

Installation of a small wind turbine in a house in The Netherlands

Table of content

Installation of a small wind turbine in a house in The Netherlands	1
Memory	1
1.- Introduction	1
2.- Wind and wind turbines.....	2
3.- History of the use of wind	6
4.- Eolic energy today.....	7
4.1- HAWTs vs VAWTs	8
4.1.1.-VAWTs.....	13
4.1.2.- HAWTs.....	19
5.- ROTOR DESIGN-BLADES	23
5.1.- Materials	23
5.2.- Tip Speed ratio	23
5.3.- Blade Plan Shape and Quantity.....	24
5.4.- Aerodynamics.....	25
5.5.- Off-Design Conditions and Power Regulation.....	26
5.6.- Smart blade design.....	26
6.- Placement strategies for wind turbines: Offshore vs onshore	27
7.- Regulation of the installation of small windmills in residential properties in the Netherlands.....	29
8.- Selection of the wind turbine.....	33
9.- BIBLIOGRAPHY:	36
10.- Technical standards	38
11.- Legislation	39
12.- Personal conclusions.....	39

Memory

1.- Introduction

With the objective to spread the use of renewable energies, this project will evaluate the availability of the installation of a green energy source in a private house. Because of size and economic reasons, the most suitable green energy sources for a house are solar and wind energy, but before diving in more on why wind energy was chosen, let me first introduce you on why I chose The Netherlands as the place of installation of the green energy source.

My story with The Netherlands began 2 years ago, when I was first invited to visit the country by my Dutch girlfriend. The first town I visited was Wijk aan Zee, which in English means neighborhood by the sea, it is a very small town on which Dutch people usually go in summertime to enjoy the sun and the beach. In wintertime, the town is usually empty due to the strong wind and cold and rainy weather.

One of the first things I noticed there, was the strong winds that blow from the coast to the sea during the day. In order to extract energy from the wind, wind turbines are located all along the beach, which due to their large size, are easily spotted by anyone who visits the town.

After my first visit to The Netherlands, my interest for the country grew, which made me start to learn its language and dive more in its history and culture. I consider myself a lucky person because thanks to my Dutch friends, my girlfriend and its family, I had the chance to really dive into the Dutch culture and history, which allowed me to learn things I could not have learned by myself.

Because of my profound interest to the country, I decided to do my internship in Amsterdam. As I lived in the Netherlands for 6 months, I had the chance to visit many places of the country, one of the most touristic ones is Zaanse Schans, which is an open museum on which historical windmills can be visited. In the XVII century it was one of the most industrialized areas of the world, on which 900 windmills were working nonstop during day and night processing all kinds of raw materials coming from trading and the Dutch colonies.

As a result of the spread use of the windmills in the golden century of The Netherlands, they ended up becoming one of the symbols of the nation.

There are numerous activities that accelerate climate change, one of the most influential ones is energy production. Nowadays, most electricity is still generated by burning coal, oil and natural gas. To combat climate change and reduce its effects, attention switches now to renewable energies, such as solar, wind and hydroelectric energy. Renewable energies help to reduce the climate change because of their sustainable nature, their economical availability and their 0 greenhouse gas emissions.

Climate change is causing devastating effects on planet Earth, such as:

- **The increase of temperatures:** Which increases the sea level by melting the ice poles, threatening islands and coastal communities. In addition, it also helps on the creation of wildfires and its propagation.

- **More severe storms:** Because of the warmer temperatures, more moisture evaporates, which creates extreme rainfall and flooding. As a result, many homes are destroyed, causing deaths and economic losses.
- **Increase drought:** Global warming exacerbates water shortages in already dry areas, affecting crops, ecosystems and expanding the deserts.
- **Loss of species:** The accelerated climate change causes a loss of species 1000 times greater than any other time in recorded human history.
- **Health risks:** Every year, environmental factors, such as air pollution cause the death of 13 million people.
- **Lower food production:** Fisheries, crops and livestock become less productive, which often causes its destruction.

By comparing solar with wind energy in The Netherlands, I decided to choose wind energy because of the following reasons:

- **Day dependency:** Solar panels only work during the day, which limits their energy production. On the other hand, if the wind conditions are good, wind turbines can work during the whole day.
- **Weather conditions:** Solar panels do not have a good performance during rainy and cloudy conditions, on which they only produce 10-25% of their normal power output. As the weather in The Netherlands is very rainy, cloudy and windy, a wind turbine was considered a better option to study.
- **Efficiency:** Wind energy is a more efficient power source than solar energy. One large wind turbine can produce as much electricity per KWh as 48.000 solar panels.
- **Consistency:** Even though wind energy is highly dependent on the weather, the windy seasons tend to be stable throughout the time. Which allows to create accurate forecasts of the electricity production.

Once it has been determined which green energy will power the house, let me introduce you about the objective of paper. This project aims to determine the viability of the installation of a wind turbine in a house in The Netherlands. A deep study about the different kind of wind turbines, the laws that regulate its installation, the forces that they have to withstand, the electric circuit from the wind turbine to the grid and the economic viability will be done.

To end with, after having reviewed all the factors that affect the installation and performance of the wind turbine, it will be evaluated whether is a good idea to install a wind turbine to power a house in The Netherlands.

2.- Wind and wind turbines

The planet earth is full of natural resources, which have been used by the human being since the beginning of time. One of the natural resources that was first used is wood, thousands of years ago, ancient homo sapiens started to use it to warm themselves, cook and create tools. With the pass of the years and the development of new technologies humans learned how to extract power from the wind and transform it into different types of energy. Nowadays it is mainly used for producing electricity, but it can also be used for sailing, grinding wheat and pump water.

Before going any deeper into the historical use of wind by humans, let me introduce you about the concept of wind is and how it is originated. Wind is moving air caused by the variation of air pressure within the atmosphere. This difference of pressure is caused by the variance of temperatures in the air. Due to the sun hitting the earth in different angles, the oceans, mountains and other features, some places are warmer than others, creating a pressure difference which produces wind.

Air always flows from higher pressure areas to lower ones. A high-pressure system has a higher pressure at its center than in the areas around it on which winds blow away from high pressure. In a low-pressure system the center has a lower pressure than its surroundings and wind blows towards the low pressure.

On the earth there are winds that blow predominantly from a particular direction to another. The behavior of the direction of these winds are highly influenced by the Coriolis effect, caused by the rotation of the earth. The prevailing wind directions are important when placing wind turbines because it will be sought to place them in areas with least obstacles from the prevailing wind directions. (*Prevailing Winds* | *National Geographic Society*, n.d.)

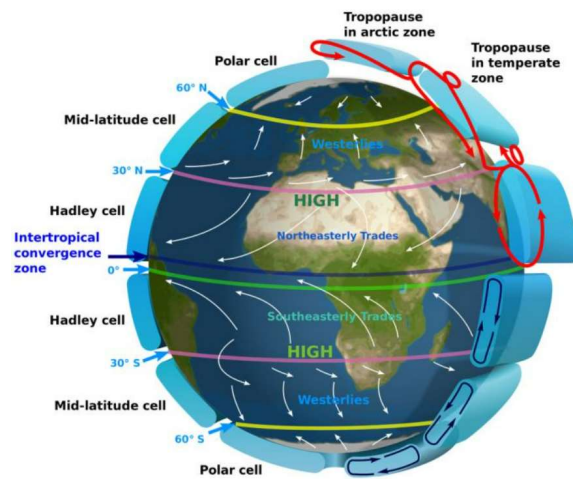


Fig. 1. Prevailing winds map(*Prevailing Winds* | *National Geographic Society*, n.d.)

The most commonly method to extract energy from the wind is with the use of windmills. Windmills or (wind turbines if they are used to produce electricity) are like fans but larger and much more complicated. Modern turbines usually have three blades and almost always a horizontal axis shaft and they are mainly used for transforming the mechanical energy of the wind into electrical energy.

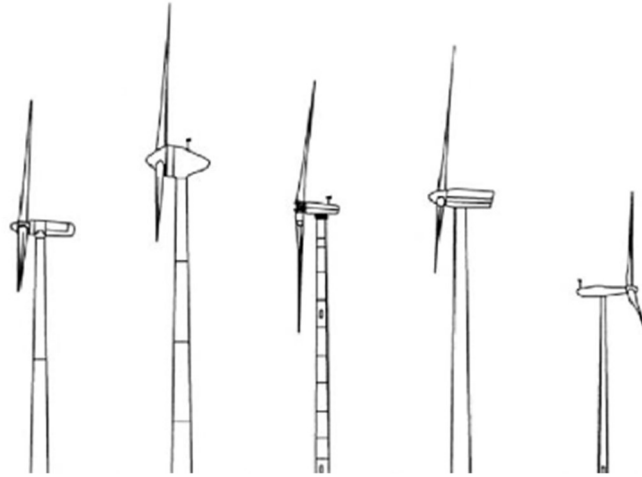


Fig. 2. Wind turbines (*Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics* - Erich Hau - Google Libros, n.d.-a)

One of the most important parts of a wind turbine is its tower. In order to avoid the air friction with the ground, towers are built and designed as tall as possible. Because of air friction, air moves slower in the lower levels close to the ground than in higher levels. The velocity of the air increases with height according to this equation:

$$U \propto \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Where U is velocity, z is height and z_0 is roughness. Because of this expression, a lot of air turbines are placed in mountains due to the mechanic and economic limitations of the height of the towers. High speed winds can also be found in large bodies of water, as the water has a much higher heat capacity than land, it takes longer time to increase or decrease its temperature. During the day, the land is warmer than the sea which makes the air flow from the land to the sea, while during the night the wind reverses its flow, because the sea is warmer than the land.(Grogg, n.d.)

In order to understand how wind turbines extract power from the air lets first define the power of a moving mass of air, which is given by:

$$P = \frac{1}{2} A \rho U^3$$

Where ρ is the density of the air, U the velocity of the air and A the area the air goes across.

When the wind passes through the turbine, it loses velocity.

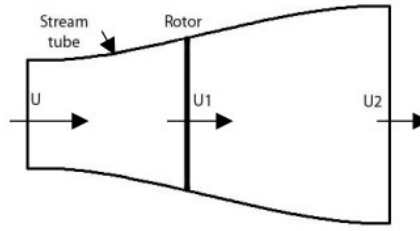


Fig. 3 Stream tube around a rotor. (Grogg, n.d.)

The stream in the tube behind the turbine increases in volume because the mass air is moving slower. The rotor captures part of the wind kinetic energy, and as the linear momentum must be conserved, a force must act on the wind to make it slow down. The Newton's first law establishes, that the force that acts on the wind to make it slowdown is equal and opposite to the thrust T , the force of the wind in the rotor. This force comes from the change of pressure that is caused when the wind passes through the rotor. (Grogg, n.d.)

The **momentum** is given by:

$$T = \frac{1}{2} A \rho (U^2 - U_2^2)$$

While the **power** extracted from the air is:

$$P = \frac{1}{2} A \rho U^3 4a(1 - a)^2$$

Where **a** is the axial induction defined by:

$$a = (U - U_1)$$

All the previous equations show give theoretical values, power losses due to the blades, friction, temperature, and other factors are not considered.

Once the rotor is moving, it can be connected to a generator, which will transform the mechanical energy of the rotor into electricity. This is done with the use of electromagnets cored with iron. Permanent magnets are not used in large turbines because they are often cost-prohibitive.

The main concern when generating electricity, is that the generators must provide electricity compatible with the electrical grid for the given site, in Europe the grid runs at 50Hz. As the rotor turns, it induces alternating currents in the coils, which generates electricity. For most turbines connection to the grid is direct from the generator after a transformer to set up the voltage to match that of the grid. Variable speed wind turbines require an indirect connection because the current generated is of varying frequency. (Grogg, n.d.)

3.- History of the use of wind

The use of wind did not start with the modern wind turbines, human being has been using wind energy for thousands of years. Archaeologists affirm that ancient Egyptians used to use sailboats to trade in the river Nile at least three thousand years before Christ (Mark, 2013). Some hundreds of years after, around 200 B.C vertical-axis windmills were invented in Persia, which would be followed by the horizontal-axis windmills found in The Netherlands and in the Mediterranean, which were mainly used to grind wheat.

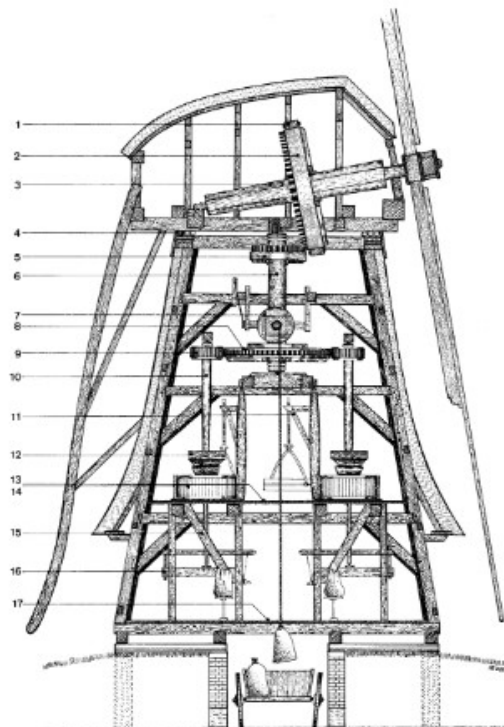


Fig. 4 Dutch windmill (*Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics* - Erich Hau - Google Libros, n.d.-a)

The perfection of this machines took place in the USA during the 19th century, where the first large wind machine to generate electricity was installed in Cleveland in 1888, while in the beginning of the 20th century, 25kW windmills were widespread throughout Denmark (Kaldellis & Zafirakis, 2011).

Within some decades, further research on airplane propellers showed that larger scale windmills could be doable, after that, they started to be developed in Europe and the USA. One of the most important milestones of the wind energy took place after the oil crisis of 1973 on which the following years the windmill market in the USA evolved from domestic and agricultural (1-25kW) to interconnected wind farms (50-600kW). Which lead to an increase of wind farms in the USA during the 70s, while in northern Europe this windmill revolution took place during the 80s and the 90s where a small but stable market was created.

After the 90s most of the market activity shifted to Europe making it the global center of wind energy (Kaldellis & Zafirakis, 2011).

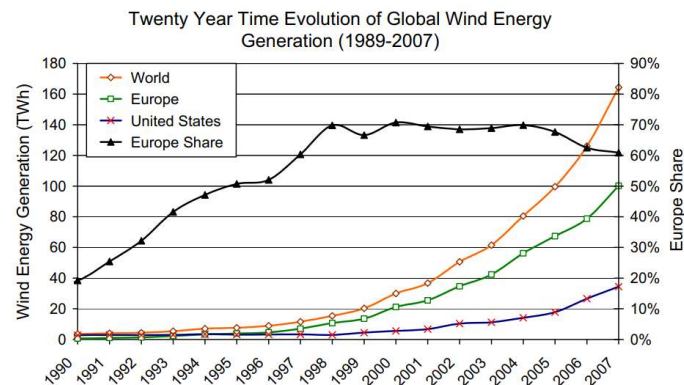


Fig. 5. Time evolution of global and European wind power capacity and wind energy generation(Kaldellis & Zafirakis, 2011)

Currently the wind energy is one of the least expensive of the renewable energies and it is becoming more affordable as the technology improves. (Grogg, n.d.)

4.- Eolic energy today

Driven by the continuous economic progress, and the development of electronic technologies the worldwide demand for energy is increasing. Even though many countries like China, India or the United States still use fossil fuels as their main source of energy, many countries prefer to invest in renewable energies, which have been growing significantly since the last decade. There are many reasons of why many countries are decreasing the use of fossil fuels, the advantages that renewable energies provide are:

- **Clean, safe, and sustainable:** Renewable energies will never run out, they do not emit carbon dioxide and are safe to use.
- **Energy independence:** Many countries do not have natural resources such as fossil fuels or uranium, which makes them dependent on the market price of these minerals. A solution to this problem is the use of renewable energies, which allow countries to have an independent source of energy.
- **Provides jobs for local communities:** The renewable industry is highly labor intensive, which means that many jobs are needed to guarantee its proper operation.
- **Stable costs:** Renewable resources do not depend on the fluctuations of the market, which makes the cost of the energy produced by green energies stable.
- **Pay themselves off:** After years of use, the initial investment will be recovered.

Consequently, there is a need to develop renewable and sustainable energy alternatives such as wind, solar and hydroelectric. Among these alternatives, wind energy stands out because of the following reasons:

1. The availability of the wind
2. Consistent energy production in medium and long term
3. Good conversion efficiency
4. Does not require much space for its installation
5. It is an excellent source of energy for remote areas
6. Low installation and operating costs
7. Simple and only occasional maintenance
8. Excellent circularity in the end-of-life phase

In 2018, wind energy provided around 5% of the total energy consumption of the world. In the same year 690,8 GW were produced worldwide, from which 259 GW were produced in Europe, 123.85 GW in China, 98.94 GW in the US and 5,7GW in Africa. It is anticipated that by 2030 and 2050 the energy provided by the wind will be about 20% and 35% respectively.

Historically, onshore wind turbines were the first ones to be installed, because of their lower costs of installation and the complexity of developing new foundations to hold the wind turbines by the sea. But soon, engineers and scientists realized that in coastal regions, the wind blowing from the sea to the land often lacks consistency, and, with the intention to expand the wind energy capacity, particularly in areas where the onshore wind energy was limited, offshore wind energy was developed.

Consequently, there is a growing interest in offshore wind energy, on which European nations are pioneers. Offshore breezes tend to be stronger and more consistent over the surface of the ocean compared to onshore conditions. But before diving on where is the best place to place the windmills, let us first define the different kind of windmills.

4.1- HAWTs vs VAWTs

In the realm of wind energy, there are two main cores of wind turbines, the horizontal axis wind turbines or HAWTs, on which the rotor turns around the horizontal axis, and the vertical axis wind turbines or VAWTs, on which their rotor turns around the vertical axis.

