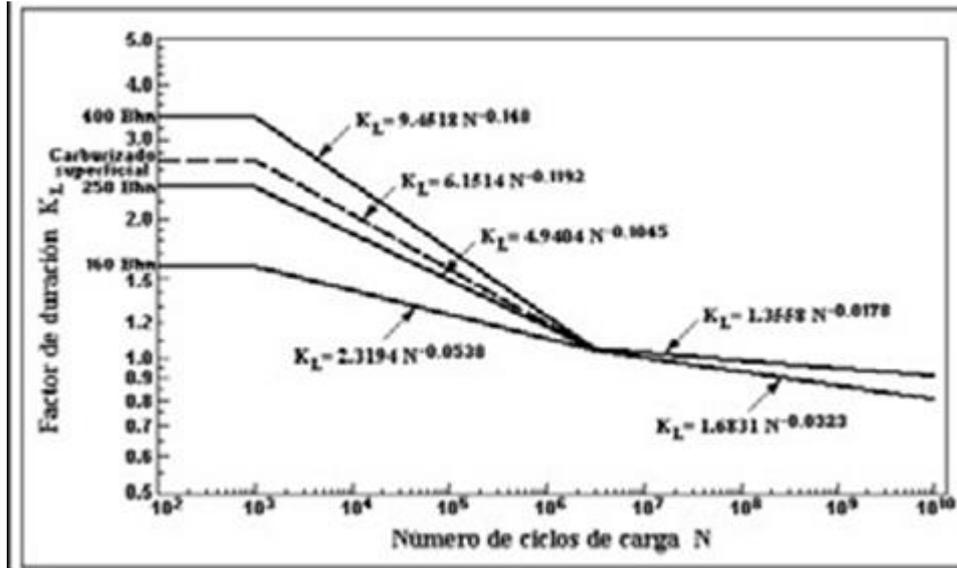


Gráfico 19, Factor de duración (KL)

Extraída como tabla 7 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

Se adopta un factor de KL igual a la unidad, eligiendo para una dureza cercana a 160 Brinell (HB) y un número de ciclo de carga de 107.

- KT es el factor de temperatura:

El factor de temperatura (KT), tiene en cuenta la influencia que sobre la tensión admisible del material tiene un aumento de la temperatura del aceite de lubricación que baña al engranaje.

Para temperaturas de hasta 250 °F (121 °C) el factor de temperatura es prácticamente igual a la unidad. Sólo cuando se alcancen en el engranaje temperaturas superiores a este valor, debe usarse la siguiente expresión para el cálculo de dicho factor:

$$KT = \frac{460 + T}{620}$$

Donde:

T: es la temperatura pico de operación del aceite en grados Fahrenheit.



En nuestro caso los engranajes prestarán su servicio a temperatura ambiente, por lo que el factor KT será igual a la unidad.

- KR: es el factor de fiabilidad.

El factor de fiabilidad (KR), dependiendo del grado de fiabilidad que se le exija al sistema, toma los valores mostrados en la siguiente tabla:

Grado de Fiabilidad (%)	Factor $K_R$
90	0,85
99	1,00
99,9	1,25
99,99	1,50

Tabla 30, Factor de fiabilidad (KR)

Extraída como tabla 8 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

Se adopta como factor de fiabilidad de 1, ya que se espera un grado de fiabilidad de 99%.

Una vez hallado los coeficientes se tiene un valor de  $\sigma_{adm}$ :

$$\sigma_{adm} = \frac{15,29\text{kg/mm}^2 \cdot 1}{1 \cdot 1}$$

$$\sigma_{adm} = 15,29\text{kg/mm}^2$$

De esta manera se tiene un factor de seguridad por Resistencia a Fatiga de:

$$n = \sigma_{adm} / \sigma = 15,29\text{kg/mm}^2 / 0,0362\text{kg/mm}^2 = 422,37$$



## 12.6 Resistencia por desgaste superficial (pitting)

La resistencia al desgaste o picado (pitting) de la superficie de los dientes es otro de los factores que condiciona el fallo de un engranaje. Los factores que influyen en la resistencia al desgaste son:

- El valor de la presión de contacto entre dientes o también llamada presión de Hertz;
- Número de ciclos del régimen de trabajo a que está sometido el engranaje;
- Grado de acabado superficial del engranaje;
- Dureza de la cara del diente;
- Tipo de lubricación empleada.

Como en el caso anterior, la manera de proceder para el cálculo de la seguridad del engranaje frente al fallo por desgaste superficial o picado del diente, sería el siguiente:

1°.- Se calcularía la tensión por contacto ( $\sigma_C$ ), según AGMA, a que está sometido el engranaje para las condiciones de trabajo dadas.

2°.- Para el tipo de material empleado en la fabricación del engranaje, su durabilidad deseada, condiciones de trabajo y fiabilidad establecidas, se calcula su tensión de contacto admisible ( $\sigma_{C,adm}$ ).

3°.- De la comparación de ambas tensiones, se obtendría un coeficiente de seguridad ( $n$ ), da valor:

$$n = \sigma_{C,adm} / \sigma_C$$

Se considera de buena práctica que el coeficiente de seguridad,  $n > 3$ . A continuación se explica cómo proceder para el cálculo de ambas tensiones.

Se comienza en primer lugar por calcular la tensión por contacto ( $\sigma_C$ ) a que está sometido el engranaje para las condiciones de trabajo. Para ello se suele emplear la siguiente expresión de base empírica, según AGMA:

$$\sigma_c = C_p \cdot \left[ \frac{C_A \cdot C_M \cdot C_S \cdot C_F}{C_V} \cdot \frac{F_t}{b \cdot d_p \cdot I} \right]^{1/2}$$

donde:

F<sub>t</sub>: es la fuerza tangencial transmitida al diente;

b: es el ancho del diente (flanco);

d<sub>p</sub> : paso diametral

I : es el factor geométrico para el esfuerzo de contacto;

C<sub>P</sub> : es el coeficiente elástico;

C<sub>A</sub> : es el factor de aplicación para el esfuerzo de contacto;

C<sub>M</sub> : es el factor de distribución de la carga;

C<sub>S</sub> : es el factor de tamaño para el esfuerzo de contacto;

C<sub>F</sub> : es el factor de estado o condición de la superficie.

C<sub>V</sub> : es el factor dinámico.

A continuación se expone la forma de asignar los valores a estos nuevos parámetros:

- C<sub>A</sub> es el factor de aplicación para el esfuerzo de contacto:

El factor de aplicación (C<sub>A</sub>), dependiendo del tipo de trabajo que desarrolle el engranaje, toma uno de los valores mostrados en la siguiente tabla:

FUENTE DE ENERGÍA	CARGA EN LA MÁQUINA IMPULSADA		
	Uniforme	Choque Moderado	Choque Fuerte
Uniforme	1,00	1,25	> 1,75
Choque Ligero	1,25	1,50	> 2,00
Choque Mediano	1,50	1,75	> 2,25

Tabla 31, Factor de aplicación (C<sub>A</sub>).

Extraída como tabla 9 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

El factor de aplicación que se tomará será para una Fuente de energía “Uniforme” y una Carga en la máquina impulsada “Uniforme” igual a la unidad.

-  $C_p$  es el coeficiente elástico:

El coeficiente elástico ( $C_p$ ), en función del tipo de material de las ruedas engranadas, toma uno de los valores mostrados en la siguiente tabla:

Coeficiente elástico AGMA $C_p$ en unidades de $[\text{psi}]^{0.5}$ ( $[\text{MPa}]^{0.5}$ )*							
Material del piñón	$E_p$ psi (MPa)	Material del engrane					
		Acero	Hierro maleable	Hierro nodular	Hierro fundido	Bronce al aluminio	Bronce al estaño
Acero	30E6 (2E5)	2 300 (191)	2 180 (181)	2 160 (179)	2 100 (174)	1 950 (162)	1 900 (158)
Hierro maleable	25E6 (1.7E5)	2 180 (181)	2 090 (174)	2 070 (172)	2 020 (168)	1 900 (158)	1 850 (154)
Hierro nodular	24E6 (1.7E5)	2 160 (179)	2 070 (172)	2 050 (170)	2 000 (166)	1 880 (156)	1 830 (152)
Hierro fundido	22E6 (1.5E5)	2 100 (174)	2 020 (168)	2 000 (166)	1 960 (163)	1 850 (154)	1 800 (149)
Bronce al aluminio	17.5E6 (1.2E5)	1 950 (162)	1 900 (158)	1 880 (156)	1 850 (154)	1 750 (145)	1 700 (141)
Bronce al estaño	16E6 (1.1E5)	1 900 (158)	1 850 (154)	1 830 (152)	1 800 (149)	1 700 (141)	1 650 (137)

\* Los valores de  $E_p$  de esta tabla son aproximados, y se aplicó  $\nu = 0.3$  como aproximación de la razón de Poisson para todos los materiales.

Tabla 32, Coeficiente elástico ( $C_p$ ).

Extraída como tabla 10 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

El coeficiente elástico en MPa será de  $191 = 19,47\text{kg/mm}^2$ , para materiales del piñón y del engrane Acero.

-  $C_m$  es el factor de distribución de la carga:

El factor de distribución de la carga ( $C_m$ ), dependiendo de la condición de soporte del engranaje y su anchura, toma uno de los valores mostrados en la siguiente tabla:

CONDICIÓN DE SOPORTE	ANCHO DE LA CARA, pulgadas (mm.)			
	≤ 2 (50)	6 (150)	9 (225)	≥ 16 (400)
Montaje exacto, con bajas holguras en cojinetes, deflexiones mínimas. Engranajes de precisión.	1,30	1,40	1,50	1,80
Montajes menos rígidos, engranajes menos precisos, con contacto a todo lo ancho de la cara.	1,60	1,70	1,80	2,00
Exactitud y montaje de modo que exista contacto incompleto con la cara	> 2,00			

Tabla 33, factor de distribución de la carga (CM)

Extraída como tabla 11 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

Al igual que en el inciso 10.3.2, se adoptará un factor  $C_m = 1,30$  para condición de soporte de “Engranajes de precisión” y ancho de la cara  $< 2\text{in}$  (50,8mm).

-  $C_S$  es el factor de tamaño:

El factor de tamaño ( $C_S$ ), tiene como objetivo tener en cuenta de alguna manera una posible falta de uniformidad en las propiedades del material del diente a lo largo de su geometría.

No obstante, siempre que se realice una adecuada elección del tipo de acero en función del tamaño del engranaje, del tratamiento térmico y del proceso de templado o endurecimiento, AGMA recomienda utilizar un factor de tamaño igual a la unidad. En caso contrario, o que no haya seguridad al respecto, se debe emplear un factor  $C_S > 1$ .