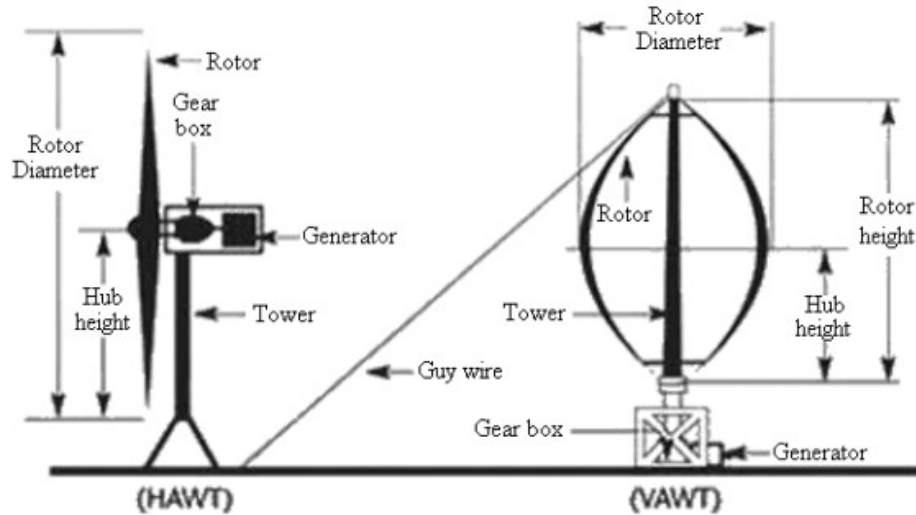


Fig. 6 Two main types of turbines, horizontal axis (HAWT) and vertical axis (VAWT). (Grogg, n.d.)

In HAWTs the electrical generator is at the top of the tower. A gearbox is used in most of the Wind Energy Conversion Systems or WECS to obtain the suitable speed to drive the electrical generator, this is because the slower rotation of the wind turbine blades. In addition, as the wind is not always perpendicular to the blades of the turbine, a system is required to move the top of the wind turbine, so that the efficiency of the turbine is not affected by the direction of the wind.

HAWTs configuration produces maximum amount energy compared to VAWTs due its tall tower base. As explained before, the air moves slower closer to the ground levels due to the friction with the ground. It is observed that when the height of the wind turbine tower increases by 10 meters, the speed of wind increases by 20%, which can be translated to an increase of the generated power output by 34%.

One of the advantages of VAWTs is that the wind is perpendicular to the blades all the time. Therefore, no additional controller to move the rotor is required compared to the HAWTs type. In addition, VAWTs produce less noise due to their less angular speed. Due to their small size VAWTs can be carried out in many locations such as highways and roofs. *Wind Energy Conversion System Topologies and converters: Comparative review (2019) Energy Procedia.*

Even though VAWTs have many advantages, HAWTs have been the main focus of the wind energy in the past decades, they have higher efficiencies, and its state of technology is more mature than that of VAWTs, with a larger of successfully developed projects and the formation of a dedicated supply chain. VAWTs were investigated during the late 20s but the interest on them was lost due to fatigue issues and low efficiencies. (Borg et al., 2012)

When talking about the efficiency of wind turbines, the Betz limit must be mentioned. This limit establishes that the maximum theoretical efficiency of any wind turbine is 59.3%, this discovered by Betz, who was a German physicist that created a theory about the maximum possible energy to be derived from a wind turbine. That theoretical value comes from the following calculations:

The kinetic energy of an air mass moving at a velocity v can be expressed as:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{Nm})$$

Considering that the air passes through a cross-sectional area A , the volume flowing through is:

$$\dot{V} = vA \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

The mass flow with the air density ρ is:

$$\dot{m} = \rho vA \quad (\text{kg/s})$$

And as indicated before the power of the moving mass is:

$$P = \frac{1}{2}A \rho v^3 \quad (\text{W})$$

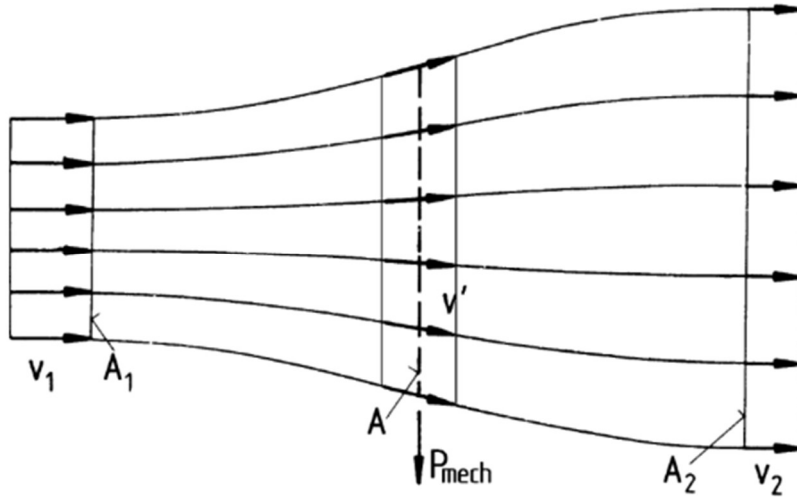


Fig. 7 Flow conditions due to the extraction of mechanical energy from a free-stream air flow (*Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics - Erich Hau - Google Libros, n.d.-b*)

As mechanical energy can only be extracted at the cost of the kinetic energy contained in the wind stream, that means that the velocity of the wind behind the converter must decrease. Reduced velocity means widening of the cross section (Bernoulli's equation). Then the mechanical energy that can be extracted from the airflow is:

$$P = \frac{1}{2}\rho(A_1v_1^3 - A_2v_2^3) \quad (\text{W})$$

Maintaining the mass flow means:

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 \quad (\text{Kg/s})$$

Thus:

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{W})$$

The law of conservation of momentum establishes, that the force that the air exerts on the converter is:

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) \quad (\text{N})$$

According to the 3rd law of Newton, this force must be counteracted by an equal force exerted by the converter. The thrust pushes the air mass at velocity v' . The power required for this is:

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (\text{W})$$

After operating it is obtained:

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 - v_2) \quad (\text{m/s})$$

And the mass flow becomes:

$$\dot{m} = \rho A v' \quad (\text{Kg/s})$$

And the mechanical power output of the converter can be expressed as:

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2) \quad (\text{W})$$

The power of the air that flows through the same area without mechanical power being extracted from it is:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho v_1^3 A \quad (\text{W})$$

The ratio between the mechanical power extracted and the undisturbed air stream is called the "power coefficient" C_p :

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} [1 - (v_2/v_1)^2] [1 + (v_2/v_1)]$$

The power coefficient depends only on the ratio of the air velocities:

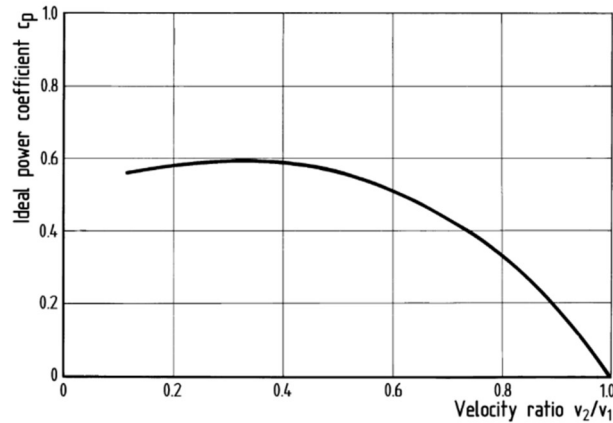


Fig. 8 Power coefficient vs the flow velocity ratio(Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics - Erich Hau - Google Libros, n.d.-b)

It can be seen that the power coefficient reaches a maximum of 0,593 for $v_2/v_1 = 1/3$. And as Betz was the first one to derive this important value, it was called "Betz factor".

HAWTs are inherently more efficient than VAWTs with efficiencies of up to 50% compared to 40% for VAWTs. The difference on the efficiencies is due to two main reasons:

- The variable blade pitch of the HAWTs, which allows their turbine blades to optimally adjust its angle for reaching maximum amount of energy.
- The perpendicular moving of turbine blades with the wind

When talking about fatigue, HAWTs have gravitational fatigue issues while VAWTs produce a cyclically varying torque that can have negative effects on the transmission and control systems. This produces high-frequency fatigue in small-scale VAWTs, the bigger VAWTs would not have such problem due to their lower rotation speed. Today with the advances in materials technology, fatigue becomes a less important problem that can more easily be remedied.

Differences between HAWTs and VAWTs also can also be seen in wind farms. To understand why, first a new concept must be explained: the wake effect. The wake effect is the trail left by each turbine where the wind speeds are reduced. It has two main effects which are, the reduction of the wind speed (which reduces the energy production of the wind farm) and the increase of the turbulence of the wind, potentially increasing the dynamic mechanical loading on downwind turbines. (González-Longatt et al., n.d.)

In wind farms, HAWTs are usually placed in a distance of ten times their diameter from each other, that is because of the wake effect, while VAWTs wakes dissipate much quicker, allowing them to be packed closer.

Another difference between HAWTs and VAWTs appears when the turbines are meant to work offshore. In an HAWT, the rotor is found at the very top of the tower which induces great bending moments and motions on the tower which requires larger and stronger structures. On the other hand, VAWTs usually have the transmission and generation system at

the bottom which requires smaller support structures which makes them more suitable for naval purposes.(Borg et al., 2012)

Most of the construction of floating wind turbines can be done dockside rather than on site, this works for both HAWTs and VAWTs, but the installation of HAWTs has higher capital costs due to the larger cranes required to mount the machinery and the blades. This is also applicable to fixed-support turbines.

Regarding the maintenance costs, horizontal axis wind turbines usually have higher costs, because as the machinery is in the top of the tower. This requires of a specialist that can go to the top of the tower and special cranes to exchange the mayor components. A positive impact for both configurations is that when upscaling the turbines, the costs will not increase greatly with increasing the sizes.

Before jumping on a conclusion on which kind wind turbines are better, it is interesting to define first the types of VAWTs and the HAWTs.

4.1.1.-VAWTs

As it was explained in the beginning of the memory, vertical axis wind mills were the first ones to be invented, this can be surprising for many people, considering the complex shape of modern VAWTs compared to the simple shape of HAWTs. After the fall of Persia, vertical axis wind turbines did not remain to seem visible. The technical development of windmills mostly happened in Europe during the Middle Ages and its focus remained on horizontal axis wind turbines. After that, in the beginning of the 20th century the first models of VAWTs for producing energy were invented, and it was in the 1970s when they began to be commercialized.

There are two main types VAWT turbines which are Savonius and Darrieus.(Saad et al., 2014)

The Savonius rotor is formed by cutting a cylinder into halves along the central plane and then moving two semi-cylindrical surfaces along the cutting plane so that they resemble like the letter "S".

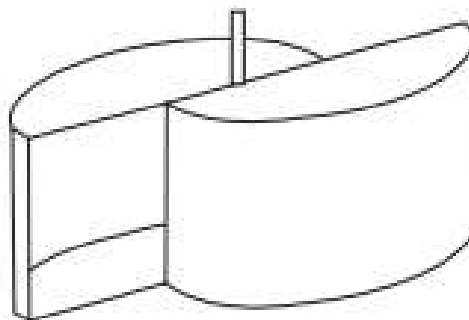


Fig. 9. Savonius rotor(Gupta et al., 2008)

Savonius rotors have the following characteristics:

- Usually cheap and simple
- Acceptance of wind from any direction, no need for reorientation
- High starting torque
- Low operating speed
- Low efficiency which makes them less suitable for generating electricity.
- Low noise
- Various rotor configuration options

The advantages that Savonius rotor has, may outweigh its low efficiency, which makes it an economical source to meet small scale power requirements, especially in the rural areas of developing countries.

There is plenty of different configurations for Savonius rotors, which, as expected affect on the performance of the wind turbine. Many parameters have been studied, such as end plates, aspect ratio, buckets spacing and overlap, buckets number, rotor stages, buckets and rotor shapes, stators, shaft and other accessories, Reynolds number and turbulence intensity.

And for each one of the parameters, different results about the performance of the Savonius turbine have been obtained. That is mainly because of the highly time dependent and complex nature of the air flow around the rotor.

As there is not an analytical method for the optimization of the Savonius turbines capable of predict the performance with good accuracy, experimental and numerical research works must be conducted for this purpose. (Modi & Fernando, 1989)

Attention switches now to the Darrieus rotor, which was invented in 1931 by the French engineer George Jean Marie Darrieus. His patent included two models: the “Eggbeater (or curved bladed)” and the “Straight bladed” VAWTs.

The turbines consist of two or more aerofoil-shaped blades which are attached to a vertical shaft. This rotor does not need to be oriented with the direction of the wind. But its maintenance is complicated and expensive due the elaborate design.

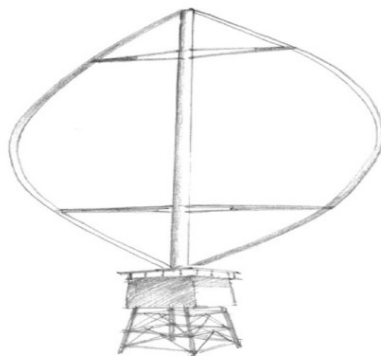


Fig. 10. Curved bladed Darrieus VAWT (Islam et al., 2008)

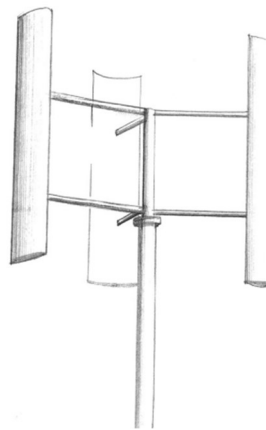


Fig. 11. Straight bladed Darrieus (Islam et al., 2008)

In the small-scale turbine market, the simple straight bladed Darrieus VAWT is more attractive due its simple blade design. At present, development of large-scale straight-bladed VAWT is limited to the research stage only, even though large eggbeater Darrieus wind turbine reached the market commercially in the past, it was only to disappear away later. (Islam et al., 2008)

After their invention in 1931 many different models of Darrieus turbines were developed, as it can be seen the Figure 9:

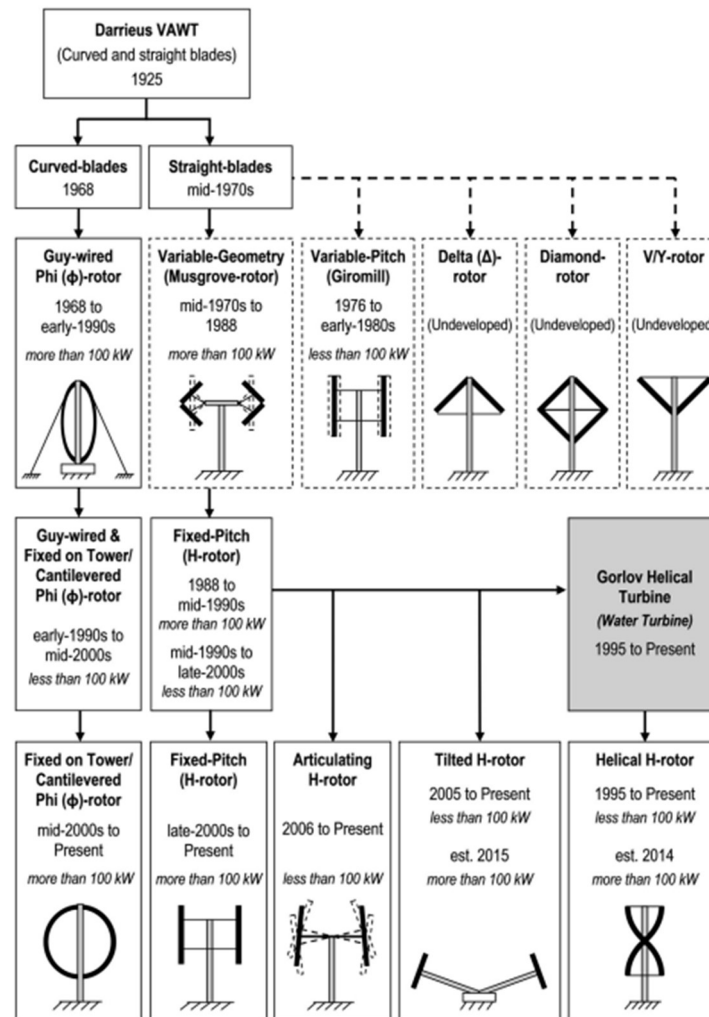


Fig. 12. Timeline of Darrieus development(Tjiu et al., 2014)

Currently development shows that guy-wired rotor is becoming less popular due to many disadvantages such as increased axis load due to wire tension, vibrations and a large area required to mount the wires. From all the models above, one of the most notable ones is the Helical H-Rotor.

The helical H-rotor was created by twisting the blades of an H-rotor to form a helical shape. This new shape improves the performance of the H-rotor by distributing a blade profile along the perimeter of the rotor uniformly, which makes the swept area as well as the blade

sections constant to the wind at all instances of turbine rotation. Therefore, the rotor torque fluctuation is significantly reduced. Because of that, a better power output, lower noise and reduced cyclic stress on the drivetrain are achieved. Currently, helicoidal design is gaining popularity not only because of better performance but also for its modern and elegant design.