-  $C_F$  es el factor de estado o condición de la superficie:

El factor de estado de la superficie ( $C_F$ ), tiene en cuenta la posibilidad que existan defectos externos en la superficie del engranaje. Como valores que sirvan de referencia se pueden emplear los siguientes:

- Defectos de acabado en la superficie:  $C_F = 1,25$ ;
- Presencia de esfuerzos residuales:  $C_F = 1,25$ ;



• Combinación de ambos:  $CF = 1,50$ ;

-  $C_v$  es el factor dinámico:

El factor dinámico ( $K_v$ ), dependiendo de la velocidad lineal en la línea de paso del engranaje, toma los valores mostrados en la siguiente tabla:

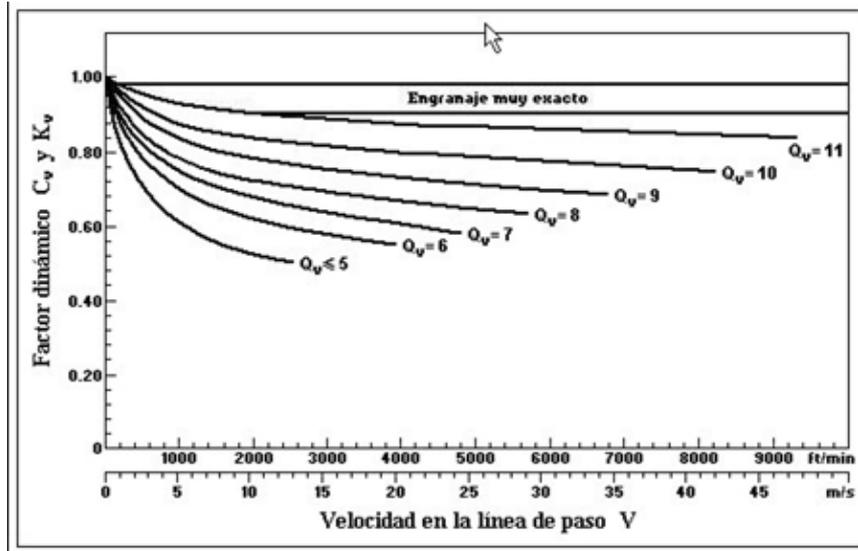


Tabla 34, Factor dinámico ( $C_v$ ).

Extraída como tabla 3 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

Al igual que en el inciso 10.3.2 los valores de  $Q_v$  son los denominados índices de calidad que para los valores de 3 a 7 se incluyen los engranajes de calidad comercial y para los índices de 8 a 12 son los de calidad de precisión.

Al tener una velocidad tangencial o lineal muy baja igual  $0,0126\text{m/seg.}$  se tendrá un factor dinámico próximo a la unidad.

-  $I$  es el factor geométrico:

El factor geométrico ( $I$ ) se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$I = \frac{\text{sen}(\alpha) \cdot \text{cos}(\alpha)}{2 \cdot m_n} \cdot \frac{i}{i + 1}$$



donde,

$\alpha$  : es el ángulo de presión de engrane.

$i$  : es la relación de transmisión del engrane .

$mn$  : es igual a 1 en engranes rectos.

$$i = \omega_{\text{conducida}} / \omega_{\text{conductor}} = 1,75 \text{ rad/seg.} / 0,875 \text{ rad/seg.} = 2$$

La relación de transmisión al ser  $< 1$  es de carácter reductor.

De esta manera se tiene reemplazando en la formula un valor de  $I$ :

$$I = \frac{\text{sen}(14^{\circ}30') \cdot \cos(14^{\circ}30')}{2 \cdot 1} \cdot \frac{2}{2 + 1}$$

$$I = 0,083$$

Ahora con todos los coeficientes seleccionados se pasa a calcular la tensión a la que está sometido el diente de ambas ruedas por desgaste superficial:

$$\sigma_c = 19,47 \text{ kg/mm}^2 \cdot \left[ \frac{1 \cdot 1,30 \cdot 1 \cdot 1,25}{1} \cdot \frac{0,469 \text{ kg}}{20 \text{ mm} \cdot 8,46 \cdot 0,083} \right]^{1/2} =$$

$$\sigma_c = 4,54 \text{ kg/mm}^2$$

A continuación se pasa a determinar la tensión de contacto admisible ( $\sigma_{C,adm}$ ), empleándose para ello la siguiente expresión empírica, según AGMA:

$$\sigma_{C,adm} = \frac{S_C \cdot C_L \cdot C_H}{C_T \cdot C_R}$$



donde:

SC: es la resistencia a la fatiga superficial, AGMA;

CL: es el factor de duración;

CH: es el factor de dureza;

CT: es el factor de temperatura;

CR: es el factor de fiabilidad.

- SC es la resistencia a la fatiga superficial:

Para conocer el valor de la resistencia a la fatiga superficial (SC), AGMA ha publicado valores de algunos materiales empleados en la construcción de engranajes, según se puede consultar en la siguiente tabla:

Resistencias $S_{fc}'$ a la fatiga superficial AGMA para una selección de materiales de engranes*							
Material	Clase AGMA	Designación del material	Tratamiento térmico	Dureza superficial mínima	Resistencia a la fatiga por flexión		
					psi x 10 <sup>3</sup>	MPa	
Acero	A1-A5		Endurecido en la masa	≤ 180 HB	85-95	590-660	
			Endurecido en la masa	240 HB	105-115	720-790	
			Endurecido en la masa	300 HB	120-135	830-930	
			Endurecido en la masa	360 HB	145-160	1000-1100	
			Endurecido en la masa	400 HB	155-170	1100-1200	
			Endurecido con llama o por inducción	50 HRC	170-190	1200-1300	
			Endurecido con llama o por inducción	54 HRC	175-195	1200-1300	
			Carburizado y cementado	55-64HRC	180-225	1250-1300	
			AISI 4140	Nitrurizado	84.6 15N	155-180	1100-1250
			AISI 4340	Nitrurizado	83.5 15N	150-175	1050-1200
			Nitralloy 135M	Nitrurizado	90.0 15N	170-195	1170-1350
Nitralloy N	Nitrurizado	90.0 15N	195-205	1340-1410			
Cromo al 25%	Nitrurizado	87.5 15N	155-172	1100-1200			
Cromo al 25%	Nitrurizado	90.0 15N	192-216	1300-1500			
Hierro fundido	20	Clase 20	Como está fundido		50-60	340-410	
	30	Clase 30	Como está fundido	175 HB	65-70	450-520	
	40	Clase 40	Como está fundido	200 HB	75-85	520-590	
Hierro nodular (dúctil)	A-7-a	60-40-18	Recocido	140 HB	77-92	530-630	
	A-7-c	80-55-06	Templado y revenido	180 HB	77-92	530-630	
	A-7-d	100-70-03	Templado y revenido	230 HB	92-112	630-770	
	A-7-e	120-90-02	Templado y revenido	230 HB	103-126	710-870	
Hierro maleable (perlítico)	A-8-c	45007		165 HB	72	500	
	A-8-e	50005		180 HB	78	540	
	A-8-f	53007		195 HB	83	570	
	A-8-i	80002		240 HB	94	650	
Bronce	Bronce 2	AGMA 2C	Fundición en arena	Resistencia a la tensión 40 ksi mínima	30	450	
	Al/Br 3	Aleación ASTM B-148 78 954	Con tratamiento térmico	Resistencia a la tensión 90 ksi mínimo	65	450	

Tabla 35, Resistencia a la fatiga superficial AGMA (SC).

Extraída como tabla 12 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

Se adoptará para un acero clase A1-A5 con una dureza superficial <185HB, ya que nuestro acero seleccionado AISI 1010 HR es de dureza Brinell 95HB, por lo que se tendrá un coeficiente de valor de resistencia a la fatiga por flexión de  $590\text{MPa} = 60,16\text{kg/mm}^2$ .

- CL es el factor de duración:

El factor de duración (CL), dependiendo del número de ciclos de la vida útil para la cual se diseñe el engranaje, toma los valores mostrados en la siguiente tabla:

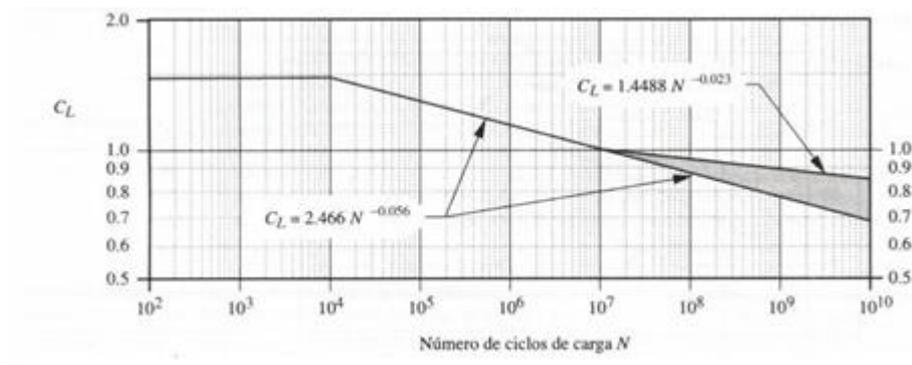


Tabla 36, factor de duración (CL).

Extraída como tabla 14 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

Se tomará un factor de duración para un número de ciclos de  $10^7$  igual a 1.

- CH es el factor de dureza:

El factor de dureza (CH), dependiendo del número de ciclos de la vida útil para la cual se diseñe el engranaje, toma los valores mostrados en la siguiente tabla:

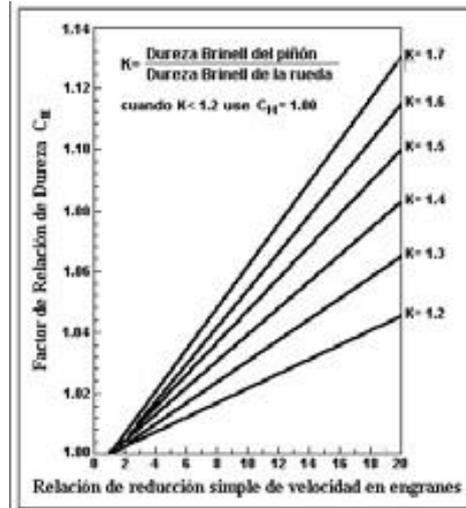


Tabla 37, factor de dureza (CH)

Extraída como tabla 15 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

Se tomará un factor de dureza igual a la unidad ya que la dureza de ambos engranes son iguales y su relación por ende es la unidad por lo que se aconseja que cuando esa relación es <1,2 se tome el factor CH= 1.

- CT es el factor de temperatura:

El factor de temperatura (CT), tiene en cuenta la influencia que sobre la tensión admisible del material tiene un aumento de la temperatura del aceite de lubricación que baña al engranaje.

Para temperaturas de hasta 250 °F (121 °C) el factor de temperatura es prácticamente igual a la unidad. Sólo cuando se alcancen en el engranaje temperaturas superiores a este valor, debe usarse la siguiente expresión para el cálculo de dicho factor:

$$C_T = \frac{460 + T}{620}$$



Donde:

T: es la temperatura pico de operación del aceite en grados Fahrenheit.

- CR es el factor de fiabilidad:

El factor de fiabilidad (CR), dependiendo del grado de fiabilidad que se le exija al sistema, toma los valores mostrados en la siguiente tabla:

Grado de Fiabilidad (%)	Factor $C_R$
90	0,85
99	1,00
99,9	1,25
99,99	1,50

Tabla 38, factor de fiabilidad (CR)

Extraída como tabla 16 de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn151.html>

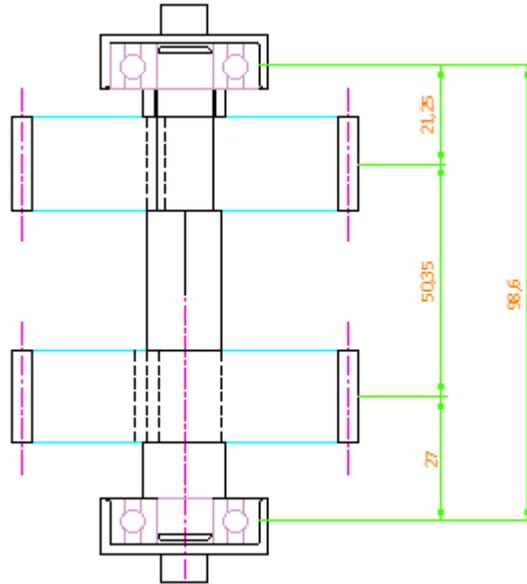
Al igual que en el inciso 10.4 se tomará un factor de 1 para una confiabilidad de 99%.

Ahora con todos los coeficientes resueltos el valor de la tensión admisible por resistencia por desgaste superficial será:

$$\sigma_{C,adm} = \frac{60,16\text{kg/mm}^2 \cdot 1 \cdot 1}{1 \cdot 1}$$

$$\sigma_{C,adm} = 60,16\text{kg/mm}^2 > 4,54\text{kg/mm}^2$$

13. Cálculo de resistencia del árbol motriz



Árbol motriz

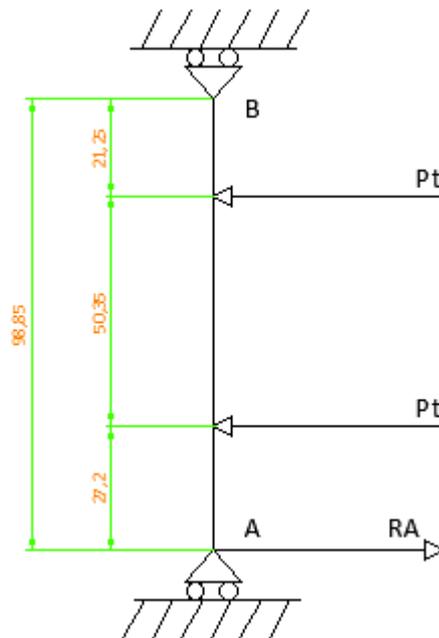


Diagrama de cuerpo libre



Donde:

$$Pt = 0,469\text{kg}$$

- Cálculo de las reacciones:

$$\Sigma F_x = Pt \times 2 - RA - RB = 0, \text{ donde } F_p = 0,469\text{Kg}$$

$$\Sigma MA = Pt \cdot 2,72\text{cm} - RB \cdot 9,885\text{cm} + Pt \cdot (2,72+5,04)\text{cm} = 0$$

$$RB = \frac{Pt \cdot (2,72+5,04)\text{cm} + Pt \cdot 2,72\text{cm}}{9,885\text{cm}}$$

$$RB = \frac{0,469\text{kg} \cdot (2,72+5,04)\text{cm} + 0,469\text{kg} \cdot 2,72\text{cm}}{9,885\text{cm}} = 0,497\text{kg}$$

$$RA = Pt \times 2 - RB = 0,469 \times 2 - 0,497\text{kg} = 0,469 \times 2 - 0,497\text{kg} = 0,441\text{kg}$$

- Cálculo del momento flector:

$$M_f \text{ a } 0 \text{ cm desde A (parte inf.)} \Rightarrow F_p \times 0\text{cm} = -255\text{kg} \times 0\text{cm} = 0$$

$$M_f \text{ a } 2,72\text{cm} \Rightarrow RA \times 2,72\text{cm} = 0,441\text{kg} \times 2,72\text{cm} = 1,2\text{kgcm}$$

$$M_f \text{ a } 7,76\text{cm} \Rightarrow RA \times 7,76\text{cm} - Pt \times 5,04\text{cm} = 0,441\text{kg} \times 7,76\text{cm} - 0,469\text{kg} \times 5,04\text{cm} = 1,05\text{kgcm}$$

$$M_f \text{ a } 9,88\text{cm} \Rightarrow RA \times 9,88\text{cm} - Pt \times 7,16\text{cm} - Pt \times 2,12 = 0,441\text{kg} \times 9,88\text{cm} - 0,469\text{kg} \times 7,16\text{cm} - 0,469\text{kg} \times 2,12 = 0\text{kgcm}$$

- El momento torsor es de:

$$Mt = Pt \times \text{radio prim.} = 0,469\text{kg} \times 3,5\text{cm} = 1,64\text{kgcm}$$

- Para un diámetro del árbol de 12cm, se tiene el siguiente valor de esfuerzo debido a flexo-torsión:

$$\sigma = \frac{16}{\pi \times d^3} \times (M_f + (M_f^2 + M_t^2)^{1/2}) =$$

$$\tau = \frac{16}{\pi \times d^3} \times (M_f^2 + M_t^2)^{1/2} =$$

$$\sigma = \frac{16}{\pi \times 1,2^3} \times (1,2 + (1,2^2 + 1,64^2)^{1/2}) = 9,52 \text{kg/cm}^2$$

$$\tau = \frac{16}{\pi \times 1,2^3} \times (1,2^2 + 1,64^2)^{1/2} = 5,98 \text{kg/cm}^2$$

Donde para una acero laminado en caliente con 0,2% de carbono posee en su limite de proporcionalidad los siguientes valores:

$$\sigma_{adm} = 2460 \text{kg/cm}^2$$

$$\tau_{adm} = 1476 \text{kg/cm}^2$$

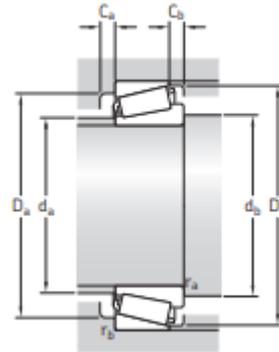
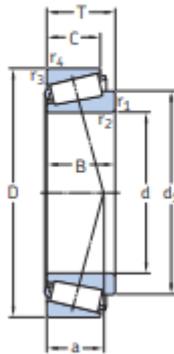
Demostrando que el árbol motriz se encuentra holgadamente resistente ante las sollicitaciones que experimentará para sacar del reposo (momento resistente) de la columna vertical móvil.



14. Rodamientos seleccionados de SKF Rolling – Bearings (catálogo).

14.1 Rodamiento cónico, base de giro. Páginas 826 y 827.

7.1 Rodamientos de una hilera de rodillos cónicos métricos  
d 35–45 mm

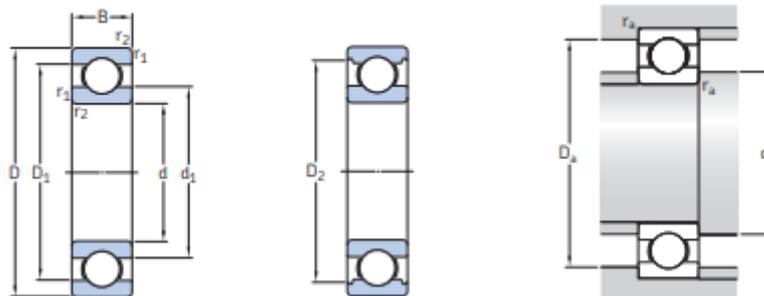


Dimensiones principales	Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga $P_u$	Velocidades nominales		Masa	Designación	Series de dimensiones para la normativa ISO 355 (ABMA)		
	dinámica C	estática $C_0$		Velocidad de referencia	Velocidad límite					
d D T	kN		kN	r. p. m.		kg	–	–		
mm	kN		kN	r. p. m.		kg	–	–		
<b>35</b>	62	18	37,4	49	5,2	8 000	11 000	0,23	32007 J2/Q	4CC
	62	18	42,9	54	5,85	8 000	10 000	0,23	32007 X/Q	4CC
	72	18,25	51,2	56	6,1	7 000	9 500	0,33	30207 J2/Q	3DB
	72	24,25	66	78	8,5	7 000	9 500	0,44	32207 J2/Q	3DC
	72	28	84,2	106	11,8	6 300	9 500	0,53	33207/Q	2DE
80	22,75	72,1	73,5	8,3	6 700	9 000	0,51	30307 J2/Q	2FB	
	22,75	61,6	67	7,8	6 000	8 500	0,52	31307 J2/Q	7FB	
	32,75	93,5	114	12,9	6 000	8 500	0,8	32307 BJ2/Q	5FE	
	32,75	95,2	106	12,2	6 300	9 000	0,75	32307 J2/Q	2FE	
<b>37</b>	80	32,75	93,5	114	12,9	6 300	9 500	0,77	32307/37 BJ2/Q	5EE
<b>38</b>	63	17	36,9	52	5,4	7 500	11 000	0,21	JL 69349 A/310/Q	3CC
	63	17	36,9	52	5,4	7 500	11 000	0,2	JL 69349/310/Q	3CC
	68	19	52,8	71	7,65	7 000	10 000	0,3	32008/38 X/Q	3CC
<b>40</b>	68	19	52,8	71	7,65	7 000	9 500	0,28	32008 X/Q	3CD
	75	26	79,2	104	11,4	6 700	9 000	0,5	33108/Q	2CE
	80	19,75	61,6	68	7,65	6 300	8 500	0,42	30208 J2/Q	3DB
	80	24,75	74,8	86,5	9,8	6 300	8 500	0,53	32208 J2/Q	3DC
	80	32	105	132	15	5 600	8 500	0,73	33208/0CL7C	2DE