Fig. 13. Helicoidal H-rotor (Tjiu et al., 2014)

In order to know which rotors had a better performance, a comparison between the helicoidal H-rotor, phi-rotor and H-rotor was made. All the rotors had its 3 blades spaced 120 degrees, its geometry can be seen in Fig 10:

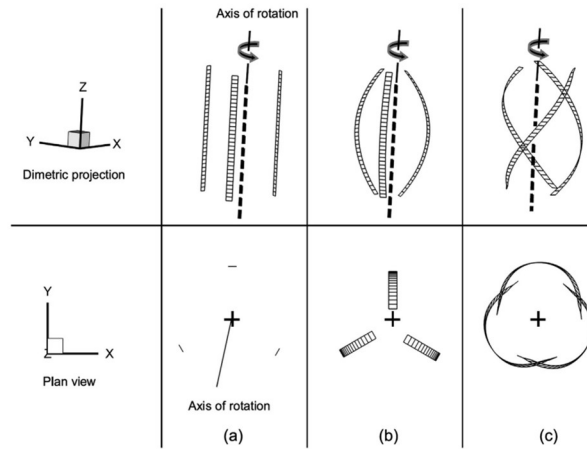


Fig. 14. Geometry of the modelled rotors a) H-rotor b) phi-rotor c) helical H-rotor (Tjiu et al., 2014)

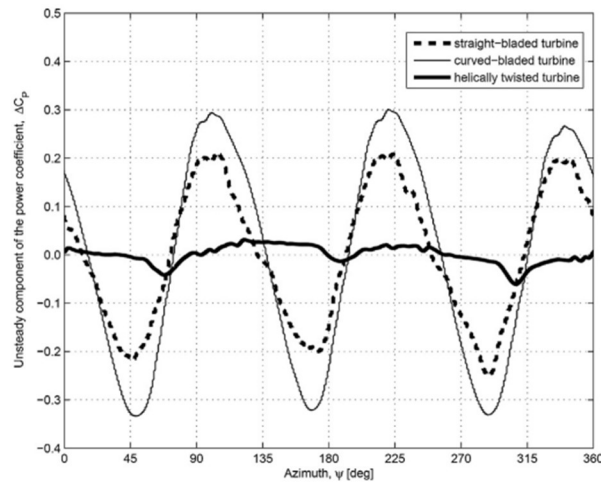


Fig. 15. Power coefficient variations (Tjiu et al., 2014)

In figure 15, it can be observed that the torque fluctuation varies 3 times in each rotation. The phi-rotor has the most fluctuation followed by the H-rotor. To finish with, it must be added that even though helical blades have plenty of benefits they are more expensive to manufacture.

The two main characteristics of Darrieus rotors is that even though having a low starting torque, they can provide good efficiency at high rotational speed. Because of that, Darrieus rotors are never used alone, they are usually combined with another wind rotor like Savonius, which can provide a high starting torque. (Gupta et al., 2008)

The Waseda University of Japan studied two different configurations for the combination of a curved blade Darrieus and a Savonius rotor, the Type A and the Type B.

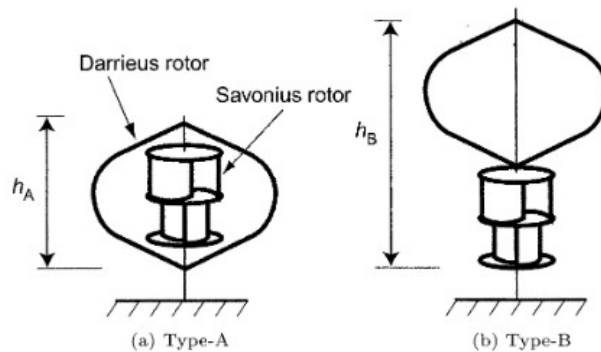


Fig. 16. Hybrid configurations of VAWTs. (Wakui et al., 2005)

In Type A, the Savonius rotor is installed inside the rotational closed space of the Darrieus rotor, emphasizing its compactness as a stand-alone power system, while in Type B, the two rotors are connected outside the rotational closed space in order to avoid air flow interference between the two rotors, giving priority to greater output from the wind turbine.

Table 1 shows the geometries of both configurations. When the same rotor specifications are used, Type B provides 1.5 times the rated output as the Type A does.

Item	Type-A	Type-B
Nominal power output kW	0.3	0.45
Nominal wind speed m/s	10	10
Darrieus rotor		
Blade shape	Troposkien	
Airfoil section	NACA0015	
Number of blade	2	
Chord length m	0.1	
Rotor diameter m	2.0	
Rotor height m	1.6	
Savonius rotor		
Rotor diameter m	0.6	
Rotor height m	0.6	
Total height m	1.6	2.8
Swept area m ²	2.34	3.06
Rotational inertia kgm ²	2.80	3.05
Static friction torque Nm	0.505	0.606

Table 1 Specifications of the hybrid turbines(Wakui et al., 2005)

For studying output characteristics, dimensionless parameters were used, defined by the equations:

$$X \equiv \frac{2\pi}{60} nR$$

$$C_t \equiv \frac{\tau}{0.5\rho ARV^2}$$

$$C_p \equiv \frac{P}{0.5\rho AV^3}$$

Where A: swept area [m²]; CP: power coefficient; CT: torque coefficient; n: rotational speed [rpm]; P: output power [W]; R: maximum rotational radius [m]; V: inflow wind speed[m/s]; X: tip speed ratio; ρ: air density [kg/m³]; τ: torque [Nm].

During the evaluation of the output characteristics, it was observed that in Type A, the maximum power coefficient is lower than the one of the Darrieus turbine alone ($C_{pmax_D} = 0.30$). That is because the Darrieus and Savonius rotors interfere with each other due to air flow. Table 2 shows the calculated values for the output characteristics of both types of turbines, on which the values calculated in the wind tunnel match the theoretical values.

Item	Type-A	Type-B
Maximum power coefficient C_{pmax}	0.204	0.231
Tip speed ratio at C_{pmax} X_{ref}	3.51	3.76

Table 2 Maximum power coefficient (Wakui et al., 2005)

As the type B does not generate interference, its generated output is the generated sum of the output of each rotor. As a result, the maximum power coefficient on the high tip speed ratio side is greater compared to Type A. It was observed that, despite having a better power coefficient, the start-up time for the type B was longer, and an unstable behavior occurred more often when wind speed rose. As a result, good operational behavior did not occur in a large-scale system.

When talking about net power extraction, it was also observed that even though type B is more efficient in small-scale systems, the type A was observed to be more productive under conditions involving short blowing durations. Because of that, type A was found more useful, and its disadvantages against type B can be solved modifying its rotor parameters, improving its performance. (Wakui et al., 2005)

4.1.2.- HAWTs

Transitioning from our exploration of Vertical Axis Wind turbines VAWTs, attention now shifts to the world of HAWTs. Unlike VAWTs, there is not many variations on the shape of HAWTs, the main differences found between the types of HAWTs are found on the towers that support the weight of the wind turbines and on the number of blades found on the rotors.

The towers are one of the most important parts of HAWTs because they are in charge of holding the weight of the wind turbines and withstanding many different kinds of loads such as the ones caused by the average wind speed, movement of the rotor, wind profile, gravitational loads and angles of the blades. If the towers are placed offshore, they also have to withstand the forces caused by the sea, such the ocean currents and the wave forces. In order to withstand those loads, different kind of towers have been designed.

The most used wind turbine towers are tubular steel towers, concrete towers and lattice towers for medium to big size big turbines, and guyed wind towers, tilt-up wind towers and hybrid towers for small scale wind turbines. (Danish wind industry association)



Fig. 17. Tubular tower (Danish wind industry association)

Tubular steel towers are the most common type of wind turbine towers. Used for holding large wind turbines, they are composed of several cylindrical and/or conical shell segments. These shell segments are made by cold-curving flat steel plates into the desired cylindrical shape, after that, their edges are welded to achieve a closed shell. By welding consecutive shell parts together, 15 to 30 m height cylinders are obtained. Finally, these long shells are transported and bolted together with fully preloaded bolts. (Koulatsou et al., 2020)

The towers are conical (with the bigger diameter on the base) in order to increase their strength and save materials. The tubular steel towers have the following characteristics:

- **Robust:** As they are made from steel plate, they are very resistant.
- **Difficult to manufacture:** Especially because of the welding of the shells, the deformation control and the size of the shell segments.
- **Difficult and expensive to transport:** It is limited to the vehicle size and road condition.
- **Expensive to maintain:** The antirust protection can only be done manually.
- **Provide protection:** As they have a closed structure, the internal parts are well protected. (CNBM International)



Fig. 18. Lattice tower (Danish wind industry association)

Lattice towers are manufactured by using welding steel profiles, this procedure requires less material than the one used for the making of a tubular tower. Lattice towers were used in the past for experimental small size turbines due to their simplicity of design and construction. Nowadays their presence in western countries is limited, but they can still be found in Eastern Europe, Middle East, and Asia. The main characteristics of lattice towers are:

- **Low cost:** They require less material, less welding, and the process of fabrication can be automatized.
- **Less maintenance costs:** The steel can be galvanized which protects the tower from the rust.
- **Bad visual appearance:** Even though subjective, many people dislike the appearance of lattice towers.
- **Simple transportation:** They are light, which makes them easier to transport.
- **Extra protection required:** To protect the cabling and other mechanisms.

As tubular towers become significantly more expensive when their size increases above 100 meters, and, as lattice towers use less material than tubular ones, a study with the objective of

reducing costs was done to test if Lattice towers could become an alternative version to the tubular ones. The results indicated that even though the lattice towers can be a feasible alternative in terms of structural performance, under extreme operating conditions lattice towers experienced an excessive hub displacement. Generator failures were also found due to vibration, and to end with, in very turbulent winds the blades could bend in the bend in the direction of the wind flow, bringing them closer to the tower, resulting in dangerous consequences. (Barbu et al., 2021)

Another option was studied: concrete towers. The results were very promising and show great potential for the manufacturing of towers taller than 70 meters, due to properties such as strength, specific weight and versatility. (de Lana et al., 2021)



Fig. 19. Concrete towers (Wind power and engineering development)

Even though concrete is not the most used material when building turbine towers, some studies show that it could become a better material than steel, its main advantages are:

- **Faster construction:** The pieces are prebuilt and assembled on the location.
- **Lower cost during all phases of construction:** The costs of labor and equipment.
- **Durability:** They are estimated to last possibly up to 50 years, twice than the steel towers. In addition, additives can be used to improve the resistance of the tower and the protection against aggressive environments.
- **Environmental effect:** They have a dampening effect which lessens the amount of noise the turbine makes.
- **Future potential:** As it was explained before, concrete wind turbines can be an alternative to steel towers, as they do not have such a strict limitation about the price as steel tubular towers.

Transitioning to small wind turbines, the towers required to hold the weight of the head of the turbine do not need to be as resistant as the ones used for the large wind turbines. Because of that, their shapes vary from their big counterparts, the most popular ones are guyed towers, tilt-up towers and hybrid towers.



Fig. 20. Guyed wind tower (Danish wind industry association)

Guyed towers are only used for holding small wind turbines. Part of the weight of the turbine is held by the wires, which makes these towers more prone to vandalism, compromising the overall safety of the tower. In addition, the wires require regular maintenance to ensure that they are in good condition and properly tensioned. As the wires require extra space and their low cost compared to other options (that is because of the material saving of the tower), they are commonly used in rural areas, where there is plenty of space and where guy wires are not a problem.



Fig. 21. Tilt-up wind towers. (*Wind Generator Tower Basics*, n.d.-a)

Tilt-up towers come in different heights and sizes, and as guyed towers, they require a set of wires to hold the tower. The difference with the previous mentioned towers is, that tilt-up towers allow to move down the turbine, which permits the workers to do the maintenance on terra firma. In places with wind strong winds like hurricanes, this mechanism allows to protect the turbines saving them from destruction. (*Wind Generator Tower Basics*, n.d.-b)



Fig. 22. Hybrid tower (Danish wind industry association)

Some towers are made in different combinations of techniques mentioned above. One example is the three-legged tower seen in the Figure 22 which is a hybrid tower between a lattice tower and a guyed tower.

5.- ROTOR DESIGN-BLADES

The blades are one of the most important parts of a wind turbine, that is because of its ability to extract energy from the wind. Characteristics such as tip speed ratio, angle of attack and material used in the manufacturing of the blade play important roles in determining the efficiency of the blade.

5.1.- Materials

The rotor blades form a delicate structure, that is why careful consideration must be given to material selection. The materials used for rotor design should be:

- **Stiff:** High material stiffness is needed to maintain optimal aerodynamic performance.
- **Light:** Low density is needed to reduce gravity forces.
- **Durable:** long-fatigue life is needed to reduce material degradation.

The material selection of rotor blades is a complex and multifaced task that requires optimization of properties, performance, and economy.(Brøndsted et al., 2005)

Nowadays most blades are made with fiberglass-reinforced polyester or epoxy. Different materials such as wood compounds like wood-epoxy or wood-fiber-epoxy is being investigated. (Iberdrola)

5.2.- Tip Speed ratio

The tip speed ratio is defined as the relationship between the rotor blade velocity and the relative wind velocity.

$$\lambda = \frac{\Omega r}{V_w}$$

Where λ is the tip speed ratio, Ω the rotational velocity (rad/s), r is the radius of the blade and V_w is the velocity of the wind.

Tip speed ratio is one of the most important parameters when designing a turbine. Aspects such as efficiency, torque, mechanical stress, aerodynamics, and noise should be considered in selecting the appropriate tip speed. High tip speeds increase the efficiency, the noise, the centrifugal and the aerodynamic stress of the turbine and decrease the torque. Modern HAWTs generally utilize a tip speed ratio of nine to ten for two bladed rotors and six to nine for three blades. (Schubel & Crossley, 2012)

5.3.- Blade Plan Shape and Quantity

There are several theories for calculating the optimum chord length, one of them is based on the Betz optimization:

$$C_{opt} = \frac{2\pi r}{n} \frac{8}{9C_l} \frac{U_{wd}}{\lambda V_r}$$

Where $V_r = \sqrt{V_w^2 + U}$; r =radius (m); n =Blade quantity; C_l = Lift coefficient; V_r =Local resultant air velocity (m/s); U =wind speed (m/s); U_{wd} = design wind speed (m/s); C_{opt} =Optimum chord length.

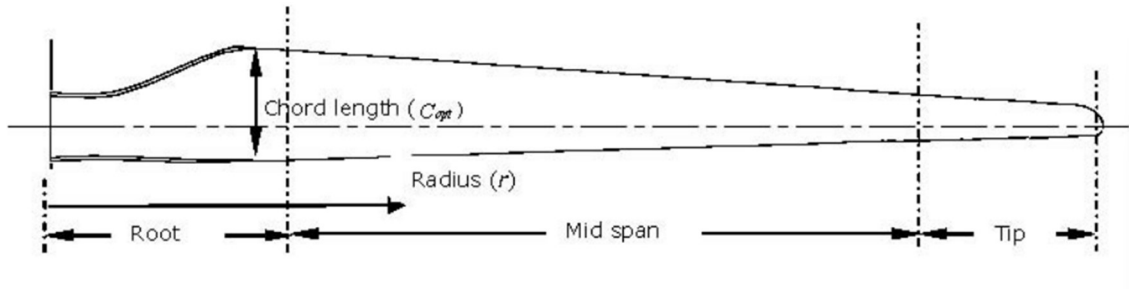


Fig. 23. Geometry of the rotor(Schubel & Crossley, 2012)

Assuming a constant lift coefficient, the chord length of the blade is principally dependent on the number of blades and on the tip speed ratio. Generally, in practice the chord length is simplified to facilitate the manufacture. The losses of the simplification can be justified by a significant production cost saving.

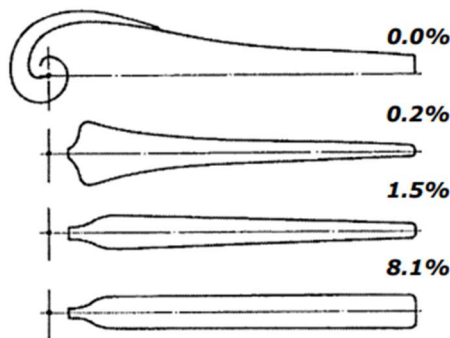


Fig. 24. Efficiency losses as a result of simplification to the ideal chord length (Schubel & Crossley, 2012)

The number of blades must also be considered because it affects the speed and efficiency of a wind turbine. The power that a wind turbine extracts from the wind is directly proportional to the swept area of the blades; consequently, the blades have a direct effect on power generation. The more blades a turbine has, the higher the torque it produces and the slower the rotation speed. As most of the turbines used for generating electricity must run at high speeds, they do not require much torque. Because of that, greater power generation is achieved with a fewer number of blades. In general, most HAWTs have three blades. Even though one or two blade designs are the optimal number regarding efficiency, this designs cause imbalance, which makes the blades to vibrate, increasing the risk of a catastrophic mechanical damage, and, thus, are not practical. Mechanical problems with two-blade turbines can be solved in a four-blade design, but ignoring the extra weight of the blade, economically four blades are more expensive than three blades. For these reasons, turbines manufactured with three blades represent an ideal compromise between high energy output, high stability, light weight, and turbine durability. (Adeyeye et al., 2021)

Regarding the noise, two bladed designs must rotate faster for maximum efficiency, which is a disadvantage for onshore wind turbines because the noise increases due the increase in tip speed.

The visual impact of the wind turbines must also be considered. Three blade designs are said to appear smoother when rotating therefore more pleasant to see.

5.4.- Aerodynamics

Aerodynamic performance is fundamental for an efficient rotor design. Aerodynamic lift is the force that generates the power of the turbine, and it should be maximized with a proper design, in addition, a resistant drag force is also existent, which should be minimized as it opposed to the motion of the blade. The lift to drag ratio defines the relation between these two forces:

$$\text{Lift to drag ratio} = \frac{\text{Coefficient of lift}}{\text{Coefficient of drag}} = \frac{C_l}{C_d}$$

The co-efficient is difficult to predict mathematically, that is why traditionally airfoils are tested experimentally, looking for achieving a co-efficient greater than 30. (Schubel & Crossley, 2012)

The angle of attack is the angle of the oncoming flow relative to the chord line. On large turbines it is constantly adjusted to give the blades the optimal angle into the wind. On most airfoil blade shapes an angle of attack of 25 to 30 degrees creates the most lift with the least drag, but this angle varies a lot depending on the turbine.