Dimensiones							Dimensiones de resaltes y radios de acuerdo								Factores de cálculo			
d	d <sub>1</sub>	B	C	r <sub>1,2</sub> min.	r <sub>3,4</sub> min.	a	d <sub>a</sub> máx.	d <sub>b</sub> min.	D <sub>a</sub> min.	D <sub>a</sub> máx.	D <sub>b</sub> min.	C <sub>a</sub> min.	C <sub>b</sub> min.	r <sub>a</sub> máx.	r <sub>b</sub> máx.	e	Y	Y <sub>0</sub>
mm							mm								-			
35	49,5	17	15	1	1	16	41	41	53	56	59	2	3	1	1	0,44	1,35	0,8
	49,6	18	14	1	1	15	40	41	54	56	59	4	4	1	1	0,46	1,3	0,7
	51,9	17	15	1,5	1,5	15	44	42	62	65	67	3	3	1,5	1,5	0,37	1,6	0,9
	52,4	23	19	1,5	1,5	17	43	42	61	65	67	3	5,5	1,5	1,5	0,37	1,6	0,9
	53,4	28	22	1,5	1,5	18	42	42	61	65	68	5	6	1,5	1,5	0,35	1,7	0,9
35	54,5	21	18	2	1,5	16	45	44	70	71	74	3	4,5	2	1,5	0,31	1,9	1,1
	59,6	21	15	2	1,5	25	44	44	62	71	76	4	7,5	2	1,5	0,83	0,72	0,4
	59,3	31	25	2	1,5	24	42	44	61	71	76	4	7,5	2	1,5	0,54	1,1	0,6
	54,8	31	25	2	1,5	20	44	44	66	71	74	4	7,5	2	1,5	0,31	1,9	1,1
37	59,3	31	25	2	1,5	24	44	44	66	71	74	4	7,5	2	1,5	0,54	1,1	0,6
38	52,2	17	13,5	1,3	1,3	14	44	44	55	56,5	60	3	3,5	1,3	1,3	0,43	1,4	0,8
	52,2	17	13,5	3,6	1,3	14	44	50	55	56,5	60	3	3,5	3,4	1,3	0,43	1,4	0,8
	54,7	19	14,5	1	1	15	46	46	60	62	65	4	4,5	1	1	0,37	1,6	0,9
40	54,7	19	14,5	1	1	15	46	46	60	62	65	4	4,5	1	1	0,37	1,6	0,9
	57,5	26	20,5	1,5	1,5	18	47	47	65	68	71	4	5,5	1,5	1,5	0,35	1,7	0,9
	57,5	18	16	1,5	1,5	16	49	47	69	73	74	3	3,5	1,5	1,5	0,37	1,6	0,9
	58,4	23	19	1,5	1,5	19	48	47	68	73	75	3	5,5	1,5	1,5	0,37	1,6	0,9
	59,7	32	25	1,5	1,5	21	47	47	67	73	76	5	7	1,5	1,5	0,35	1,7	0,9

## 14.2 Rodamiento rígido de bolas de una hilera, apoyo de columna vertical móvil. Páginas 332 y 333.

### 1.1 Rodamientos rígidos de una hilera de bolas d 80–100 mm

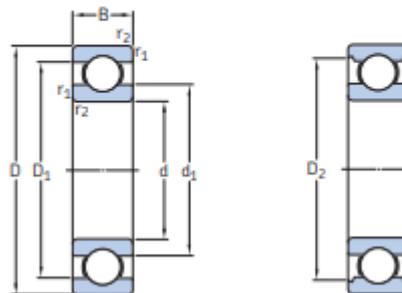


Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	C	C <sub>0</sub>	P <sub>u</sub>	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-
80	100	10	13	15	0,64	13 000	8 000	0,15	61816
	110	16	25,1	20,4	1,02	12 000	7 500	0,38	61916
	125	14	35,1	31,5	1,32	11 000	7 000	0,61	616016
	125	22	49,4	40	1,66	11 000	7 000	0,87	6016

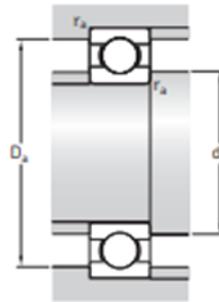
Dimensiones					Dimensiones de resaltes y radios de acuerdo			Factores de cálculo	
d	d <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	r <sub>1,2</sub> min.	d <sub>a</sub> min.	D <sub>a</sub> máx.	r <sub>a</sub> máx.	k <sub>r</sub>	f <sub>0</sub>
mm					mm			-	
<b>80</b>	<b>86,6</b>	<b>93,4</b>	-	<b>0,6</b>	<b>83,2</b>	<b>96,8</b>	<b>0,6</b>	<b>0,015</b>	<b>17</b>
	89,8	101	103	1	84,6	105	1	0,02	14
	95,3	110	-	0,6	83,2	121	0,6	0,02	16
	94,4	111	115	1,1	86	119	1	0,025	16

14.3 Rodamiento rígido de una hilera, apoyos del cabezal móvil. Páginas 324 y 325.

### 1.1 Rodamientos rígidos de una hilera de bolas d 12–22 mm



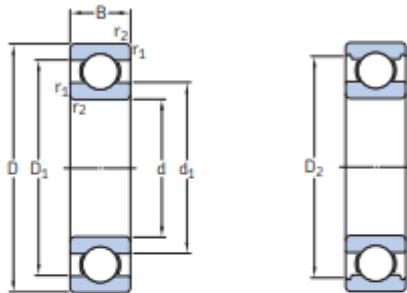
Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	dinámica C	estática C <sub>0</sub>	P <sub>u</sub>	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-
<b>20</b>	32	7	4,03	2,32	0,104	45 000	28 000	0,018	61804
	37	9	6,37	3,65	0,156	43 000	26 000	0,037	61904
	42	8	7,28	4,05	0,173	38 000	24 000	0,05	‡ 16004
	42	12	9,95	5	0,212	38 000	24 000	0,067	‡ 6004
	47	14	13,5	6,55	0,28	32 000	20 000	0,11	‡ 6204
	47	14	15,6	7,65	0,325	32 000	20 000	0,098	‡ 6204 ETN9
	52	15	16,8	7,8	0,335	30 000	19 000	0,14	‡ 6304
	52	15	18,2	9	0,38	30 000	19 000	0,14	‡ 6304 ETN9
	72	19	30,7	15	0,64	24 000	15 000	0,41	6404



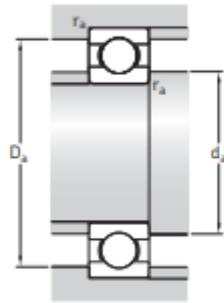
Dimensiones				Dimensiones de resaltes y radios de acuerdo			Factor de cálculo		
d	d <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	r <sub>1,2</sub> min.	d <sub>a</sub> min.	D <sub>a</sub> máx.	r <sub>a</sub> máx.	k <sub>r</sub>	f <sub>0</sub>	
mm				mm			-		
20	23,8	28,3	-	0,3	22	30	0,3	0,015	15
	25,5	31,4	32,7	0,3	22	35	0,3	0,02	15
	27,3	34,6	-	0,3	22	40	0,3	0,02	15
	27,2	34,8	37,2	0,6	23,2	38,8	0,6	0,025	14
	28,8	38,5	40,6	1	25,6	41,4	1	0,025	13
	28,2	39,6	-	1	25,6	41,4	1	0,025	12
	30,3	41,6	44,8	1,1	27	45	1	0,03	12
	30,3	42,6	-	1,1	27	45	1	0,03	12
	37,1	54,8	-	1,1	29	63	1	0,035	11

14.4 Rodamiento rígido una hilera, engranaje pivote. Páginas 324 y 325.

1.1 Rodamientos rígidos de una hilera de bolas d 12 – 22 mm



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	dinámica C	estática C <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-
12	21	5	1,74	0,915	0,039	70 000	43 000	0,0063	61801
	24	6	2,91	1,46	0,062	67 000	40 000	0,011	61901
	28	8	5,4	2,36	0,1	60 000	38 000	0,021	* 6001
	30	8	5,07	2,36	0,1	60 000	38 000	0,026	66101
	32	10	7,28	3,1	0,132	50 000	32 000	0,037	* 6201
	37	12	10,1	4,15	0,176	45 000	28 000	0,06	* 6301



Dimensiones					Dimensiones de resaltes y radios de acuerdo			Factores de cálculo	
d	d <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	r <sub>1,2</sub> min.	d <sub>a</sub> min.	D <sub>a</sub> máx.	r <sub>a</sub> máx.	k <sub>r</sub>	f <sub>0</sub>
mm					mm				
<b>12</b>	14,8	18,3	—	0,3	14	19	0,3	0,015	13
	16	20,3	—	0,3	14	22	0,3	0,02	15
	17	23,2	24,8	0,3	14	26	0,3	0,025	13
	17	23,6	24,8	0,3	14,6	27,6	0,3	0,025	13
	18,4	25,7	27,4	0,6	16,2	27,8	0,6	0,025	12
	19,5	29,5	31,5	1	17,6	31,4	1	0,03	11

# Costos

## 15. Estudio de Costos

### 15.1 Electrónica de seguimiento solar

<i>Presupuesto de componentes electrónicos</i>				
<i>Dispositivo Electrónico</i>	<i>Designación</i>	<i>Precio Unit. (\$)</i>	<i>Cant.</i>	<i>Total (\$)</i>
Amplificador Op.	LM741	84	2	168
Diodos Led		2,50	2	5
Diodos Rect.	1N4007	1,70	4	6,8
Resistencias	10k $\Omega$	2	2	4
	1M $\Omega$	3	1	3
	330k $\Omega$	8,2	2	16,4
	4,7k $\Omega$	4	1	4
	1k $\Omega$	4,5	4	18
Resistencia variable	50k $\Omega$	45	2	90
LDR	901Lux	50	1	50
Transistores	BC548B	10	3	30
	TIP137	45	4	180
Finales de carrera		345	2	690
Placa Experimental	PCB 10x15cm	194	1	194
			Total \$	<b>1.459,2</b>

### 15.2 Presupuesto de estructura y mecanismo para un eje móvil vertical

<i>Presupuesto de mecanismos para eje vertical</i>				
<i>Elemento</i>	<i>Designación</i>	<i>Precio Unit. (\$)</i>	<i>Cant.</i>	<i>Total (\$)</i>
Placas corte/plasma		1000	1	1.000
Espigas		300	5	1.750
Engranaje pivote		3000	1	3.000
Eje para Rod. 6201		450	1	450
Rodamientos	SKF 32008x/Q	600	1	600
	SKF 61816	180	2	360
	SKF 6201	70	2	140
Ensamble de cabezal a columna móvil		1264	1	1.264
Ensamble de columna móvil		1422	1	1.422
Apoyo de SKF61816		1501	1	1.501
Base de columna fija		2054	1	2.054
Soporte de corona central		2449	1	2.449

Soporte de Rod. 6201		830	2	1658
Árbol de piñón		1896	1	1.896
Engranaje motriz		2212	1	2.212
Juego engranaje-sin fin		4424	1	4.424
			<b>Total \$</b>	<b>26.180</b>

<i>Elementos estructurales</i>			
<i>Designación</i>	<i>Precio Unit. (\$)</i>	<i>Cant.</i>	<i>Total (\$)</i>
Tubo estructural 20x50mm, espesor 1,6mm		1 mt.	139,30
Tubo redondo 2", espesor 2mm	6mt	1 barra	976
Redondo 2 ¼", espesor 1,6mm		0,2mts	31,60
Redondo 3", espesor 3,2mm		0,9mts	638,70
Redondo 4", espesor 3,20mm		0,6mt	598,732
<b>Total \$</b>			<b>2.384,33</b>

<i>Mano de obra</i>	
<i>Item</i>	<i>Precio (\$)</i>
Construcción Columna fija	3.250
Construcción del cabezal	2.000
<b>Total \$</b>	<b>5.250</b>

### 15.3 Presupuesto para segundo eje adicional

<i>Presupuesto Eje adicional</i>				
<i>Elemento</i>	<i>Designación</i>	<i>Precio Unit. (\$)</i>	<i>Cant.</i>	<i>Total (\$)</i>
Aleta Superior		150	1	150
Espigas		300	2	600
Engranaje pivote		3000	1	3000
Eje para Rod. 6201		450	1	450
Rodamientos	SKF 6201	70	1	70
	SKF 6304	180	2	360
Apoyo de cabezal		1896	2	3.792
Tensor interior		435	1	435
Tensor del pivote		435	1	435
Tensor del brazo		435	1	435
Rotula		1500	1	1500
Perno pivote		140	1	140
Soporte de Rod. 6304		948	2	1.896
<b>Total \$</b>				<b>13.263</b>

#### 15.4 Elementos Eléctricos

<b><i>Elementos Eléctricos</i></b>			
<i>Designación</i>	<i>Precio Unit. (\$)</i>	<i>Cant.</i>	<i>Total (\$)</i>
Paneles fotovoltaicos 330W Policristalinos	10.499	3	31.497
Motor CC 25W - 12/24V	1.998	1	1.998
	<b>Total \$</b>		<b>33.495</b>

#### 15.5 Presupuesto del Proyecto/Prototipo

<b><i>Presupuesto Proyecto</i></b>		
<i>Item</i>		<i>Total (\$)</i>
<b>Componentes Electrónicos</b>		1.459,2
Estructura y mecanismo para un eje móvil vertical	<i>Mecanismos</i>	26.180
	<i>Elem. Estrc.</i>	2.384,33
	<i>M.O.</i>	5.250
<b>Componentes para eje adicional</b>		13.263
<b>Elementos Eléctricos</b>		33.495
<b>Total \$</b>		<b>82.031,53</b>



## 16. Bibliografía

### Energía Solar

- A.B. Meinel, M.P. Meinel. (1982). “Aplicaciones de la Energía Solar”, Editorial Reverté s.a.
- Petros Axaopoulos TEI de Atenas Grecia, Unidad 3: “Principios de la geometría solar” y Unidad 4: “Radiación Solar sobre superficies inclinadas”.
- Miguel Pareja Aparicio, Energía solar fotovoltaica-Cálculo de una instalación aislada, Editorial Marcombo.
- Nestor Pedro Quadri, Energía Fotovoltaica, Librería y Editorial Alsina (1994).
- Apuntes; Curso sobre *Introducción a las energías renovables y sus aplicaciones*, dictado por FRSF-UTN, año 2014, modalidad a distancia.
- Informe de Radiación Solar en la Provincia de Santa Fe, Programa de Generación de Energías Renovables, Año 2018.

### Parte I; Eléctrica

- Instalaciones Eléctricas, Marcelo Antonio Sobrevila, Alberto Luis Farina, Editorial; Alsina (2ª ed.)
- Reglamentación para la Ejecución de Instalaciones Eléctricas en Inmuebles, Edición: Marzo 2006, AEA 90364, Parte 7 sección 771.
- Dispositivos Electrónicos, Thomas L. Floyd, Editorial Ciencia y Técnica, Año 1994.
- Técnico en Electrónica – Fascículos Red Users, publicación Fox Andina, Año 2013.
- Electrónica Industrial Moderna, Timothy J. Maloney, Pearson Prentice Hall, 5º ed. 2006

### Parte II: Mecánica

- Diseño en Ingeniería Mecánica, Joseph Edward Shigley - Charles R. Mischke, Editorial; Mc Graw Hill (5ºed.).
- Estática - Temas de Estabilidad, Claudio A. Molanes, Editorial; Answer Just in Time (2º ed.).
- Elementos de Resistencia de Materiales, S. Timoshenko – D. H. Young, Editorial; Limusa-Noriega Editores.
- Manual de fórmulas técnicas, Kurt Gieck, Editorial; Alfaomega (19ª ed.)
- Máquinas – Cálculos de Taller, A.L. Casillas, Edición Hispanoamericana (1997).
- Reglamento CIRSOC 102, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas de la Nación, Julio 2005.
- Teoría de Pandeo, Prof. Ing. Tossone Hugo, Cátedra Estabilidad II (UTN-FRSF) Apuntes Unidad 3.



### Referencia a páginas web consultadas

- <https://www.tutiempo.net>
- <http://repositorio.una.edu.ni>
- <http://www.sfe-solar.com>
- <http://www.etersol.com.ar>
- <http://www.degeriberica.com>
- <http://www.sumiseran.es>
- <http://www.astroyciencia.com>
- <http://www.energeticafutura.com>
- <http://www.calculationsolar.com>
- <https://www.mheducation.es>
- <https://www.ingemecanica.com>
- <http://www.portaleso.com>
- <http://karengonzaleztorres.blogspot.com>
- <http://www.weitron.com.tw>
- <https://www.interempresas.net/Energia/Articulos>
- <http://www.sumiseran.es>
- <https://www.dgitreducer.com>
- <https://ingemecanica.com>

### Catálogos Técnicos

- [www.steka.com](http://www.steka.com)
- ABB – Productos de Baja Tensión – Soluciones para energía solar
- Paneles fotovoltaicos AXITEC
- Weitron – Datasheet, Transistores de Propósito General
- SKF Rolling- Bearings

**17. Lista de Planos****Denominación****N° de Plano**Planos Eléctricos

- Circuito Eléctrico de la Instalación fotovoltaica 1
- Circuito electrónico de seguimiento solar 2

Planos Mecánicos

- Plano General 0
- Apoyo de Cabezal 1
- Ensamble de cabezal a columna móvil 2
- Barra tensora de apoyo de cabezal 3
- Soporte Rod. SKF4304TN9 4
- Ensamble de columna móvil a rod. Cónico 5
- Apoyo de SKF61816, columna fija 6
- Base de columna fija, apoyo de rod. Cónico 7
- Soporte Corona Central 8
- Pernos Guías 9
- Soporte Rod. SKF 6201 10
- Árbol piñón 11
- Engranaje pivote 12
- Corona Central 13
- Piñon 1 14
- Piñón de engrane con Sin-Fin 15
- Sin-Fin 16
- Cabezal, columna fija y columna móvil 17
- Estructura de apoyo de paneles del cabezal 18
- Sistema Pivote-rotula 19
- Conjunto Brazo Pivote 20

Planos de Ensamblajes

- Cabezal 21
- Estructura Paneles 22
- Estructura Soporte Paneles 23



- Estructura de columnas fija y móvil	24
- Conjunto Brazo-Pivote	25
- Sistema Pivote-Rotula	26
- Ensamble Sistema Pivote	27
- Sistema de engranajes	28
- Sistema de engranajes, Engranaje pivote	29
- Sistema de engranajes, Engranajes Piñón	30
- Sistema de engranajes, Árbol Piñón	31
- Conjunto de soporte de Engranajes (corte por agua)	32

# Anexo

## Cálculo de la presión del viento

Exposición y características de la construcción:

- La estructura se ubica en un área abierta, en consecuencia se trata de Exposición C.
- Configuración estructural: Estructura flexible, la frecuencia fundamental estimada es de 0,7 Hz y la relación de amortiguamiento crítico es 0,01.
- El colapso de la estructura implica un *escaso* riesgo para la vida humana puesto que no se localiza en un área populosa. La estructura se clasifica por lo tanto como de Categoría I de la Tabla A-1 del Reglamento Cirsoc 102, año 2005.

Velocidad básica de viento:

- Se determina en base al mapa de la Figura 1A. La velocidad básica se fija en 46 m/s para la zona Norte de la Provincia de Santa Fe, que equivale a una velocidad del viento de 165 km/h, pero se adoptará una velocidad de **120km/h  $\approx$  33,33m/s.**

Presiones dinámicas:

- Las presiones dinámicas se computan mediante:

$$q_z = 0,613 \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_d \cdot V^2 \cdot I \text{ [N/m}^2\text{]}$$

Donde:

$$V = 33 \text{ m/s}$$

**K<sub>d</sub>** = 0,85 para carteles (paneles fotovoltaicos) sólidos, ver Tabla 6.

**I** = 0,87 para Categoría I (Tabla 2).

**K<sub>zt</sub>** = 1,0 por ser el terreno plano.

**K<sub>z</sub>** = valores de la Tabla 5 del Reglamento CIRSOC 102-2005 para z entre 0m hasta 5m de altura.

<b>Altura (m)</b>	<b>K<sub>z</sub></b>	<b>q<sub>z</sub> (N/m<sup>2</sup>)</b>
0-5m	0,87	430

Fuerzas de diseño para el SPRFV:

La expresión dada en la Tabla 1 del reglamento es:

$$F = q_z \cdot G_f \cdot C_f \cdot A_f$$



Donde:

**qz** : es el valor determinado en la Tabla anterior.

**Gf** : es el factor de efecto de ráfaga, se calcula según el artículo 5.8.2. o mediante un análisis racional que cumpla con las disposiciones del artículo 5.8.3., debido a que  $f < 1$  Hz.

**Cf** : son los valores de los coeficientes de fuerza de Tablas 10 y 11.

$$A_f = 3 \times 0,99\text{m} \times 1,95\text{m} = 5,79 \text{ m}^2.$$

Para viento normal y oblicuo ver Nota 4 de la Tabla 11.