The angle of twist is another important parameter, it is dependent upon tip speed ratio and the angle of attack. Generally, the aero foil section at the hub is angled into the wind due to the high ratio of wind speed to blade radial velocity. In contrast the blade tip is usually almost normal to the wind. The angle of twist may be reduced to reduce manufacturing costs, but these simplifications must be well justified considering that the overall performance of the wind turbine will be reduced.

5.5.- Off-Design Conditions and Power Regulation

Early wind turbines were designed to work at a fixed rotational velocity, therefore, when the wind conditions were not ideal, the efficiency of the wind turbines decreased. Nowadays, the use of fixed speed turbines is limited to smaller designs. For larger wind turbines this does not occur anymore, and it is suggested that the gearbox may be obsolete in future turbines.

Modern turbines work at wind velocities higher than rated. Because of that, method limiting the rotational speed must be implemented to prevent excessive loading of the blade, hub, gearbox and generator. In addition, the turbine must also maintain a high efficiency at low wind speeds.

As the oncoming wind velocity directly affects the angle of incidence of the resultant airflow onto the blade, the blade pitch angle must be altered accordingly. This is known as pitching, which maintains the lift force of the airfoil section. This is done by twisting mechanically the full length of the blade. With pitching, it is possible to increase the lift in low wind conditions and to prevent the over speed of the rotor for high wind conditions.

5.6.- Smart blade design

The current trend in blade design is the so called “Smart blades”, which alter their shape depending on the wind conditions. There are numerous approaches in the smart design category, which are either aerodynamic control surfaces or smart actuator materials. The objective within this research is to limit the loads and the fatigue, in order to increase the energy capture. The use of aerodynamic control surfaces includes aileron style flaps, camber control, active twist and boundary layer control. Figures 25 and 26 show a comparison of the aerodynamic performance based on a variety of aerodynamic control surface concepts:

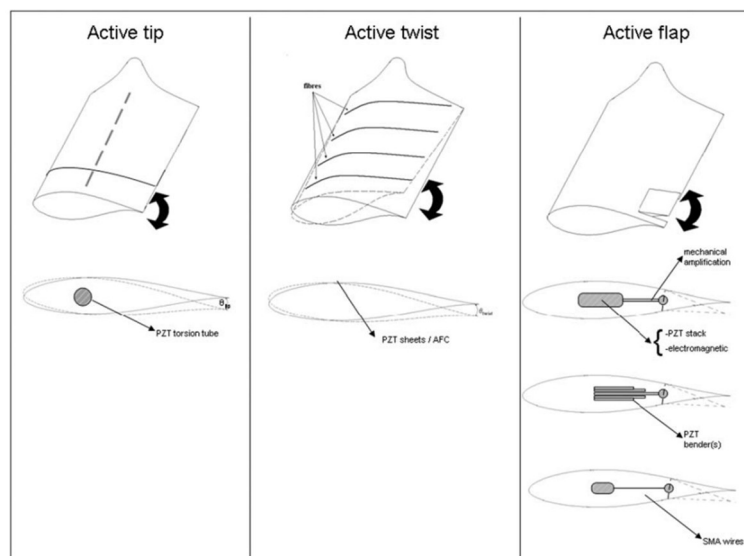


Fig. 25. Smart structure concepts (Schubel & Crossley, 2012)

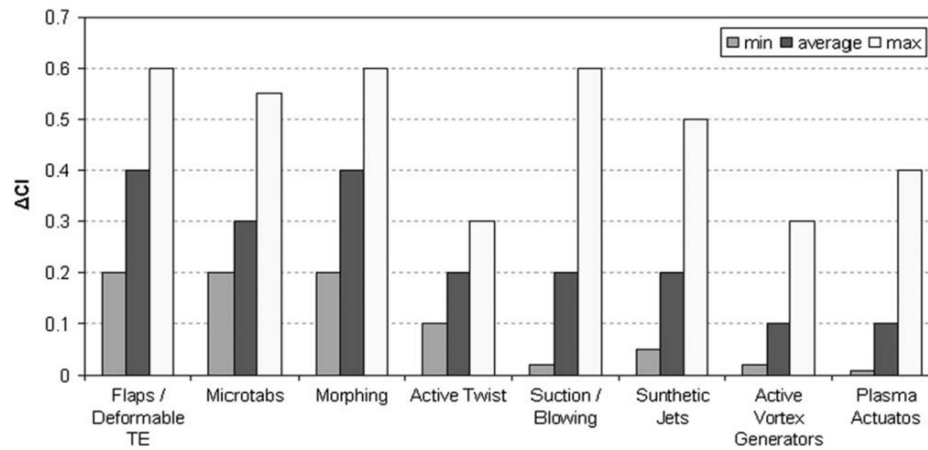


Fig. 26. Comparison of aerodynamic device concepts in terms of lift control capability (Schubel & Crossley, 2012)

Proposed concepts for aerodynamic control surfaces require fast actuation without complex mechanical systems and large energy to weight ratios. For this purpose, smart materials actuator systems need to be used. The most used smart materials are ferroelectric materials, variable rheology materials and shape memory alloys. The development of their technology has reached a high level and commercial solutions are available and widely used.(Schubel & Crossley, 2012)

6.- Placement strategies for wind turbines: Offshore vs onshore

The placement of wind turbines, whether offshore or onshore, plays a crucial role in maximizing the efficiency and effectiveness of wind energy generation. In this section, we will explore the optimal locations for wind turbines, considering factors such as wind resource availability, environmental impact and economic viability.

Wind turbines can be installed either onshore (on land) or offshore (beyond the coast). The main difference between onshore and offshore is their respective environment. Offshore wind farms are much more complex to design, install and maintain, that is because there are many factors that can affect on the process.(Esteban et al., 2011)

Because of their different environment, onshore and offshore wind turbines have different kind of foundations. Various types of foundations are used for onshore wind turbines, and even though their shapes may vary, all of them are based the same principle: the use of reinforced concrete.



Fig. 27. Foundation types for onshore windturbines(Austin & Jerath, 2017)

Transitioning to the offshore wind energy, as the depth in the sea varies significantly depending on the areas on which the turbines are located, different kind of foundations had to be developed. These foundations are subject to a complex combination of wind and hydrodynamic loadings of varying direction, amplitude and frequency.

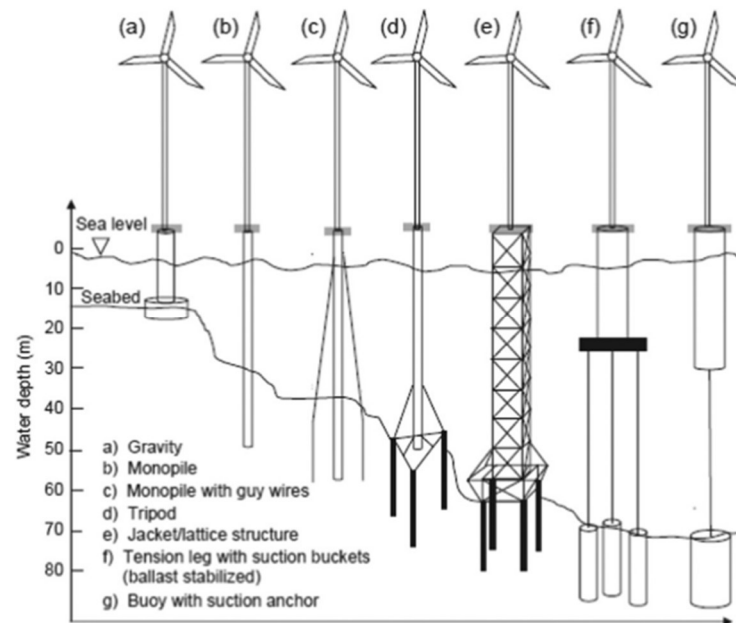


Fig. 28. Foundation types for offshore wind turbines depending on the water depth

In 2022 of the total 900 GW of wind capacity installed, 93% was onshore systems, while only 7% was offshore. Onshore wind is a developed technology, present in 115 countries around the world while offshore wind energy is at an early stage of expansion, with capacity only present in 20 countries. (International Energy Agency)

Even though onshore wind energy is still dominating the market, offshore wind farms are beginning to take part of the sea of the coastal landscape of some countries, this can be explained because of several factors such as the lack of space for the development of onshore

windfarms, the government support and the expected minor environmental impact of offshore wind farms. In addition, offshore wind energy offers two major advantages against onshore energy such as:

- **Wind quality:** Wind speed is usually bigger, increasing with the distance from the coast, and more uniform, leading to less turbulence effects. Therefore, the fatigue effects are reduced which increases the lifetime of the wind turbine.
- **Placement areas:** There are bigger free suitable areas in the sea where offshore wind farms can be installed. The noise pollution, as well as the visual impact are minor problems as the location of the windfarms is far from populated areas. In addition, as there are not strict limitations on the load to transport, it is possible to install larger turbines, achieving more production per install unit.

While its disadvantages are:

- **Cost:** The permitting and engineering process, the construction (especially the marine foundations and the integration of the electrical work) significantly increases the cost of the offshore wind technology.
- **Young technology:** The offshore wind technology needs more development. It is still to be determined which generator is the most suitable for offshore wind farms (especially for turbines with floating foundation) which will have to adapt to the marine conditions such as corrosion and higher loads.
- **Maintenance:** Limited and more expensive access to the wind turbines.

Even though offshore wind turbines are the most expensive option nowadays, their cost is falling, and it is expected to continue doing so during the following decade. (Esteban et al., 2011)

7.- Regulation of the installation of small wind turbines in residential properties in the Netherlands.

The installation of small wind turbines in residential properties presents an opportunity for decentralized energy production and sustainable living, particularly in windy regions of The Netherlands. As the renewable energy solutions continues to rise, understanding the regulatory structure becomes essential. In this section, the regulations governing the installation of small wind turbines on residential properties in the Netherlands will be examined.

For the installation of a wind turbine an environmental permit is always required. This permit applies not only for large wind farms but smaller private wind turbines. The environmental permit is required for the construction of the wind turbine (Article 2.1, first paragraph, under a of the General Provisions for Environmental Law WABO Act), often for deviating from the zoning plan (Article 2.1, first paragraph, under c, WABO) and for commissioning of an (environmental) establishment (article 2.1, first paragraph under e WABO). (*Particuliere Windmolens - van Doleweerd LAW*, n.d.)

When installing a small wind turbine on or near a house or business the owner must first apply for and receive an environmental permit. This applies to windmills on its own mast but

also to windmills that are placed on the roof. In addition, an environmental permit is required for every installation of a wind turbine, this means that a new application must be submitted for every additional installation of a wind turbine.

The environmental permit is compound by several norms which regulate the installation of a wind turbine. The noise norm established that the average noise level caused by a wind turbine may not exceed 47 dB in places sensitive to the noise (for example a house). In addition, a maximum noise level of 41 dB for the night period applies. The noise standard applies per facility, regardless of the number of turbines or the type of turbine. However, the competent authority can set a lower standard for a facility in order to take into account cumulation due to multiple facilities with wind turbines.

A security norm also applies, on which the security of the wind turbine will be studied according to several different norms of the environmental plan, and if passed, it will receive a certificate that lasts 20 years, in addition the security of the wind turbine, will be inspected once per year. (*Externe Veiligheid*, n.d.)

A norm about the shadow casted on the neighbor's houses was also implemented, on which wind turbines must have a device to stop the wind turbine, to avoid the projection of shadows if:

- The distance from the wind turbine to other homes is less than 12 times the diameter of the rotor.
- The shadows projected on other homes can occur more than seventeen days per year and twenty minutes per day.

(*Slagschaduw Bij Windenergie Op Land*, n.d.)

In addition, the wind turbines must also not disturb with the civil and military radars of the country. (*Radar Bij Windprojecten*, n.d.)

Whether it is possible to obtain an environmental permit depends on the municipality. Some municipalities may have a special policy for this, or this may be regulated on the zoning plan. That is why good research of the possibilities when placing a wind turbine must be done. There can be significant cost associated with obtaining the correct permit which can affect the payback time of the turbine.

A growing number of municipalities has drawn up a specific policy (facetbestemmingsplannen or beleidsnoties) for these small (micro) windmills and/or wind turbines. It states exactly what is possible and under what conditions. If no specific wind turbine policy applies in your municipality, the bestemmingsplan (destination plan) rules apply.

The policy of the municipality is often location-oriented, in addition, the efficiency of the turbine also depends on the location. That is why the feasibility of the turbine will be highly influence by the location.(*Particuliere Windmolens - van Doleweerd LAW*, n.d.)

Example: municipality of Wijchen

The municipality has indicated its decision to have an integrated assessment framework to prevent the proliferation of wind turbines and to identify opportunities for the integration of the wind turbines into the landscape. Once this memorandum is adopted, it will serve as a municipal policy framework for assessing requests for the installation of small wind turbines both inside and outside built-up areas and will serve as input for zoning plan revisions.

This memorandum focuses on small wind turbines. The municipality has declared that despite the difficulties to establish a hard lower or an upper limit to for a small wind turbine the distinction between a small turbine and a large one will be clear to everyone. Large windmills can be erected up to 80 to 120 meters high. Small wind turbines (to which this memorandum refers) will not be higher than 20 meters on their own mast, while when they are placed on an existing structure, the maximum height will be five meters. This will often involve private applicants with a request for one or a limited number of windmills.

Currently, the municipality of Wijchen has no specific wind turbine policy. In principle, wind turbines are always subject to building permits, which means that the zoning plan currently forms the most important assessment framework for requests to erect a wind turbine. In practice, it appears that hardly any zoning plan in the municipality of Wijchen provides for the possibility of erecting a windmill. In the outlying area, structures are permitted at most up to a height of 10 meters and within built-up areas, a maximum building or gutter height often applies, with only a very limited possibility of erecting something here. A request to install a wind turbine will therefore in principle always be in conflict with the zoning plan. The exemption options are also limited. The zoning plans usually do not provide for an internal exemption option and the so-called crumb cases regulation (article 3.23 Wro jo article 4.1.1 Bro) only provides an extra-plan exemption regulation for structures up to 10 meters high. This will often be insufficient for wind turbines. For separate applications, a partial zoning plan review or a project decision will therefore always have to be made in anticipation of this.

The municipality of Wijchen wholeheartedly welcomes initiatives regarding sustainable and green energy. From that perspective there is therefore a positive basic attitude towards the installation of small wind turbines. However, the efficiency of small wind turbines, especially in relation to the purchase price, is a matter of debate. The municipality of Wijchen claims that small windmills are not as efficient as other green electricity suppliers (such as solar collectors) that is because small windmills are relatively expensive, they produce little energy, and their payback period is relatively long (between 21 and 98 years).

The landscape development plan (LOP) therefore indicates that the installation of wind turbines creates a new layer in the landscape, which is often visible from a great distance, particularly in the open countryside. The spatial impact is also considerable in built-up areas, but there a windmill usually disappears against the background of existing buildings or it can be well integrated. From a spatial point of view, a wind turbine fits best in a technical, highly dynamic environment such as a business park or along large-scale infrastructure.

As it was said before, the payback time is long, the yield is low and the spatial impact is often large. Nevertheless, the municipality of Wijchen considers it important to facilitate initiatives related to green electricity and sustainable energy generation and to formulate policy

principles regarding small wind turbines. The municipality of Wijchen has opted for an area-oriented approach, distinguishing between three area types:

1. Built-up areas, residential areas and village centres: In these areas the spatial impact of small wind turbines is usually easy to oversee. Small wind turbines often do not cause the nuisance of large wind turbines (noise, cast shadow, etc.). However, the actual efficiency of a mill or turbine will probably not be very high due to the lack of an unimpeded wind supply. From an urban development and aesthetic point of view, it is best if a wind turbine is integrated into a (large-scale) construction project from the start, in the form of so-called Urban turbines. Placing separate windmills and turbines in a village setting is often undesirable from an urban development and aesthetic point of view. Moreover, a relatively complex procedure must be followed for such a separate windmill (namely a zoning plan review possibly preceded by a project decision). In a large-scale construction project, the turbine can be integrated into the planning and procedure. In view of the limited return, it should be borne in mind that the installation of a wind turbine mainly has a symbolic function.

2. Highly dynamic areas with a technical appearance, being mainly business parks and sometimes large-scale infrastructure lines: From a spatial point of view, a technical and dynamic element such as a windmill fits perfectly in a technical environment of a business park or within 50 meters of large-scale infrastructure such as a highway, railway line or engineering structure (bridge, viaduct, etc.), if it is not located in the open area or residential area. Here too, given the limited efficiency, the installation of a wind turbine mainly has a symbolic function.

3. Outlying areas and nature reserves: An extra careful assessment framework applies to the outlying area and nature reserves. Although the (unimpeded) wind supply will be greatest in the (open) outlying area and nature reserves, wind turbines in the outlying area also have the greatest spatial impact. Given their dynamic and technical character, they often do not fit in well with open areas and nature reserves. By allowing individual windmills, the danger of cluttering up the countryside is imminent. In this case, clutter refers to damage to the original landscape, which reduces the visual value. Although cluttering is linked to personal perception, the degree of cluttering strongly depends on the amount of (disturbing) elements and the variation in land use functions within the landscape. The municipality therefore chooses to only allow small wind turbines within existing building blocks, in line with the existing buildings of agricultural and non-agricultural businesses and homes. Clustering prevents cluttering of the landscape. For the time being, a zoning plan review (whether or not preceded by a project decision) must be completed before the establishment of a wind turbine, in which aesthetic and environmental aspects can be weighed up and stakeholders have the opportunity to participate. For nature reserves and areas outside existing building blocks, loose wind turbines can detract from the rural and natural character of the outlying area and have a cluttering effect. Small wind turbines are therefore not permitted in these areas. (Overheid.nl)

[Procedure for applying for an environmental permit:](#)

The procedure for applying for an environmental permit for a small wind turbine is the same as the normal procedure for an environmental permit. It will differ per location whether only the environmental permit is required for the building activity, or whether the activity also deviates from the zoning plan.