- Coeficiente de fuerza **Cf**

Esta estructura califica como un cartel sobre el nivel del suelo con  $M / N = 2,97 / 1,95 = 1,52 < 6$  según tabla 11.

$$C_f = 1,2 \text{ (Tabla 11).}$$

- Factor de efecto de ráfaga **Gf**

El factor de efecto de ráfaga **Gf** se determina con la expresión 6 del artículo 5.8.2.:

$$G_f = 0,925 \cdot [ (1+1,7 \cdot I_z \cdot (g_Q^2 \cdot Q^2 + g_R^2 \cdot R^2)^{1/2}) / (1+ 1,7 \cdot g_v \cdot I_z) ]$$

Donde:

**Iz**; se obtiene de la expresión (3).

**gQ** y **gv**; se toman igual a 3,4 según el artículo 5.8.2.

**gR**; se obtiene de la expresión (7).

**Q**; se determina con la expresión (4).

**R**; se determina con la expresión (8).

**Z**; es la altura equivalente de la estructura, que se usa para determinar el valor nominal de  $I_z$  ; para edificios el valor recomendado es 0,6 h, pero para la estructura se debe tomar a la mitad del área del mismo, o sea, 1,2m.

$c, l, \alpha, \alpha, \varepsilon$ , etc., se obtienen de la Tabla 4, que se muestra a continuación.

Exposición	$\alpha$	$z_g$ (m)	$\hat{a}$	$\hat{b}$	$\bar{\alpha}$	$\bar{b}$	$c$	$\ell$ (m)	$\bar{\epsilon}$	$z_{min}$ (m)
A	5,0	457	1/5	0,64	1/3,0	0,30	0,45	55	1/2,0	18,3
B	7,0	366	1/7	0,84	1/4,0	0,45	0,30	98	1/3,0	9,2
C	9,5	274	1/9,5	1,00	1/6,5	0,65	0,20	152	1/5,0	4,6
D	11,5	213	1/11,5	1,07	1/9,0	0,80	0,15	198	1/8,0	2,1

$z_{min}$ : altura mínima utilizada para asegurar que la altura equivalente  $\bar{z}$  es mayor que  $0,6h$  ó  $z_{min}$ . Para edificios con  $h \leq z_{min}$ ,  $\bar{z}$  se debe tomar como  $z_{min}$ .

Tabla 4 – Constantes de exposición del terreno, pág. 51, extraída del Reglamento Cirsoc 102, Julio 2005.

Para exposición C; se tiene los siguientes datos;

$$\alpha=9,5 / Z_g= 274 / \alpha = 1/6,5 / b = 0,65 / c=0,2 / l= 152m / \epsilon= 1/5 / z_{min} = 4,6m$$

Por lo tanto:

$$I_z = c \cdot (10/z)^{1/6} = 0,2 \cdot (10/1,2)^{1/6} = 0,285$$

$$L_z = 1 \cdot (z/10)^\epsilon = 152 \cdot (1,2/10)^{1/5} = 99,46m$$

$$g_R = (2 \cdot \ln. (3600 \cdot n_1))^{1/2} + 0,577 / (2 \cdot \ln. (3600 \cdot n_1))^{1/2}, \text{ donde } n_1 \text{ es la frecuencia natural.}$$

$$g_R = (2 \cdot \ln. (3600 \cdot 0,7))^{1/2} + 0,577 / (2 \cdot \ln. (3600 \cdot 0,7))^{1/2} = 4,1035$$

$$Q_2 = 1 / [1 + 0,63 \cdot ((B+h)/L_z)^{0,63}] = 1 / [1 + 0,63 \cdot ((2,97m+1,95m)/99,46m)^{0,63}] = 0,913$$

En la expresión anterior B (ancho) y h (altura) son las dimensiones de la estructura.

$$V_z = b \cdot (z/10)^\alpha \cdot V = 0,65 \cdot (1,2m/10)^{1/6,5} \cdot 33m/s = \mathbf{15,48m/s}$$

$$N_1 = n_1 \cdot L_z / V_z = 0,7 \cdot 99,46m / 15,48m/s = 4,49 - \text{ nota: } n_1 \text{ es la frecuencia natural de la estructura.}$$

$$R_n = 7,47 \cdot N_1 / (1+10,3 \cdot N_1)^{5/3} = 7,47 \cdot 4,49 / (1+10,3 \cdot 4,49)^{5/3} = 0,054$$

$$\text{Para } R_h \Rightarrow \eta = 4,6 \cdot n_1 \cdot h / V_z = 4,6 \cdot 0,7 \cdot 1,95m / 15,48m/s = 0,405$$

En este caso  $h = 1,95m$  por cuanto la respuesta resonante depende de la altura total.

$$R_h = 1/\eta - [1/(2 \cdot \eta^2)] \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta}) = 1/0,405 - [1/(2 \cdot 0,405^2)] \cdot (1 - e^{-2 \cdot 0,405}) = 0,777$$



$$\text{Para RB} \Rightarrow \eta = 4,6 \cdot 0,7 \cdot 2,97\text{m} / 15,48\text{m/s} = 0,618$$

$$\text{RB} = 1/\eta - [1/(2\eta^2)] \cdot (1 - e^{-2\eta}) = 1/0,618 - [1/(2 \cdot 0,618^2)] \cdot (1 - e^{-2 \cdot 0,618}) = 0,689$$

Para RL  $\Rightarrow \eta = 15,4 \cdot 0,7 \cdot 0,04\text{m} / 15,48\text{m/s} = 0,0278$ , donde 0,04m es el grosor de los paneles fotovoltaicos.

$$\text{RL} = 1/\eta - [1/(2\eta^2)] \cdot (1 - e^{-2\eta}) = 1/0,0278 - [1/(2 \cdot 0,0278^2)] \cdot (1 - e^{-2 \cdot 0,0278}) = 0,981$$

Ahora con todos estos coeficientes, reemplazamos en R2:

$$\text{R2} = (1/\beta) \cdot \text{Rn} \cdot \text{Rh} \cdot \text{RB} \cdot (0,53 + 0,47 \cdot \text{RL}) = (1/0,01) \cdot 0,054 \cdot 0,777 \cdot 0,689 \cdot (0,53 + 0,47 \cdot 0,981)$$

$$\text{R2} = \mathbf{2,865}$$

Ahora se obtiene Gf:

$$\text{Gf} = 0,925 \cdot [(1 + 1,7 \cdot \text{Iz} \cdot (\text{gQ}^2 \cdot \text{Q2} + \text{gR}^2 \cdot \text{R2})^{1/2}) / (1 + 1,7 \cdot \text{gv} \cdot \text{Iz})]$$

$$\text{Gf} = 0,925 \cdot [(1 + 1,7 \cdot 0,285 \cdot (3,4^2 \cdot 0,913 + 4,104^2 \cdot \mathbf{2,865})^{1/2}) / (1 + 1,7 \cdot 3,4 \cdot 0,285)] =$$

$$\text{Gf} = \mathbf{1,647}$$

Fuerza de diseño:

$$\text{Fuerza, } \mathbf{F} = \text{qz} \cdot \text{Gf} \cdot \text{Cf} \cdot \text{Ancho}$$

$$\text{Para 0 a 5 m; } F = 430\text{N/m}^2 \cdot 1,647 \cdot 1,2 \cdot 2,97\text{m} = \mathbf{2525 N/m}$$

O expresado en unidad de superficie;

$$\text{Fuerza, } F = \text{qz} \cdot \text{Gf} \cdot \text{Cf} = 430\text{N/m}^2 \cdot 1,647 \cdot 1,2 = \mathbf{850 N/m^2}$$

# Anexo

## Cálculo del Par de arranque del rodamiento cónico

- Cálculo del momento de fricción por rodadura ( $M_{rr}$ ):

$$M_{rr} = \phi_{ish} \phi_{rs} G_{rr} (v n)^{0,6}$$

Donde:

$M_{rr}$  = momento de fricción de rodadura [Nmm]

$\phi_{ish}$  = factor de reducción por cizallamiento y calentamiento en la entrada de los contactos

$\phi_{rs}$  = factor de reducción por reposición/falta de suministro cinemática  
(→ página 102)

$G_{rr}$  = variable (→ tabla 2, página 104), según:

- el tipo de rodamiento
- el diámetro medio del rodamiento  
 $d_m$  [mm] = 0,5 (d + D)
- la carga radial  $F_r$  [N]
- la carga axial  $F_a$  [N]

$n$  = velocidad de giro [r. p. m.]

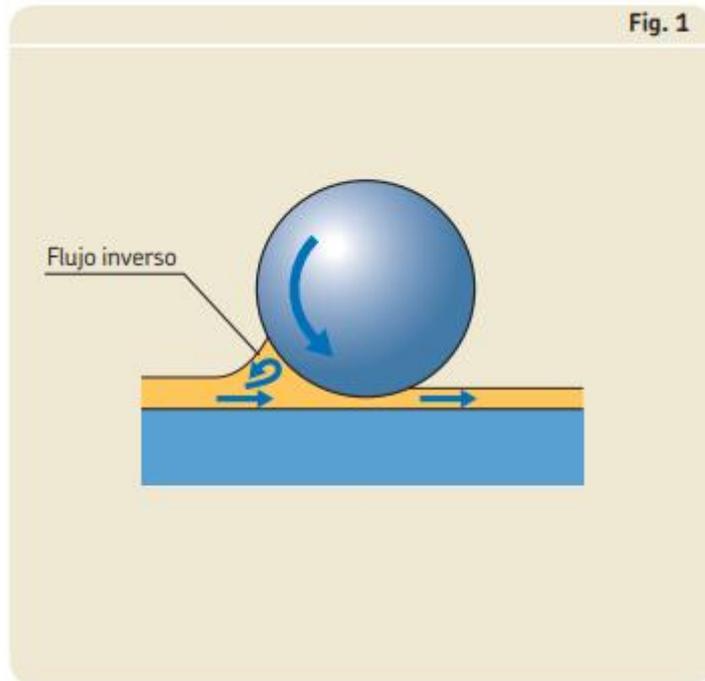
$v$  = viscosidad de funcionamiento real del aceite o del aceite base de la grasa [mm<sup>2</sup>/s]

*extracción de página 100 – Catálogo; SKF- Rolling-bearings*

Se procederá en calcular las variables que entran en juego en la ecuación de  $M_{rr}$ ;

- $\phi_{ish}$ : factor de reducción por cizallamiento y calentamiento en la entrada en los contactos

A pesar de la cantidad de lubricante disponible en un rodamiento, no toda esa cantidad se dirige al área de contacto. Solo una pequeña cantidad de lubricante se utiliza para formar la película hidrodinámica. Por lo tanto, se rechaza parte del aceite que se encuentra cerca de la entrada del área de contacto, lo que produce un flujo inverso ( figura 1). Este flujo inverso cizalla el lubricante. Esto genera calor, lo que disminuye la viscosidad del aceite y reduce el espesor de la película y la fricción por rodadura.



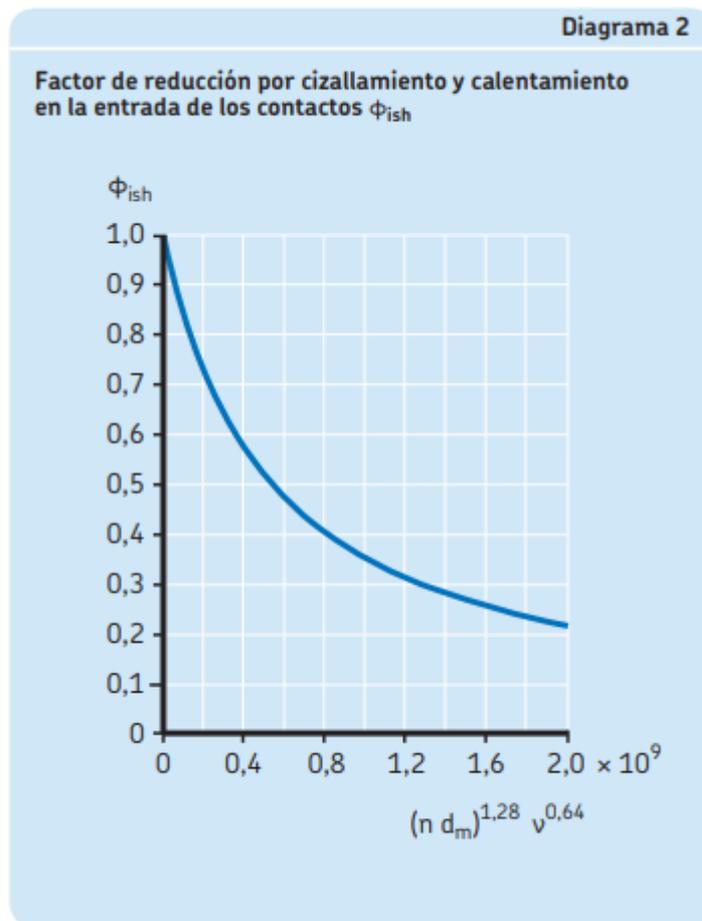
Extracción de página 101 – Catálogo; SKF- Rolling-bearings

Para el efecto que se describe anteriormente, se puede calcular el factor de reducción por cizallamiento y calentamiento en la entrada de los contactos usando:

$$\Phi_{ish} = \frac{1}{1 + 1,84 \times 10^{-9} (n d_m)^{1,28} v^{0,64}}$$

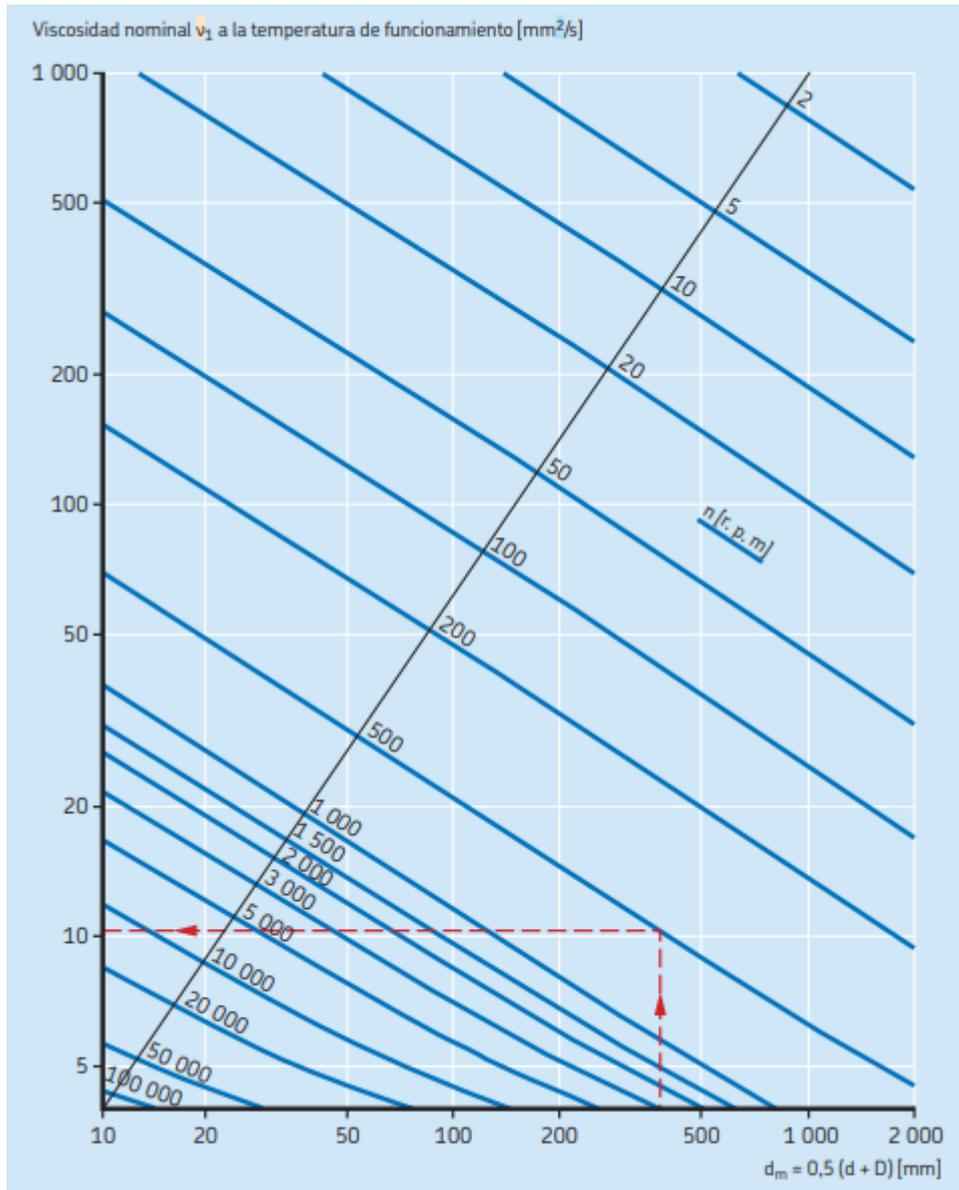
Donde:

- $\Phi_{ish}$  = factor de reducción por cizallamiento y calentamiento en la entrada de los contactos (→ **diagrama 2**)
- $n$  = velocidad de giro [r. p. m.]
- $d_m$  = diámetro medio del rodamiento [mm]  
= 0,5 (d + D)
- $v$  = viscosidad de funcionamiento real del aceite o del aceite base de la grasa [mm<sup>2</sup>/s]



*Extracción de página 101 – Catálogo; SKF- Rolling-bearings*

$$\Phi_{ish} = 1 / ( 1 + 1,84 \times 10^{-9} (8,5 \text{rpm} \times 54 \text{mm})^{1,28} \times 1000^{0,64} ) = 0,999$$



Gráfica 16; para hallar el valor de la viscosidad del aceite base.

Extracción de página 268, Diagrama 5 – Catálogo; SKF- Rolling-bearings

El sombreado verde muestra el área en la que  $ndm \leq 10\,000$  [mm/min]. Con estos valores bajos de  $ndm$ , se necesitan aditivos AW o EP para reducir el desgaste.

El sombreado naranja muestra el área en la que  $ndm \geq 500\,000$  [mm/min] para un diámetro medio del rodamiento de hasta 200 mm, y  $ndm \geq 400\,000$  [mm/min] para diámetros medios del rodamiento mayores. Con estos valores más altos de  $ndm$ , se debe prestar más atención a la temperatura de funcionamiento. Determinados tipos de rodamientos, como los rodamientos de rodillos a rótula, los rodamientos de rodillos cónicos y los rodamientos axiales de rodillos a rótula, suelen tener una temperatura de funcionamiento superior a la de otros tipos,



como los rodamientos rígidos de bolas y los rodamientos de rodillos cilíndricos, en condiciones de funcionamiento similares.

- $\Phi_{rs}$ : factor de reducción por cizallamiento y calentamiento en la entrada en los contactos

Para los métodos de lubricación por aceite y aire, chorro de aceite, baño de aceite de bajo nivel (p. ej., el nivel de aceite H es inferior al centro del elemento rodante más bajo) y grasa, el movimiento de giro continuo expulsa el exceso de lubricante de los caminos de rodadura. En aplicaciones de alta viscosidad o altas velocidades, los caminos de rodadura podrían no contar con el tiempo suficiente para reabastecerse de lubricante, lo que puede causar una falta de suministro cinemática. La falta de suministro cinemática reduce el espesor de la película hidrodinámica (reducción de los valores k; página 241) y la fricción por rodadura.

Se puede calcular el factor de reducción por reposición/falta de suministro cinemática para los métodos de lubricación descritos anteriormente usando:

$$\Phi_{rs} = \frac{1}{e^{\left[ K_{rs} \nu n (d + D) \sqrt{\frac{K_z}{2(D-d)}} \right]}}$$

Donde:

$\Phi_{rs}$  = factor de reducción por reposición/falta de suministro cinemática

e = base del logaritmo natural  $\approx 2,718$

$K_{rs}$  = constante de reposición/falta de suministro:

- para baño de aceite de bajo nivel y lubricación por chorro de aceite  $\rightarrow 3 \times 10^{-8}$

- para lubricación por aceite y aire y lubricación con grasa  $\rightarrow 6 \times 10^{-8}$

$K_z$  = constante geométrica relacionada con el tipo de rodamiento ( $\rightarrow$  **tabla 5, página 112**)

$\nu$  = viscosidad de funcionamiento real del aceite o del aceite base de la grasa [mm<sup>2</sup>/s]

n = velocidad de giro [r. p. m.]

d = diámetro del agujero del rodamiento [mm]

D = diámetro exterior del rodamiento [mm]

$$\Phi_{rs} = 1 / e^{[6 \times 10^{-8} \cdot 1000 \cdot 8,5 \cdot (40+68) \cdot (6/2 \cdot (68-40))^{0,5}]} = 0,982$$



- $G_{rr}$ : variable (→ **tabla 2, página 104**), según:
  - el tipo de rodamiento
  - el diámetro medio del rodamiento  
 $d_m [mm] = 0,5 (d + D)$
  - la carga radial  $F_r [N]$
  - la carga axial  $F_a [N]$