All activities are submitted to the competent authority via a single digital form from the Online Environment Desk (OLO). It assesses whether the wind turbine fits within the zoning plan and meets the environmental and safety requirements. The period of the regular procedure is eight weeks. If no decision has yet been taken on the granting of a permit, the period will be extended once by six weeks. Environmental permits for mini wind turbines are also submitted to the municipal aesthetics committee or city architect. It may therefore be useful to first create a draft application at the OLO and discuss it with the municipality. This reduces the risk of delay or rejection. It is also important to inquire in advance with the municipality about the costs of granting a permit. (*Kleine Windmolens: Wat Kun Je Ermee En Welke Vergunningen Heb Je Nodig?* | *HIER Opgewekt*, n.d.)

If the application is approved, the permit will be published. From that moment on, it is possible for a period of six weeks to object to the granting of the permit. (*Particuliere Windmolens - van Doleweerd LAW*, n.d.)

Costs and payback period

The purchase costs of a mini wind turbine vary from hundreds to many thousands of euros. This depends on the power. Small wind turbines have a capacity between 0.5 and 6 kW (kilowatts). Even with an optimal electricity yield, the investment often does not pay for itself within the technical lifespan of twenty years. The choice for a mini wind turbine is therefore mainly based on environmental considerations and not from an economic perspective. There are hardly any subsidies available for the purchase. Some provinces and municipalities provide them in the context of local climate agreements. Certain individuals use the Energy Investment Allowance (EIA) for a contribution towards investments in energy-saving techniques or sustainable energy. (*Kleine Windmolens: Wat Kun Je Ermee En Welke Vergunningen Heb Je Nodig?* | *HIER Opgewekt*, n.d.)

8.- Selection of the wind turbine

After exploring the different types of wind turbines and its technology in the previous chapters, the focus now shifts to the selection process. In this chapter, it will be explained which wind turbine will be selected for this project.

In the previous sections it was explained that there were two main types of wind turbines (vertical axis wind turbines and horizontal axis wind turbines) and its differences. With all the knowledge I have acquired during the research done within this project, I have decided to select a HAWT against a VAWTs because of the following reasons:

- **Efficiency:** HAWTs are more efficient than VAWTs. In the previous section it was described that the current regulation of the installation of wind turbines in The Netherlands does not allow to build tall towers to withstand the weight of the turbine. This will affect the speed of the wind that goes through the wind turbine, because the lower the wind turbine is located, the slower and more turbulent is the wind that passes through it. For those reasons, in order to increase the power supplied by the

wind turbine, the efficiency of it should be as high as possible, and as said before, HAWTs are the best option regarding efficiency nowadays.

- **Cost:** Considering that the wind turbines are the same size, VAWTs are more expensive than HAWTs, that is because of their complex geometry, which more difficult to manufacture. The payback period of a small wind turbine tends to be long, and with a longer payback period for VAWTs, an horizontal axis wind turbine is a better choice.
- **Appearance:** VAWTs can have a good appearance, especially the helical H-rotor because of its modern and elegant design, but many people prefer the traditional design of HAWTs with three or two blades against the modern design of VAWTs. Even though this section is subjective, it was considered two or three rotor blade HAWTs as a more elegant option that could be more easily incorporated to the residential landscape of Dutch neighborhoods.
- **Technology:** HAWTs' technology is more mature, therefore, HAWTs have been tested more which makes them less prone to fails, and in addition, they are more available than VAWTs.
- **Power:** HAWTs can produce more power than VAWTs. After doing research in google shopping, all the small wind turbines that were able to produce a power greater than 2kW were HAWTs.

Now that it has been defined what kind of wind turbine will be chosen and why, lets dive into its components. HAWTs have different parts, each one of them has a unique purpose, in order achieve an efficient perform of the wind turbine, each one of the parts must work properly. Small horizontal wind turbines have some differences on the parts and mechanism used compared to the large horizontal wind turbines used in wind farms. Because of that it is important to choose the mechanism and parts that fit better the size of our wind turbine.

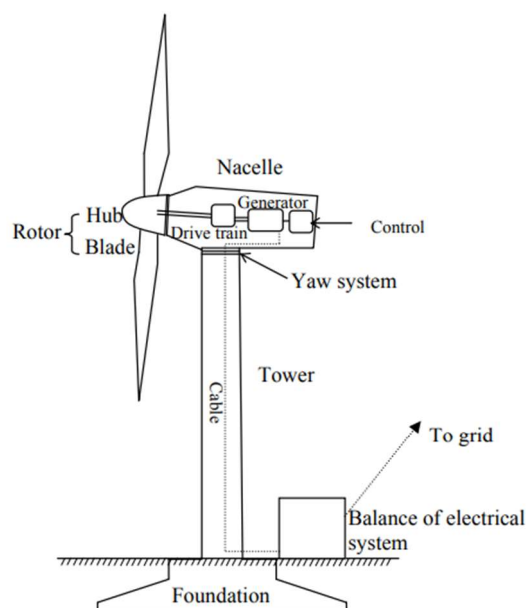


Fig. 29. Parts of a horizontal wind turbine (On Techno-economic Evaluation of Wind-based DG)

The parts that form a small horizontal wind turbine are:

- **Tower:** As the wind speed increases with the height, the wind turbine must be either mounted on a tower or in the roof of a house. The tower is a better option because the wind that goes through a turbine mounted on the roof of a house will be more turbulent than the wind found on the top of a tower. Turbulent wind reduces the performance of a wind turbine, that is why it is always preferred to have a laminar flow, which is easier to find in the top of a tower. The tower chosen for this project will be a lattice tower because of its easier transportation and lower price.
- **Nacelle:** The nacelle is the structure that sits on the top of the tower in a wind turbine. It houses the generator, the gearbox and other key components that are essential to transform the wind kinetic energy into electricity. Its shape is typically cylindrical for large wind turbines, but it can be found in different kind of shapes in small wind turbines. (HIA energy)
- **Generator:** It is the most important part of the nacelle. It converts the mechanical energy produced by the rotor blades into electrical energy. The generator is typically a synchronous machine, meaning that the speed is synchronized with the frequency of the electrical grid. Most wind turbines use a three-phase generator, which means that they produce three alternating currents that are out of phase with each other.
- **Tail:** Wind turbines must face the wind to be able to perform properly. Wind turbines use the “yaw system” which is in charge of rotating the wind turbine so that it faces the wind. Large wind turbines use an “active yaw system” which uses electric or hydraulic motors to rotate the heavy wind turbine. Smaller wind turbines use a “passive yaw system” on which the wind force is used to adjust the orientation of the rotor. There are three different types of passive yaw systems, the one chosen consists of:
 - **Roller bearing:** It connects the tower and the nacelle. It allows the rotation of the nacelle around the vertical axis.
 - **Tail fin:** It is mounted on the nacelle, and it uses the force of the wind to adjust the rotor, making it face the wind.
 - **Brake:** When the necessary orientation is achieved an active yaw break arrests the nacelle. This prevents vibration and reduces the fatigue.
- **Gearbox:** The gearbox is responsible for increasing the rotational speed of the rotor blades to a level that is suitable for driving the generator. The rotor blades rotate at relative slow speed, as the generator needs to rotate at much higher speed, a gearbox is needed. The gearbox is only needed for large wind turbines, small wind turbines do not require the use of gearboxes since their rotors rotate already at a

high speed. This makes them suitable to be directly coupled to their electrical generator. ("Fundamental and Advanced Topics in Wind Power," 2012)

- **Rotors:** The best design consist of a rotor with 3 blades, because it produces significantly less noise than two blade rotors and it is more efficient than four or more blade rotors.
- **Control system:** In order to protect the rotor a control system is required. The aim of it is to prevent the rotor from spinning out of control in extreme wind conditions and to protect it from lightnings.

Now that the different parts of the wind turbine have been defined, it is time to continue the project in the annex, on which it will be explained with more detailed how the installation of the wind turbine will be done.

9.- BIBLIOGRAPHY:

10 year average wind speed for different heights | Atlas | Dutch Offshore Wind Atlas. (n.d.).

Retrieved June 17, 2024, from <https://www.dutchoffshorewindatlas.nl/atlas/image-library/image-library/wind-speed-parameter-f>

Adeyeye, K. A., Ijumba, N., & Colton, J. (2021). The Effect of the Number of Blades on the Efficiency of A Wind Turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 801(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/801/1/012020>

Austin, S., & Jerath, S. (2017). Effect of soil-foundation-structure interaction on the seismic response of wind turbines. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(3). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.05.007>

Barbu, M., Darie, G., & Patrascu, R. (2021). A technical analysis and comparison of tubular and lattice towers for wind turbines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 664(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/664/1/012044>

Borg, M., R&d, B., Collu, M., & Brennan, F. (2012). *Offshore Floating Vertical Axis Wind Turbines: Advantages, Disadvantages and Dynamics Modeling State of the Art INNO-MPP-Investigation of the novel challenges of an integrated offshore Multi-Purpose Platform View project H2Ocean View project*. <https://doi.org/10.3940/rina.mre.2012.05>

Brøndsted, P., Lilholt, H., & Lystrup, A. (2005). Composite materials for wind power turbine blades. In *Annual Review of Materials Research* (Vol. 35). <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.35.100303.110641>

de Lana, J. A., Júnior, P. A. A. M., Magalhães, C. A., Magalhães, A. L. M. A., de Andrade Junior, A. C., & de Barros Ribeiro, M. S. (2021). Behavior study of prestressed concrete wind-

- turbine tower in circular cross-section. *Engineering Structures*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111403>
- Esteban, M. D., Diez, J. J., López, J. S., & Negro, V. (2011). Why offshore wind energy? In *Renewable Energy* (Vol. 36, Issue 2). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.009>
- Externe veiligheid*. (n.d.). Retrieved April 28, 2024, from <https://www.rvo.nl/onderwerpen/windenergie-op-land/externe-veiligheid>
- Fundamental and Advanced Topics in Wind Power. (2012). In *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. <https://doi.org/10.5772/731>
- Geluidnormering windmolens*. (n.d.). Retrieved April 28, 2024, from <https://www.rvo.nl/onderwerpen/windenergie-op-land/wonen-windturbine/geluidnormering-windmolens>
- General provisions act “Wabo” - Rijkswaterstaat Environment*. (n.d.). Retrieved April 28, 2024, from <https://rwsenvironment.eu/subjects/general-provisions-0/>
- González-Longatt, F., Wall, P., & Terzija, V. (n.d.). *Wake effect in wind farm performance: Steady-state and dynamic behavior*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.053>
- Grogg, K. (n.d.). *Harvesting the Wind: The Physics of Wind Turbines*. Retrieved October 23, 2022, from <http://digitalcommons.carleton.edu/pacp/7>
- Gupta, R., Biswas, A., & Sharma, K. K. (2008). Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius–three-bladed Darrieus rotor. *Renewable Energy*, 33(9), 1974–1981. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2007.12.008>
- Islam, M., Ting, D. S. K., & Fartaj, A. (2008). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 12, Issue 4). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.023>
- Kaldellis, J. K., & Zafirakis, D. (2011). The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Renewable Energy*, 36(7), 1887–1901. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2011.01.002>
- Kleine windmolens: wat kun je ermee en welke vergunningen heb je nodig? | HIER opgewekt*. (n.d.). Retrieved February 9, 2023, from <https://www.hieropgewekt.nl/kennisdossiers/kleine-windmolens-wat-kun-je-ermee-en-welke-vergunningen-heb-je-nodig#omgevingsvergunning>
- Koulatsou, K. G., Kazakis, G., Gantes, C. J., & Lagaros, N. D. (2020). Resonance Investigation and its Effects on Weight Optimization of Tubular Steel Wind Turbine Towers. *Procedia Manufacturing*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.198>
- Mark, S. (2013). The Earliest Sailboats in Egypt and Their Influence on the Development of Trade, Seafaring in the Red Sea, and State Development. *Journal of Ancient Egyptian Interconnections*, 5(1). https://doi.org/10.2458/azu_jaei_v05i1_mark
- Modi, V. J., & Fernando, M. S. U. K. (1989). On the performance of the savonius wind turbine. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 111(1). <https://doi.org/10.1115/1.3268289>

- Particuliere windmolens - van Doleweerd LAW.* (n.d.). Retrieved February 9, 2023, from <https://www.vandoleweerdlaw.nl/particuliere-windmolens/>
- Prevailing Winds | National Geographic Society.* (n.d.). Retrieved October 16, 2022, from <https://education.nationalgeographic.org/resource/prevailing-winds>
- Radar bij windprojecten.* (n.d.). Retrieved April 28, 2024, from <https://www.rvo.nl/onderwerpen/windenergie-op-land/radar-windprojecten>
- Saad, M., Moh Saad, M. M., Asmuin, N., Tun Hussein Onn Malaysia, U., Raja, P., & Pahat, B. (2014). Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines. *International Organization of Scientific Research, 04*, 2–27. <https://doi.org/10.9790/3021-04822730>
- Schubel, P. J., & Crossley, R. J. (2012). Wind turbine blade design. In *Energies* (Vol. 5, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/en5093425>
- Slagschaduw bij windenergie op land.* (n.d.). Retrieved April 28, 2024, from <https://www.rvo.nl/onderwerpen/windenergie-op-land/slagschaduw>
- Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, H., & Sopian, K. (2014). *Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations.* <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.038>
- Wakui, T., Tanzawa, Y., Hashizume, T., & Nagao, T. (2005). Hybrid configuration of darrieus and savonius rotors for stand-alone wind turbine-generator systems. In *Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi)* (Vol. 150, Issue 4). <https://doi.org/10.1002/eej.20071>
- Wind Generator Tower Basics.* (n.d.-a). Retrieved February 6, 2023, from www.homepower.com
- Wind Generator Tower Basics.* (n.d.-b). Retrieved March 12, 2024, from www.homepower.com
- Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics - Erich Hau - Google Libros.* (n.d.-a). Retrieved October 22, 2022, from https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=KeNEAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=how+do+wind+turbines+work&ots=Bd8UFZpbk0&sig=c_X1uPcLp7vhlwb5fJ36RSYTOcw#v=onepage&q&f=false
- Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics - Erich Hau - Google Libros.* (n.d.-b). Retrieved March 4, 2024, from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=KeNEAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=wind+turbines&ots=Be2XGZj4mX&sig=xx2ENSjFdV4CBFvX8JNrYG7xrds#v=onepage&q=wind%20turbines&f=false>

10.- Technical standards

(Geluidnormering Windmolens, n.d.)

(Radar Bij Windprojecten, n.d.)

(Slagschaduw Bij Windenergie Op Land, n.d.)

(Externe Veiligheid, n.d.)

11.- Legislation

(General Provisions Act “Wabo” - Rijkswaterstaat Environment, n.d.)

12.- Personal conclusions

The installation of a wind turbine in a house in The Netherlands can be a challenging project because of different reasons. The legislation restricts the proliferation of small wind turbines, which makes the project only suitable for specific areas on which the wind turbines fulfill all the requirements needed. In addition, in order to make the installation profitable, the wind turbines must be installed in areas with high wind speeds and very few obstacles on its surroundings (in order to have the most laminar wind flow possible), and even then research shows that many of the wind turbines hardly ever pay back the initial investment.

Because of that, many people consider a more attractive option the installation of solar panels as a source of electricity. Knowing that, in the annex it will be studied if the installation of a wind turbine can be a good choice in the location selected, on which the conditions will be ideal.

Instalación de una pequeña turbina eólica en una casa de los Países Bajos

Contenido

Instalación de una pequeña turbina eólica en una casa de los Países Bajos	1
Memoria	1
1.- Introducción	1
2.- Viento y aerogeneradores.....	3
3.- Historia del uso del viento	6
4.- La energía eólica hoy.....	7
4.1- HAWTs frente a VAWTs	8
4.1.1.-VAWTs.....	13
4.1.2.- HAWTs.....	19
5.- DISEÑO DEL ROTOR.....	23
5.1.- Materiales	24
5.2.- Relación velocidad punta	24
5.3.- Forma y cantidad del plano de las aspas	24
5.4.- Aerodinámica	26
5.5.- Condiciones fuera de diseño y regulación de potencia	26
5.6.- Diseño de palas inteligentes	27
6.- Offshore vs onshore	28
7.- Regulación de la instalación de pequeños aerogeneradores en viviendas de los Países Bajos.....	30
8.- Selección del aerogenerador	34
9.- BIBLIOGRAFÍA:.....	37
10.- Normas técnicas.....	40
11.- Legislación	40
12.- Conclusiones personales	40

Memoria

1.- Introducción

Con el objetivo de difundir el uso de las energías renovables, este proyecto evaluará la disponibilidad de la instalación de una fuente de energía verde en una casa particular. Debido al tamaño y a razones económicas, las fuentes de energía verde más adecuadas para una casa son la energía solar y la eólica, pero antes de profundizar en por qué se eligió la energía eólica, permítanme presentarles primero por qué elegí los Países Bajos como lugar de instalación de la fuente de energía verde.

Mi historia con Países Bajos empezó hace 2 años, cuando mi novia holandesa me invitó por primera vez a visitar el país. La primera ciudad que visité fue Wijk aan Zee, que en español significa vecindario junto al mar, es un pueblo pequeño al que los Neerlandeses suelen ir en verano para disfrutar del sol y la playa. En invierno, la ciudad suele estar vacía debido al fuerte viento y al tiempo frío y lluvioso.

Una de las primeras cosas que noté allí, fueron los fuertes vientos que soplan desde la costa hacia el mar durante el día. Para extraer energía del viento, hay turbinas eólicas situadas a lo largo de toda la playa, que, debido a su gran tamaño, son fácilmente divisibles por cualquiera que visite el pueblo.