Tabla 2a		
Variables geométricas y variables que dependen de la carga para momentos de fricción deslizante y de rodadura: rodamientos radiales		
Tipo de rodamiento	Variable de fricción de rodadura $G_{rr}$	Variable de fricción deslizante $G_{sl}$
Rodamientos rígidos de bolas	cuando $F_a = 0$ $G_{rr} = R_1 d_m^{1,96} F_r^{0,54}$	cuando $F_a = 0$ $G_{sl} = S_1 d_m^{-0,26} F_r^{5/3}$
	cuando $F_a > 0$ $G_{rr} = R_1 d_m^{1,96} \left( F_r + \frac{R_2}{\sin \alpha_F} F_a \right)^{0,54}$	cuando $F_a > 0$ $G_{sl} = S_1 d_m^{-0,145} \left( F_r^5 + \frac{S_2 d_m^{1,5}}{\sin \alpha_F} F_a^4 \right)^{1/3}$
	$\alpha_F = 24,6 (F_a/C_0)^{0,24} [^\circ]$	
Rodamientos de bolas de contacto angular <sup>1)</sup>	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,97} [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^4 n^2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,26} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^4 n^2$
Rodamientos de bolas con cuatro puntos de contacto	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,97} [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^4 n^2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,26} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^4 n^2$
Rodamientos de bolas a rótula	$G_{rr} = R_1 d_m^2 [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^{3,5} n^2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{-0,12} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^{3,5} n^2$
Rodamientos de rodillos cilíndricos	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,41} F_r^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,9} F_a + S_2 d_m F_r$
Rodamientos de rodillos cónicos <sup>1)</sup>	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,38} (F_r + R_2 Y F_a)^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,82} (F_r + S_2 Y F_a)$
Para obtener información sobre el factor de carga axial Y de los rodamientos de una hilera → <b>tablas de productos</b>		

Extracción de página 104 – Catálogo; SKF- Rolling-bearings

$$G_{rr} = R_1 d_m^{2,38} (F_r + R_2 Y F_a)^{0,31}$$

$$G_{rr} = 2,31 \times 10^{-6} \cdot (54mm)^{2,38} \cdot (0kg + 10,9 \cdot 1,6 \cdot 108kg)^{0,31} = 0,317$$

Tabla 3

**Constantes geométricas para momentos de fricción deslizante y de rodadura**

Tipo de rodamiento	Constantes geométricas para momentos de fricción de rodadura			momentos de fricción deslizante		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
Rodamientos rígidos de bolas	(→ tabla 3a)			(→ tabla 3a)		
<b>Rodamientos de bolas de contacto angular</b>						
– de una hilera	$5,03 \times 10^{-7}$	1,97	$1,90 \times 10^{-12}$	$1,30 \times 10^{-2}$	0,68	$1,91 \times 10^{-12}$
– de dos hileras	$6,34 \times 10^{-7}$	1,41	$7,83 \times 10^{-13}$	$7,56 \times 10^{-3}$	1,21	$7,83 \times 10^{-13}$
– con cuatro puntos de contacto	$4,78 \times 10^{-7}$	2,42	$1,40 \times 10^{-12}$	$1,20 \times 10^{-2}$	0,9	$1,40 \times 10^{-12}$
Rodamientos de bolas a rótula	(→ tabla 3b)			(→ tabla 3b)		
Rodamientos de rodillos cilíndricos	(→ tabla 3c)			(→ tabla 3c)		
Rodamientos de rodillos cónicos	(→ tabla 3d)			(→ tabla 3d)		
Rodamientos de rodillos a rótula	(→ tabla 3e)			(→ tabla 3e)		
Rodamientos de rodillos toroidales CARB	(→ tabla 3f)			(→ tabla 3f)		
Rodamientos axiales de bolas	$1,03 \times 10^{-6}$			$1,6 \times 10^{-2}$		
Rodamientos axiales de rodillos cilíndricos	$2,25 \times 10^{-6}$			0,154		
Rodamientos axiales de rodillos a rótula	(→ tabla 3g)			(→ tabla 3g)		

Extracción de página 105 – Catálogo; SKF- Rolling-bearings

Tabla 3d

Series de rodamientos	Constantes geométricas para momentos de fricción de rodadura		momentos de fricción deslizante	
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>
302	1,76 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,017	2
303	1,69 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,017	2
313 (X)	1,84 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,048	2
320 X	2,38 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,014	2
322	2,27 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,018	2
322 B	2,38 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,026	2
323	2,38 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,019	2
323 B	2,79 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,030	2
329	2,31 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,009	2
330	2,71 × 10 <sup>-6</sup>	11,3	0,010	2
331	2,71 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,015	2
332	2,71 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,018	2
BB	1,72 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,0057	2
L	2,19 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,0093	2
BM	2,25 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,011	2
M	2,48 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,015	2
HM	2,60 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,020	2
H	2,66 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,025	2
AA	2,51 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,027	2
Todos los demás	2,31 × 10 <sup>-6</sup>	10,9	0,019	2

Extracción de página 107 – Catálogo; SKF- Rolling-bearings

Volviendo a la ecuación de M<sub>rr</sub>, se tiene,

$$M_{rr} = \phi_{ish} \phi_{rs} G_{rr} (v n)^{0,6}$$

$$M_{rr} = 0,999 \times 0,982 \times 0,317 \times (1000 \times 8,5)^{0,6} = 70,86 \text{ N.mm} \equiv 0,72 \text{ kgcm}$$

- Momento de fricción deslizante M<sub>sl</sub>;

$$M_{sl} = G_{sl} \mu_{sl}$$

Donde:

M<sub>sl</sub> = momento de fricción deslizante [Nmm]

G<sub>sl</sub> = variable (→ **tabla 2, página 104**), según:

- el tipo de rodamiento
- el diámetro medio del rodamiento d<sub>m</sub> [mm]  
= 0,5 (d + D)
- la carga radial F<sub>r</sub> [N]
- la carga axial F<sub>a</sub> [N]

μ<sub>sl</sub> = coeficiente de fricción deslizante

$$G_{sl} = S_1 d_m^{0,82} (F_r + S_2 Y F_a)$$

$$G_{sl} = 0,019 \cdot (54)^{0,82} \times (0\text{kg} + 2 \times 1,6 \times 108\text{kg}) = 162,36$$

El coeficiente de fricción  $\mu_{sl}$  por deslizamiento para condiciones de lubricación de película total y mixta se puede calcular usando:

$$\mu_{sl} = \Phi_{bl} \mu_{bl} + (1 - \Phi_{bl}) \mu_{EHL}$$

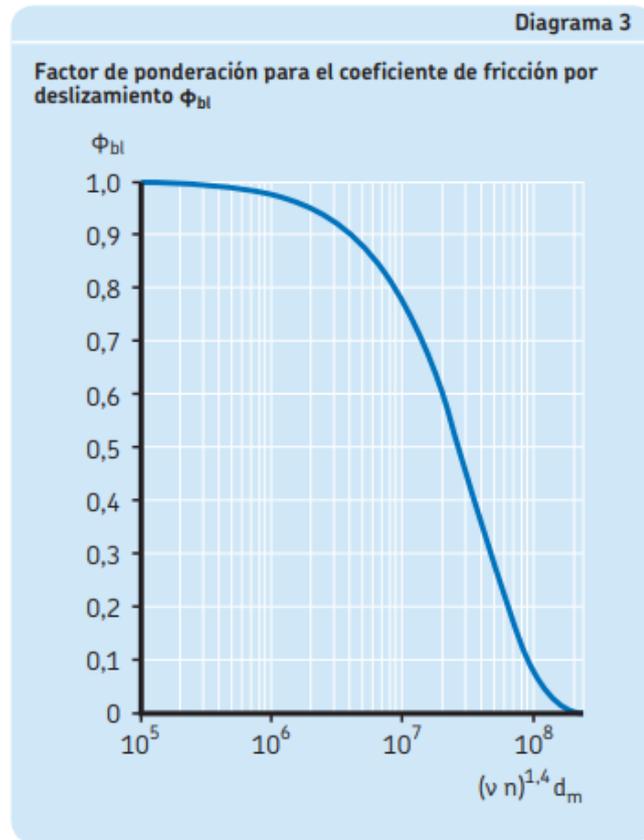
Donde:

$\mu_{sl}$  = coeficiente de fricción deslizante  
 $\Phi_{bl}$  = factor de ponderación para el coeficiente de fricción por deslizamiento

$$= \frac{1}{e^{2,6 \times 10^{-8} (n v)^{1,4} d_m}}$$

(→ **diagrama 3**)

- $e$  = base del logaritmo natural  $\approx 2,718$   
 $n$  = velocidad de giro [r. p. m.]  
 $v$  = viscosidad de funcionamiento real del aceite o del aceite base de la grasa [mm<sup>2</sup>/s]  
 $d_m$  = diámetro medio del rodamiento [mm]  
 $= 0,5 (d + D)$   
 $\mu_{bl}$  = coeficiente que depende de los aditivos del lubricante, generalmente  $\approx 0,15$   
 $\mu_{EHL}$  = coeficiente de fricción por deslizamiento en condiciones de película total  
 Los valores para  $\mu_{EHL}$  son los siguientes:
- 0,02 para rodamientos de rodillos cilíndricos
  - 0,002 para rodamientos de rodillos cónicos



Extracción de página 103 – Catálogo; SKF- Rolling-bearings

$$\Phi_{bl} = 1 / (e^{2,6 \times 10^{-8} \times (n \cdot v)^{1,4} \times d_m}) = 1 / (e^{2,6 \times 10^{-8} \times (8,5 \cdot 1000)^{1,4} \times 54}) = 0,64$$

Nuevamente:

$$\mu_{sl} = \Phi_{bl} \mu_{bl} + (1 - \Phi_{bl}) \mu_{EHL}$$

$$\mu_{sl} = 0,64 \times 0,15 + (1 - 0,64) \times 0,002 = 0,0967$$

De esta manera:

$$M_{sl} = G_{sl} \mu_{sl}$$

$$M_{sl} = 162,36 \times 0,0967 = 15,7 \text{ N}\cdot\text{mm} \equiv 0,16 \text{ kgcm}$$

Volviendo al principio y objetivo de estos cálculos se tiene que el par de arranque para el rodamiento cónico es de:

$$M_{start} = M_{rr} + M_{sl}$$



Donde;

Mstart: momento de fricción de arranque[Nmm]

Mrr: momento de fricción de rodadura [Nmm]

Msl: momento de fricción deslizante [Nmm]

$$M_{start} = 0,72 \text{ kgcm} + 0,16\text{kgcm} = 0,88\text{kgcm}$$

Para el caso de los rodamientos cónicos este valor se encuentra mayorado en 4 veces, por lo tanto se tendrá:

$$M_{start} = 4 \times 0,88\text{kgm} = \mathbf{3,52\text{kgcm}}$$