Tras mi primera visita a los Países Bajos, mi interés por el país creció, lo que me hizo empezar a aprender su idioma y a sumergirme más en su historia y su cultura. Me considero una persona afortunada porque gracias a mis amigos neerlandeses, mi novia y su familia, tuve la oportunidad de sumergirme de verdad en la cultura y la historia neerlandesa, lo que me permitió aprender cosas que no podría haber aprendido por mí mismo.

Debido a mi profundo interés por el país, decidí hacer mis prácticas de empresa en Ámsterdam. Como viví en los Países Bajos durante 6 meses, tuve la oportunidad de visitar muchos lugares del país, uno de los más turísticos es Zaanse Schans, que es un museo abierto en el que se pueden visitar molinos de viento históricos. En el siglo XVII era una de las zonas más industrializadas del mundo, en la que 900 molinos de viento trabajaban sin parar día y noche procesando todo tipo de materias primas procedentes del comercio y las colonias holandesas.

El uso extendido de los molinos de viento en el siglo de oro holandés acabó convirtiéndolos en uno de los símbolos de la nación.

Hay numerosas actividades que aceleran el cambio climático, una de las más influyentes es la producción de energía. Hoy en día, la mayor parte de la electricidad se sigue generando por la quema de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural. Para combatir el cambio climático y reducir sus efectos, la atención se centra ahora en las energías renovables, como la solar, la eólica y la hidroeléctrica. Las energías renovables ayudan a reducir el cambio climático por su carácter sostenible, su disponibilidad económica y sus 0 emisiones de gases de efecto invernadero.

El cambio climático está causando efectos devastadores en el planeta Tierra, como:

- **El aumento de las temperaturas:** Lo que aumenta el nivel del mar al derretirse los polos de hielo, amenazando islas y comunidades costeras. Además, también contribuye a la creación de incendios forestales y a su propagación.
- **Tormentas más severas:** Debido a las temperaturas más cálidas, se evapora más humedad, lo que provoca precipitaciones extremas e inundaciones. Como consecuencia, muchas viviendas quedan destruidas, lo que provoca muertes y pérdidas económicas.
- **Aumento de la sequía:** El calentamiento global agrava la escasez de agua en zonas ya secas, afectando a los cultivos, los ecosistemas y expandiendo los desiertos.
- **Pérdida de especies:** El cambio climático acelerado provoca una pérdida de especies 1000 veces mayor que en cualquier otro momento de la historia humana registrada.
- **Riesgos para la salud:** Cada año, factores medioambientales como la contaminación atmosférica causan la muerte de 13 millones de personas.
- **Menor producción de alimentos:** La pesca, los cultivos y la ganadería se vuelven menos productivos, lo que a menudo provoca su destrucción.

Al comparar la energía solar con la eólica en los Países Bajos, me decidí por la eólica por las siguientes razones:

- **Dependencia diurna:** Los paneles solares sólo funcionan durante el día, lo que limita su producción de energía. En cambio, si las condiciones de viento son buenas, los aerogeneradores pueden funcionar durante todo el día.
- **Condiciones meteorológicas:** Los paneles solares no tienen un buen rendimiento en condiciones de lluvia y nubosidad, en las que sólo producen el 10-25% de su potencia normal. Como el tiempo en los Países Bajos es muy lluvioso, nublado y ventoso, se consideró mejor estudiar una turbina eólica.
- **Eficacia:** La energía eólica es una fuente de energía más eficiente que la solar. Un gran aerogenerador puede producir tanta electricidad por KWh como 48.000 paneles solares.
- **Constancia:** Aunque la energía eólica depende en gran medida de las condiciones meteorológicas, las estaciones ventosas tienden a ser estables a lo largo del tiempo. Lo que permite crear previsiones precisas de la producción de electricidad.

Una vez determinado qué energía verde alimentará la casa, permítanme presentarles el objetivo del trabajo. Este proyecto pretende determinar la viabilidad de la instalación de un aerogenerador en una vivienda en Países Bajos. Se realizará un estudio en profundidad sobre los diferentes tipos de aerogeneradores, las leyes que regulan su instalación, las fuerzas que tienen que soportar, el circuito eléctrico desde el aerogenerador hasta la red y la viabilidad económica.

Para terminar, después de haber revisado todos los factores que afectan a la instalación y el rendimiento del aerogenerador, se evaluará si es una buena idea instalar un aerogenerador para alimentar una casa en los Países Bajos.

2.- Viento y aerogeneradores

El planeta Tierra está lleno de recursos naturales, que han sido utilizados por el ser humano desde el principio de los tiempos. Uno de los recursos naturales que primero se utilizó es la madera, hace miles de años los antiguos homo sapiens empezaron a utilizarla para calentarse, cocinar y crear herramientas. Con el paso de los años y el desarrollo de nuevas tecnologías, los humanos aprendieron a aprovechar la energía cinética del viento y transformarla en diferentes tipos de energía. Hoy en día se utiliza principalmente para producir electricidad, pero también puede servir para navegar, moler trigo y bombear agua.

Antes de profundizar en el uso histórico del viento por el ser humano, permítanme presentarles el concepto de viento y cómo se origina. El viento es aire en movimiento causado por la variación de la presión atmosférica. Esta diferencia de presión está causada por la variación de temperaturas en el aire. Debido a que el sol incide sobre la tierra en diferentes ángulos, los océanos, las montañas y otras características, algunos lugares son más cálidos que otros, lo que crea una diferencia de presión que produce el viento.

El aire siempre fluye de las zonas de mayor presión a las de menor. Un sistema de alta presión tiene una presión más alta en su centro que en las zonas que lo rodean, en las que los vientos soplan alejándose de la alta presión. En un sistema de baja presión, el centro tiene una presión más baja que sus alrededores y el viento sopla hacia la baja presión.

En la Tierra hay vientos que soplan predominantemente de una dirección a otra. El comportamiento de la dirección de estos vientos está muy influenciado por el efecto Coriolis, provocado por la rotación de la Tierra. Las direcciones predominantes del viento son importantes a la hora de colocar aerogeneradores porque se buscará situarlos en las zonas con menos obstáculos de las direcciones predominantes del viento. (*Vientos dominantes* / *National Geographic Society*, s.f.)

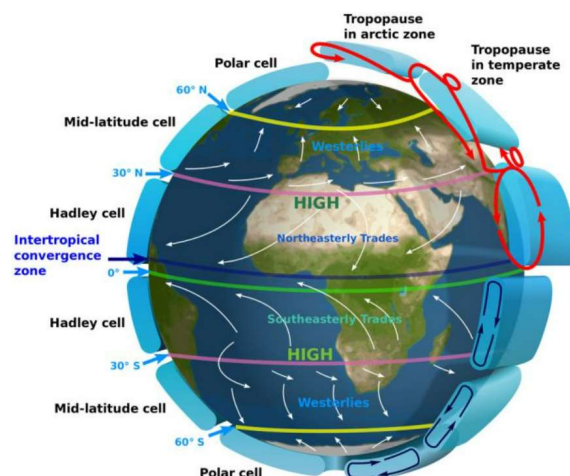


Fig. 1. Mapa de vientos dominantes (*Vientos dominantes* / *National Geographic Society*, s.f.)

El método más común para extraer energía del viento es el uso de molinos. Los molinos de viento o (turbinas eólicas si se utilizan para producir electricidad) son como ventiladores pero

más grandes y mucho más complicados. Las turbinas modernas suelen tener tres palas y casi siempre un eje horizontal y se utilizan principalmente para transformar la energía mecánica del viento en energía eléctrica.

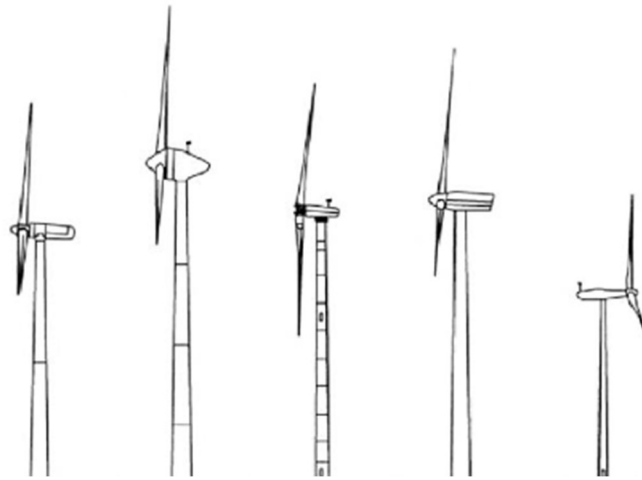


Fig. 2. Aerogeneradores (*Aerogeneradores: Fundamentos, Tecnologías, Aplicación, Economía* - Erich Hau - Google Libros, n.d.-a)

Una de las partes más importantes de una turbina eólica es su torre. Para evitar la fricción del aire con el suelo, las torres se construyen y diseñan lo más altas posible. Debido a la fricción del aire, éste se mueve más despacio en los niveles inferiores cercanos al suelo que en los niveles superiores. La velocidad del aire aumenta con la altura según esta ecuación:

$$U \propto \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Donde U es la velocidad, z es la altura y z_0 es la rugosidad. Debido a esta expresión, muchas turbinas de aire se colocan en montañas por las limitaciones mecánicas y económicas de la altura de las torres. También se pueden encontrar vientos de alta velocidad en grandes masas de agua, ya que como el agua tiene una capacidad calorífica mucho mayor que la tierra, tarda más tiempo en aumentar o disminuir su temperatura. Durante el día, la tierra está más caliente que el mar, lo que hace que el aire fluya de la tierra al mar, mientras que durante la noche el viento invierte su flujo, porque el mar está más caliente que la tierra. (Grogg, s.f.)

Para entender cómo los aerogeneradores extraen energía del aire, definamos primero la potencia de una masa de aire en movimiento, que viene dada por:

$$P = \frac{1}{2} A \rho U^3$$

Donde ρ es la densidad del aire, U la velocidad del aire y A el área que atraviesa el aire.

Cuando el viento pasa por la turbina, pierde velocidad.

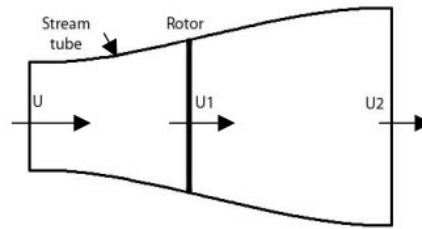


Fig. 3 Tubo de corriente alrededor de un rotor. (Grogg, s.f.)

La corriente en el tubo situado detrás de la turbina aumenta de volumen porque la masa de aire se mueve más despacio. El rotor capta una parte de la energía cinética del viento, y como el momento lineal debe conservarse, una fuerza debe actuar sobre el viento para hacerlo frenar. La primera ley de Newton establece, que la fuerza que actúa sobre el viento para hacerlo frenar es igual y opuesta al empuje T , la fuerza del viento en el rotor. Esta fuerza proviene del cambio de presión que se produce cuando el viento pasa a través del rotor. (Grogg, s.f.)

El **impulso** viene dado por:

$$T = \frac{1}{2} A \rho (U^2 - U_2^2)$$

Mientras que la **potencia** extraída del aire es:

$$P = \frac{1}{2} A \rho U^3 a (1 - a)^2$$

Donde **a** es la inducción axial definida por:

$$a = (U - U_1)$$

Todas las ecuaciones anteriores dan valores teóricos, no se consideran las pérdidas de potencia debidas a los álabes, la fricción, la temperatura y otros factores.

Una vez que el rotor está en movimiento, puede conectarse a un generador, que transformará la energía mecánica del rotor en electricidad. Para ello se utilizan electroimanes con núcleo de hierro. Los imanes permanentes no se utilizan en las grandes turbinas porque su coste suele ser prohibitivo.

La principal preocupación a la hora de generar electricidad es que los generadores proporcionen electricidad compatible con la red eléctrica del lugar en cuestión, que en Europa funciona a 50 Hz. Cuando el rotor gira, induce corrientes alternas en las bobinas, lo que genera electricidad. Para la mayoría de las turbinas, la conexión a la red es directa desde el generador, después de un transformador para ajustar la tensión a la de la red. Las turbinas eólicas de velocidad variable requieren una conexión indirecta porque la corriente generada es de frecuencia variable. (Grogg, s.f.)

3.- Historia del uso del viento

El uso del viento no empezó con los modernos aerogeneradores, el ser humano lleva miles de años utilizando la energía eólica. Los arqueólogos afirman que los antiguos egipcios utilizaban veleros para comerciar en el río Nilo al menos tres mil años antes de Cristo (Mark, 2013). Unos cientos de años después, hacia el año 200 a.C. se inventaron en Persia los molinos de viento de eje vertical, a los que seguirían los de eje horizontal encontrados en los Países Bajos y en el Mediterráneo, que se utilizaban principalmente para moler trigo.

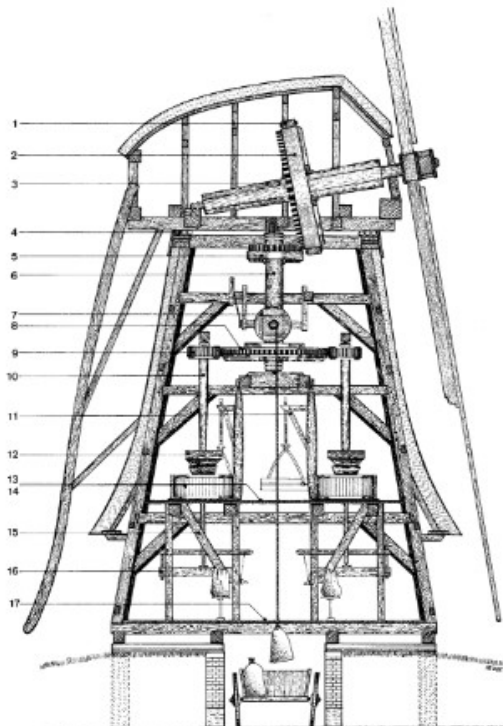


Fig. 4 Molino de viento holandés (*Aerogeneradores: Fundamentos, tecnologías, aplicación, economía - Erich Hau - Google Libros, n.d.-a*)

El perfeccionamiento de estas máquinas tuvo lugar en EE.UU. durante el siglo 19th, donde la primera gran máquina eólica para generar electricidad se instaló en Cleveland en 1888, mientras que a principios del siglo 20th, los molinos de viento de 25 kW se extendieron por toda Dinamarca (Kaldellis & Zafirakis, 2011).

Al cabo de unas décadas, nuevas investigaciones sobre las hélices de los aviones demostraron que era posible construir molinos de viento a mayor escala, tras lo cual empezaron a desarrollarse en Europa y Estados Unidos. Uno de los hitos más importantes de la energía eólica tuvo lugar tras la crisis del petróleo de 1973, a raíz de la cual el mercado de los molinos de viento en EE.UU. evolucionó de doméstico y agrícola (1-25 kW) a parques eólicos interconectados (50-600 kW). Lo que llevó a un aumento de los parques eólicos en EE.UU. durante los años 70, mientras que en el norte de Europa esta revolución de los molinos de viento tuvo lugar durante los años 80 y 90, donde se creó un mercado pequeño pero estable.

Después de los años 90, la mayor parte de la actividad del mercado se trasladó a Europa, convirtiéndola en el centro mundial de la energía eólica (Kaldellis & Zafirakis, 2011).

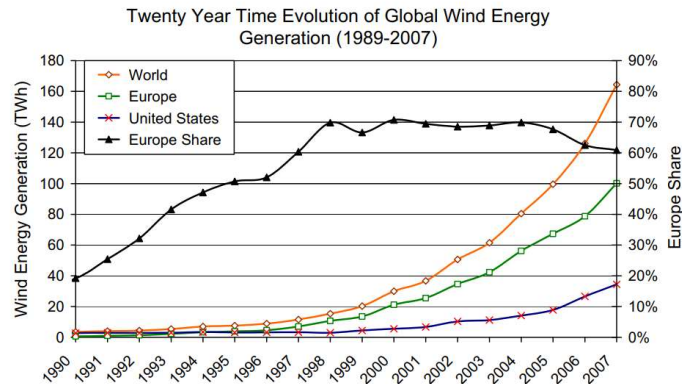


Fig. 5. Evolución temporal de la capacidad eólica mundial y europea y de la generación de energía eólica (Kaldellis & Zafirakis, 2011)

En la actualidad, la energía eólica es una de las energías renovables menos caras y cada vez es más asequible a medida que mejora la tecnología. (Grogg, s.f.)

4.- La energía eólica hoy

Impulsada por el continuo progreso económico y el desarrollo de las tecnologías electrónicas, la demanda mundial de energía va en aumento. Aunque muchos países como China, India o Estados Unidos siguen utilizando combustibles fósiles como principal fuente de energía, otros países prefieren invertir en energías renovables, que han crecido considerablemente desde la última década. Hay muchas razones por las que muchos países están disminuyendo el uso de combustibles fósiles, las ventajas que aportan las energías renovables son:

- **Limpias, seguras y sostenibles:** Las energías renovables no se agotan nunca, no emiten dióxido de carbono y son seguras.
- **Independencia energética:** Muchos países no disponen de recursos naturales como combustibles fósiles o uranio, lo que les hace depender del precio de mercado de estos minerales. Una solución a este problema es el uso de energías renovables, que permiten a los países disponer de una fuente de energía independiente.
- **Proporciona empleo a las comunidades locales:** La industria renovable requiere mucha mano de obra, lo que significa que se necesitan muchos puestos de trabajo para garantizar su correcto funcionamiento.
- **Costes estables:** Los recursos renovables no dependen de las fluctuaciones del mercado, lo que hace que el coste de la energía producida por las energías verdes sea estable.
- **Se amortizan solos:** Tras años de uso, se recuperará la inversión inicial.

En consecuencia, es necesario desarrollar alternativas energéticas renovables y sostenibles como la eólica, la solar y la hidroeléctrica. Entre estas alternativas, la energía eólica destaca por las siguientes razones:

1. La disponibilidad del viento
2. Producción de energía constante a medio y largo plazo
3. Buena eficiencia de conversión
4. No requiere mucho espacio para su instalación
5. Es una excelente fuente de energía para zonas remotas
6. Bajos costes de instalación y funcionamiento
7. Mantenimiento sencillo y ocasional
8. Excelente circularidad en la fase de fin de vida útil

En 2018, la energía eólica proporcionó alrededor del 5% del consumo total de energía del mundo. Ese mismo año se produjeron 690,8 GW en todo el mundo, de los cuales 259 GW se produjeron en Europa, 123,85 GW en China, 98,94 GW en EE.UU. y 5,7GW en África. Se prevé que en 2030 y 2050 la energía suministrada por el viento será de un 20% y un 35% respectivamente.

Históricamente, las turbinas eólicas terrestres fueron las primeras en instalarse, debido a sus menores costes de instalación y a la complejidad de desarrollar nuevos cimientos para sostener las turbinas eólicas junto al mar. Pero pronto, ingenieros y científicos se dieron cuenta de que, en las regiones costeras, el viento que sopla del mar a tierra suele carecer de consistencia y, con la intención de ampliar la capacidad de energía eólica, sobre todo en zonas donde la energía eólica terrestre era limitada, se desarrolló la energía eólica marina.

De ahí el creciente interés por la energía eólica marina, en la que los países europeos son pioneros. Las brisas marinas suelen ser más fuertes y constantes en la superficie del océano que en tierra. Pero antes de sumergirnos en cuál es el mejor lugar para colocar los molinos de viento, definamos primero los distintos tipos de molinos.

4.1- HAWTs frente a VAWTs

En el ámbito de la energía eólica, existen dos núcleos principales de aerogeneradores, los aerogeneradores de eje horizontal o HAWT, en los que el rotor gira alrededor del eje horizontal, y los aerogeneradores de eje vertical o VAWT, en los que su rotor gira alrededor del eje vertical.

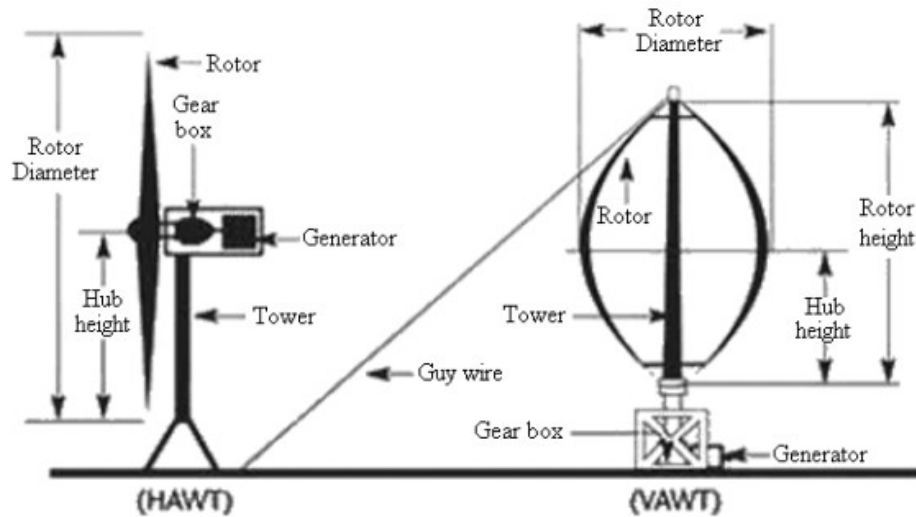


Fig. 6 Dos tipos principales de turbinas, de eje horizontal (HAWT) y de eje vertical (VAWT). (Grogg, s.f.)

En los HAWT, el generador eléctrico se encuentra en la parte superior de la torre. En la mayoría de los sistemas de conversión de energía eólica o WECS se utiliza una caja de engranajes para obtener la velocidad adecuada para accionar el generador eléctrico, esto se debe a la rotación más lenta de las palas del aerogenerador. Además, como el viento no siempre es perpendicular a las palas de la turbina, se necesita un sistema para mover la parte superior del aerogenerador, de modo que la eficiencia de la turbina no se vea afectada por la dirección del viento.

La configuración de las HAWT produce la máxima cantidad de energía en comparación con las VAWT debido a la altura de la base de su torre. Como ya se ha explicado, el aire se mueve más despacio cerca del suelo debido a la fricción con éste. Se observa que cuando la altura de la torre del aerogenerador aumenta 10 metros, la velocidad del viento aumenta un 20%, lo que puede traducirse en un aumento de la potencia generada del 34%.

Una de las ventajas de los VAWT es que el viento es perpendicular a las palas todo el tiempo. Por lo tanto, no se requiere ningún controlador adicional para mover el rotor en comparación con el tipo HAWTs. Además, las VAWT producen menos ruido debido a su menor velocidad angular. Debido a su pequeño tamaño, las VAWT pueden instalarse en muchos lugares, como carreteras y tejados. *Topologías de sistemas de conversión de energía eólica y convertidores: Revisión comparativa* (2019) *Energy Procedia*.

Aunque los VAWT tienen muchas ventajas, los HAWT han sido el principal foco de atención de la energía eólica en las últimas décadas, tienen mayor eficiencia y su estado tecnológico es más maduro que el de los VAWT, con un mayor número de proyectos desarrollados con éxito y la formación de una cadena de suministro especializada. Las VAWT se investigaron a finales de los años 20, pero se perdió el interés por ellas debido a los problemas de fatiga y a su baja eficiencia. (Borg et al., 2012)

Cuando se habla de la eficiencia de los aerogeneradores, hay que mencionar el límite de Betz. Este límite establece que la máxima eficiencia teórica de cualquier aerogenerador es del 59,3%, esto descubierto por Betz, que fue un físico alemán que creó una teoría sobre la máxima

energía posible a derivar de un aerogenerador. Ese valor teórico proviene de los siguientes cálculos:

La energía cinética de una masa de aire que se mueve a una velocidad v puede expresarse como

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{Nm})$$

Considerando que el aire atraviesa una sección transversal A , el volumen que circula es:

$$\dot{V} = vA \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

El caudal másico con la densidad del aire ρ es

$$\dot{m} = \rho vA \quad (\text{kg/s})$$

Y como se ha indicado antes la potencia de la masa en movimiento es:

$$P = \frac{1}{2}A\rho v^3 \quad (\text{W})$$

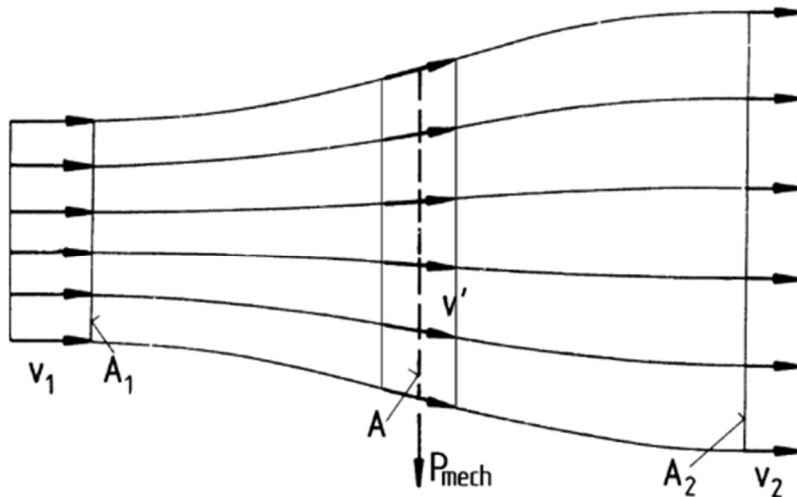


Fig. 7 Condiciones de flujo debidas a la extracción de energía mecánica de una corriente de aire libre (Aerogeneradores: Fundamentos, tecnologías, aplicación, economía - Erich Hau - Google Libros, n.d.-b)

Como la energía mecánica sólo puede extraerse a costa de la energía cinética contenida en la corriente de viento, eso significa que la velocidad del viento detrás del convertidor debe disminuir. Una velocidad reducida significa un ensanchamiento de la sección transversal (ecuación de Bernoulli). Entonces, la energía mecánica que puede extraerse de la corriente de aire es:

$$P = \frac{1}{2}\rho(A_1v_1^3 - A_2v_2^3) \quad (\text{W})$$

Mantener el flujo de masa significa:

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 \quad (\text{Kg/s})$$

Así:

$$P = \frac{1}{2} \dot{m}(v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{W})$$

La ley de conservación del momento establece, que la fuerza que el aire ejerce sobre el convertidor es:

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) \quad (\text{N})$$

Según la ley 3rd de Newton, esta fuerza debe ser contrarrestada por una fuerza igual ejercida por el convertidor. El empuje empuja la masa de aire a la velocidad v' . La potencia necesaria para ello es

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (\text{W})$$

Después de operar se obtiene:

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 - v_2) \quad (\text{m/s})$$

Y el flujo de masa se convierte:

$$\dot{m} = \rho A v' \quad (\text{Kg/s})$$

Y la potencia mecánica de salida del convertidor se puede expresar como:

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2) \quad (\text{W})$$

Es la potencia del aire que circula por la misma zona sin que se le extraiga energía mecánica:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho v_1^3 A \quad (\text{W})$$

La relación entre la potencia mecánica extraída y la corriente de aire no perturbada se denomina "coeficiente de potencia" C_p :

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} [1 - (v_2/v_1)^2] [1 + (v_2/v_1)]$$

El coeficiente de potencia depende únicamente de la relación entre las velocidades del aire:

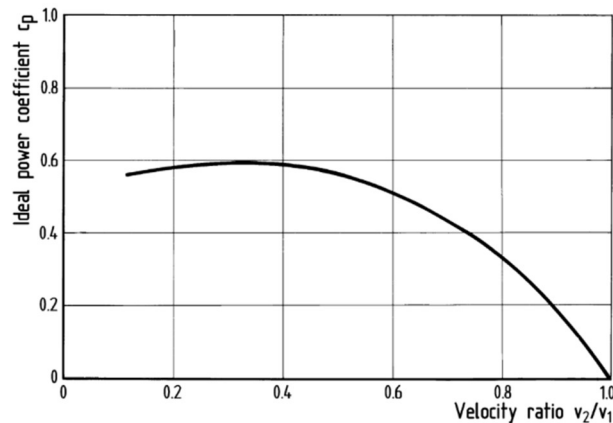


Fig. 8 Coeficiente de potencia frente a la relación de velocidad del flujo (Aerogeneradores: Fundamentos, tecnologías, aplicación, economía - Erich Hau - Google Libros, n.d.-b)

Se observa que el coeficiente de potencia alcanza un máximo de 0,593 para $v_2/v_1 = 1/3$. Y como Betz fue el primero en deducir este importante valor, se le llamó "Factor Betz".

Las HAWT son intrínsecamente más eficientes que las VAWT, con eficiencias de hasta el 50% frente al 40% de las VAWT. La diferencia de eficiencia se debe a dos razones principales:

- El paso variable de las palas de las HAWT, que permite a sus álabes ajustar óptimamente su ángulo para alcanzar la máxima cantidad de energía.
- El movimiento perpendicular de las palas de la turbina con el viento

Cuando hablamos de fatiga, las HAWT tienen problemas de fatiga gravitacional, mientras que las VAWT producen un par que varía cíclicamente y que puede tener efectos negativos en los sistemas de transmisión y control. Esto produce fatiga de alta frecuencia en las VAWT de pequeña escala, las VAWT más grandes no tendrían ese problema debido a su menor velocidad de rotación. Hoy en día, con los avances en la tecnología de materiales, la fatiga se convierte en un problema menos importante que puede remediarse más fácilmente.

Las diferencias entre las HAWT y las VAWT también se aprecian en los parques eólicos. Para entender por qué, primero hay que explicar un nuevo concepto: el efecto estela. El efecto estela es la estela que deja cada turbina donde se reducen las velocidades del viento. Tiene dos efectos principales que son, la reducción de la velocidad del viento (lo que reduce la producción de energía del parque eólico) y el aumento de la turbulencia del viento, aumentando potencialmente la carga mecánica dinámica en las turbinas situadas a sotavento. (González-Longatt et al., s.f.)

En los parques eólicos, los HAWT suelen colocarse a una distancia de diez veces su diámetro entre sí, esto es debido al efecto estela, mientras que las estelas de los VAWT se disipan mucho más rápido, lo que permite agruparlos más cerca.

Otra diferencia entre las HAWT y las VAWT aparece cuando las turbinas están destinadas a funcionar en alta mar. En una HAWT, el rotor se encuentra en la parte superior de la torre, lo que induce grandes momentos y movimientos de flexión en la torre y requiere estructuras más grandes y resistentes. Por otro lado, los VAWT suelen tener el sistema de transmisión y

generación en la parte inferior, lo que requiere estructuras de soporte más pequeñas, lo que los hace más adecuados para fines navales. (Borg et al., 2012)

La mayor parte de la construcción de aerogeneradores flotantes puede hacerse en el muelle en lugar de in situ, lo que sirve tanto para los HAWT como para los VAWT, pero la instalación de los HAWT tiene unos costes de capital más elevados debido a las grúas más grandes necesarias para montar la maquinaria y las palas. Esto también es aplicable a las turbinas de soporte fijo.

En cuanto a los costes de mantenimiento, los aerogeneradores de eje horizontal suelen tener costes más elevados, ya que la maquinaria se encuentra en la parte superior de la torre. Esto requiere un especialista que pueda subir a lo alto de la torre y grúas especiales para cambiar los componentes principales. Un efecto positivo de ambas configuraciones es que, al aumentar el tamaño de las turbinas, los costes no aumentan mucho.

Antes de llegar a una conclusión sobre qué tipo de aerogeneradores son mejores, es interesante definir primero los tipos de VAWT y HAWT.

4.1.1.-VAWTs

Como se explicó al principio de la memoria, los molinos de viento de eje vertical fueron los primeros que se inventaron, lo que puede resultar sorprendente para mucha gente, teniendo en cuenta la forma compleja de los VAWT modernos en comparación con la forma simple de los HAWT. Tras la caída de Persia, los aerogeneradores de eje vertical dejaron de ser visibles. El desarrollo técnico de los molinos de viento se produjo principalmente en Europa durante la Edad Media y se centró en los aerogeneradores de eje horizontal. Después, a principios del siglo 20th se inventaron los primeros modelos de VAWT para producir energía, y fue en los años 70 cuando empezaron a comercializarse.

Existen dos tipos principales de turbinas VAWT: Savonius y Darrieus. (Saad et al., 2014)

El rotor Savonius se forma cortando un cilindro en mitades a lo largo del plano central y desplazando a continuación dos superficies semicilíndricas a lo largo del plano de corte de modo que se asemejen a la letra "S".

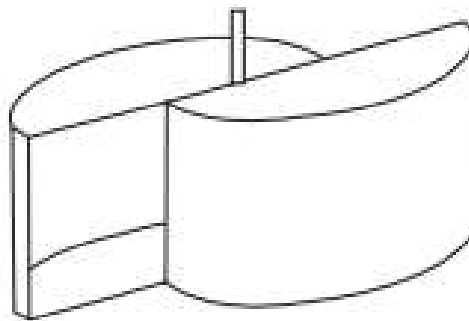


Fig. 9. Rotor Savonius (Gupta et al., 2008)

Los rotores Savonius presentan las siguientes características:

- Suelen ser baratos y sencillos
- Acepta viento de cualquier dirección, sin necesidad de reorientación
- Alto par de arranque
- Baja velocidad de funcionamiento
- Baja eficiencia, lo que las hace menos adecuadas para generar electricidad.
- Bajo nivel de ruido
- Varias opciones de configuración del rotor

Las ventajas que presenta el rotor Savonius pueden compensar su bajo rendimiento, lo que lo convierte en una fuente económica para satisfacer las necesidades energéticas a pequeña escala, especialmente en las zonas rurales de los países en desarrollo.

Existen muchas configuraciones diferentes para los rotores Savonius, que, como era de esperar, afectan al rendimiento del aerogenerador. Se han estudiado muchos parámetros, como las placas extremas, la relación de aspecto, el espaciado y solapamiento de los cangilones, el número de cangilones, las etapas del rotor, las formas de los cangilones y el rotor, los estatores, el eje y otros accesorios, el número de Reynolds y la intensidad de la turbulencia.

Y para cada uno de los parámetros se han obtenido resultados diferentes sobre el rendimiento de la turbina Savonius. Esto se debe principalmente a la naturaleza altamente dependiente del tiempo y compleja del flujo de aire alrededor del rotor.

Como no existe un método analítico para la optimización de las turbinas Savonius capaz de predecir el rendimiento con buena precisión, es necesario realizar trabajos de investigación experimentales y numéricos con este fin. (Modi & Fernando, 1989)

La atención se centra ahora en el rotor Darrieus, inventado en 1931 por el ingeniero francés George Jean Mary Darrieus. Su patente incluía dos modelos: el "Eggbeater (o de palas curvas)" y el "Straight bladed" (o de palas rectas).

Las turbinas constan de dos o más palas en forma de aerodeslizador que se fijan a un eje vertical. Este rotor no necesita orientarse con la dirección del viento. Pero su mantenimiento es complicado y caro debido a su elaborado diseño.

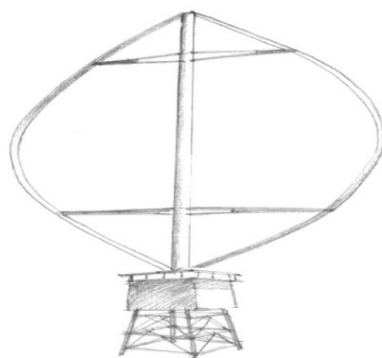


Fig. 10. VAWT Darrieus de álabes curvos (Islam et al., 2008)

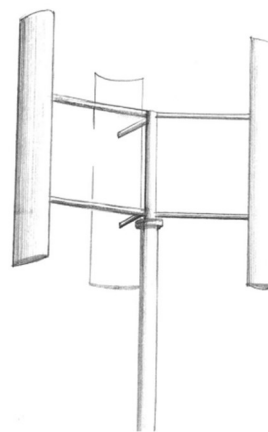


Fig. 11. Darrieus de álabes rectos (Islam et al., 2008)

En el mercado de turbinas a pequeña escala, la VAWT Darrieus de palas rectas es más atractiva debido a su sencillo diseño de palas. En la actualidad, el desarrollo de VAWT de palas rectas a gran escala se limita únicamente a la fase de investigación, aunque la turbina eólica Darrieus de palas rectas de gran tamaño llegó al mercado comercial en el pasado, sólo para desaparecer más tarde. (Islam et al., 2008)

Tras su invención en 1931, se desarrollaron muchos modelos diferentes de turbinas Darrieus, como puede verse en la figura 9:

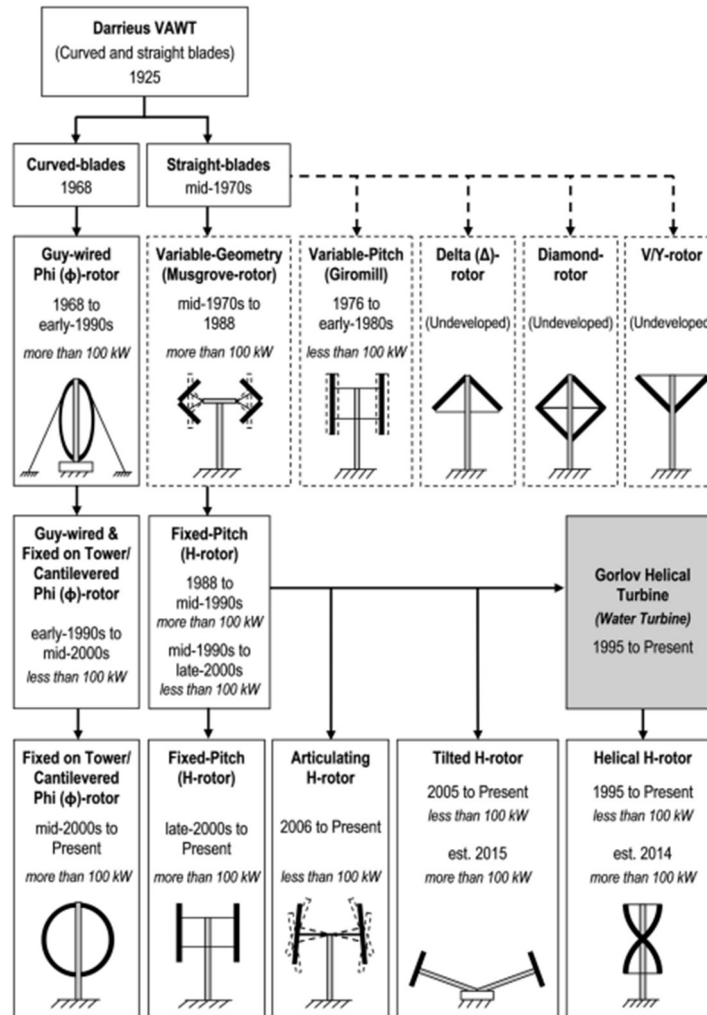


Fig. 12. Cronología del desarrollo de Darrieus(Tjiu et al., 2014)

En la actualidad, el desarrollo muestra que el rotor cableado (guy-wired rotor) está perdiendo popularidad debido a muchas desventajas, como el aumento de la carga del eje debido a la tensión del cable, las vibraciones y la gran superficie necesaria para montar los cables. De todos los modelos anteriores, uno de los más notables es el rotor helicoidal en H.

El rotor helicoidal en H se creó retorciendo las palas de un rotor en H para darle forma helicoidal. Esta nueva forma mejora el rendimiento del rotor en H al distribuir uniformemente el perfil de las palas a lo largo del perímetro del rotor, lo que hace que la superficie barrida y las

secciones de las palas sean constantes al viento en todos los momentos de rotación de la turbina. Por lo tanto, la fluctuación del par del rotor se reduce significativamente. Gracias a ello, se consigue una mejor producción de energía, menos ruido y un menor estrés cíclico en el tren motriz. Actualmente, el diseño helicoidal está ganando popularidad no sólo por su mejor rendimiento, sino también por su diseño moderno y elegante.



Fig. 13. Helicoidal H-rotor (Tjiu et al., 2014)

Con el fin de saber qué rotores tenían un mejor rendimiento, se realizó una comparación entre el rotor helicoidal H, el rotor phi y el rotor H. Todos los rotores tenían sus 3 palas espaciadas 120 grados, su geometría se puede ver en la Fig. 10. Todos los rotores tenían sus 3 palas espaciadas 120 grados, su geometría se puede ver en la Fig 10:

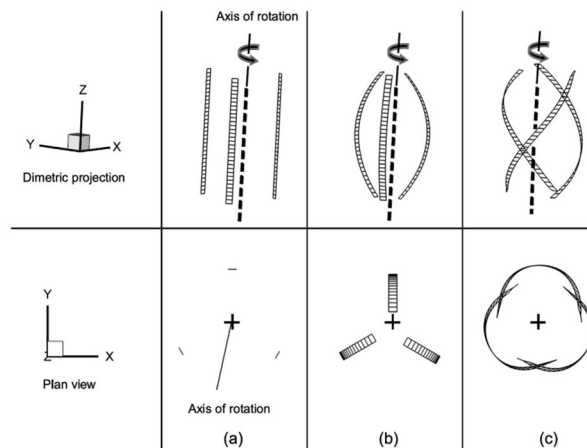


Fig. 14. Geometría de los rotores modelados a) rotor H b) rotor phi c) rotor H helicoidal. (Tjiu et al., 2014)

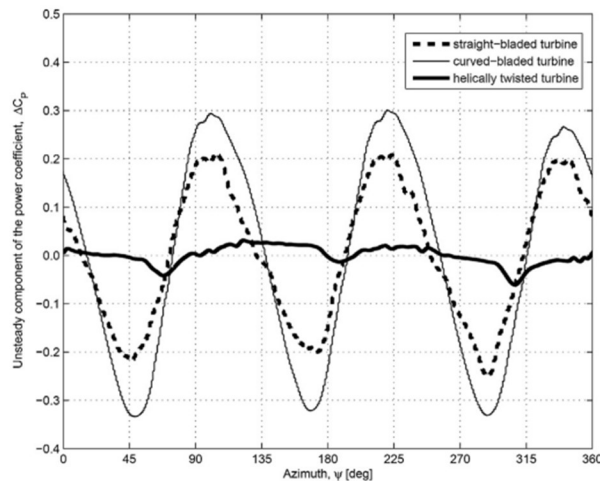


Fig. 15. Variaciones del coeficiente de potencia (Tjiu et al., 2014)

En la figura 15, se puede observar que la fluctuación del par varía 3 veces en cada rotación. El rotor phi tiene la mayor fluctuación seguido del rotor H. Para terminar, hay que añadir que aunque los álabes helicoidales tienen muchas ventajas, su fabricación es más cara.

Las dos características principales de los rotores Darrieus es que, aunque tienen un par de arranque bajo, pueden proporcionar un buen rendimiento a alta velocidad de rotación. Por eso, los rotores Darrieus nunca se utilizan solos, sino que suelen combinarse con otro rotor eólico, como el Savonius, que puede proporcionar un par de arranque elevado. (Gupta et al., 2008)

La Universidad Waseda de Japón estudió dos configuraciones diferentes para la combinación de un rotor Darrieus de palas curvadas y un rotor Savonius, el Tipo A y el Tipo B.

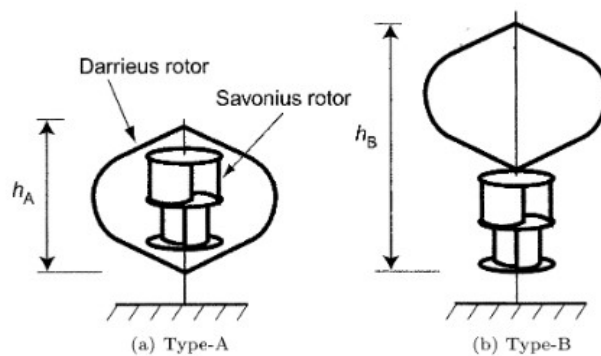


Fig. 16. Configuraciones híbridas de VAWT. (Wakui et al., 2005)

En el Tipo A, el rotor Savonius se instala dentro del espacio cerrado de rotación del rotor Darrieus, destacando su compacidad como sistema de energía autónomo, mientras que en el Tipo B, los dos rotores se conectan fuera del espacio cerrado de rotación para evitar la interferencia del flujo de aire entre los dos rotores, dando prioridad a una mayor producción del aerogenerador.

La tabla 1 muestra las geometrías de ambas configuraciones. Cuando se utilizan las mismas especificaciones de rotor, el Tipo B proporciona 1,5 veces la potencia nominal que el Tipo A.

Item	Type A	Type B
Nominal power output kW	0.3	0.45
Nominal wind speed m/s	10	10
Darrieus rotor	Troposkien NACA0015 2 0.1 2.0 1.6	
Blade shape		
Airfoil section		
Number of blade		
Chord length m		
Rotor diameter m		
Rotor height m		
Savonius rotor	0.6 0.6	
Rotor diameter m		
Rotor height m		
Total height m	1.6	2.8
Swept area m ²	2.34	3.06
Rotational inertia kgm ²	2.80	3.05
Static friction torque Nm	0.505	0.606

Tabla 1 Especificaciones de las turbinas híbridas(Wakui et al., 2005)

Para estudiar las características de salida, se utilizaron parámetros adimensionales, definidos por las ecuaciones:

$$X \equiv \frac{2\pi nR}{60V}$$

$$C_t \equiv \frac{\tau}{0.5\rho ARV^2}$$

$$C_p \equiv \frac{P}{0.5\rho AV^3}$$

Donde A: área barrida [m²]; CP: coeficiente de potencia; CT: coeficiente de par; n: velocidad de giro [rpm]; P: potencia de salida [W]; R: radio máximo de giro [m]; V: velocidad del viento de entrada [m/s]; X: relación de velocidad de punta; ρ: densidad del aire [kg/m³]; τ: par [Nm].

Durante la evaluación de las características de salida, se observó que en el Tipo A, el coeficiente de potencia máxima es inferior al de la turbina Darrieus sola ($C_{pmax_D} = 0,30$). Esto se debe a que los rotores Darrieus y Savonius interfieren entre sí debido al flujo de aire. La tabla 2 muestra los valores calculados para las características de salida de ambos tipos de turbinas, en las que los valores calculados en el túnel de viento coinciden con los valores teóricos.

Item	Type-A	Type-B
Maximum power coefficient $C_{P_{max}}$	0.204	0.231
Tip speed ratio at $C_{P_{max}}$ λ_{ref}	3.51	3.76

Cuadro 2 Coeficiente de potencia máxima (Wakui et al., 2005)

Como el tipo B no genera interferencias, su potencia generada es la suma generada de la potencia de cada rotor. Como resultado, el coeficiente de potencia máxima en el lado de la relación de velocidad de punta alta es mayor en comparación con el tipo A. Se observó que, a pesar de tener un mejor coeficiente de potencia, el tiempo de arranque del tipo B era mayor, y se producía un comportamiento inestable más a menudo cuando aumentaba la velocidad del viento. Como resultado, no se produjo un buen comportamiento operativo en un sistema a gran escala.

Al hablar de la extracción de potencia neta, también se observó que aunque el tipo B es más eficiente en sistemas de pequeña escala, se observó que el tipo A es más productivo en condiciones que implican soplos de corta duración. Por ello, el tipo A se consideró más útil, y sus desventajas frente al tipo B pueden resolverse modificando los parámetros de su rotor, mejorando su rendimiento.(Wakui et al., 2005)

4.1.2.- HAWTs

Tras el estudio de los aerogeneradores de eje vertical (VAWT), la atención se centra ahora en el mundo de los HAWT. A diferencia de los VAWT, no hay muchas variaciones en la forma de los HAWT; las principales diferencias entre los tipos de HAWT se encuentran en las torres que soportan el peso de los aerogeneradores y en el número de palas de los rotores.

Las torres son una de las partes más importantes de las HAWT porque son las encargadas de sostener el peso de los aerogeneradores y soportar muchos tipos diferentes de cargas, como las causadas por la velocidad media del viento, el movimiento del rotor, el perfil del viento, las cargas gravitatorias y los ángulos de las palas. Si las torres se colocan en alta mar, también tienen que soportar las fuerzas causadas por el mar, como las corrientes oceánicas y las fuerzas de las olas. Para soportar esas cargas, se han diseñado distintos tipos de torres.

Las torres de aerogeneradores más utilizadas son las torres tubulares de acero, las torres de hormigón y las torres de celosía para aerogeneradores de tamaño medio a grande, y las torres eólicas atirantadas, las torres eólicas basculantes y las torres híbridas para aerogeneradores de pequeña escala. (Asociación danesa de la industria eólica)



Fig. 17. Torre tubular (Asociación danesa de la industria eólica)

Las torres tubulares de acero son el tipo más común de torres de aerogeneradores. Se utilizan para alojar grandes aerogeneradores y se componen de varios segmentos cilíndricos o cónicos. Estos segmentos del armazón se fabrican curvando en frío chapas planas de acero para darles la forma cilíndrica deseada, tras lo cual se sueldan sus bordes para conseguir un armazón cerrado. Soldando entre sí partes consecutivas del cascarón, se obtienen cilindros de 15 a 30 m de altura. Por último, estos largos cascos se transportan y se atornillan entre sí con pernos totalmente precargados. (Koulatsou et al., 2020)

Las torres son cónicas (con el diámetro mayor en la base) para aumentar su resistencia y ahorrar materiales. Las torres tubulares de acero tienen las siguientes características:

- **Robustas:** Al estar fabricados en chapa de acero, son muy resistentes.
- **Difícil de fabricar:** Especialmente debido a la soldadura de los casquillos, el control de la deformación y el tamaño de los segmentos del casquillo.
- **Difícil y caro de transportar:** Está limitado al tamaño del vehículo y al estado de la carretera.
- **Caro de mantener:** La protección antioxidante sólo puede hacerse manualmente.
- **Proporcionan protección:** Al tener una estructura cerrada, las partes internas están bien protegidas. (CNBM Internacional)



Fig. 18. Torre de celosía (Asociación danesa de la industria eólica)

Las torres de celosía se fabrican soldando perfiles de acero; este procedimiento requiere menos material que el utilizado para la fabricación de una torre tubular. Las torres de celosía se utilizaron en el pasado para turbinas experimentales de pequeño tamaño debido a su sencillez de diseño y construcción. Hoy en día su presencia en los países occidentales es limitada, pero aún pueden encontrarse en Europa del Este, Oriente Medio y Asia. Las principales características de las torres de celosía son:

- **Bajo coste:** Requieren menos material, menos soldaduras y el proceso de fabricación puede automatizarse.
- **Menos costes de mantenimiento:** El acero puede ser galvanizado, lo que protege la torre de la oxidación.
- **Mal aspecto visual:** Aunque subjetivo, a muchas personas no les gusta el aspecto de las torres de celosía.
- **Transporte sencillo:** Son ligeros, lo que facilita su transporte.
- **Protección adicional necesaria:** Para proteger el cableado y otros mecanismos.

Dado que las torres tubulares se encarecen considerablemente cuando su tamaño supera los 100 metros y que las torres de celosía utilizan menos material que las tubulares, se realizó un estudio con el objetivo de reducir costes para comprobar si las torres de celosía podían convertirse en una versión alternativa a las tubulares. Los resultados indicaron que, aunque las torres de celosía pueden ser una alternativa viable en términos de rendimiento estructural, en condiciones de funcionamiento extremas las torres de celosía experimentaron un desplazamiento excesivo en la parte superior de ésta. También se encontraron fallos en el generador debido a la vibración y, para terminar, en vientos muy turbulentos las palas podían doblarse en la curva en la dirección del flujo del viento, acercándolas a la torre, lo que tenía consecuencias peligrosas. (Barbu et al., 2021)

Se estudió otra opción: las torres de hormigón. Los resultados fueron muy prometedores y muestran un gran potencial para la fabricación de torres de más de 70 metros de altura, debido a propiedades como la resistencia, el peso específico y la versatilidad. (de Lana et al., 2021)



Fig. 19. Torres de hormigón (Energía eólica y desarrollo de la ingeniería)

Aunque el hormigón no es el material más utilizado en la construcción de torres de turbinas, algunos estudios demuestran que podría llegar a ser un material mejor que el acero, sus principales ventajas son:

- **Construcción más rápida:** Las piezas están preconstruidas y montadas in situ.
- **Menor coste durante todas las fases de construcción:** Los costes de mano de obra y equipos.
- **Durabilidad:** Se calcula que pueden durar hasta 50 años, el doble que las torres de acero. Además, se pueden utilizar aditivos para mejorar la resistencia de la torre y la protección contra ambientes agresivos.
- **Efecto medioambiental:** Tienen un efecto amortiguador que reduce el ruido de la turbina.
- **Potencial de futuro:** Como ya se ha explicado, los aerogeneradores de hormigón pueden ser una alternativa a las torres de acero, ya que no tienen una limitación de precio tan estricta como las torres tubulares de acero.

Al pasar a los aerogeneradores pequeños, las torres necesarias para soportar el peso de la cabeza de la turbina no necesitan ser tan resistentes como las utilizadas para los grandes aerogeneradores. Por eso, sus formas varían con respecto a sus homólogas grandes, siendo las más populares las torres atirantadas, las torres basculantes y las torres híbridas.



Fig. 20. Torre eólica atirantada (Asociación danesa de la industria eólica)

Las torres atirantadas sólo se utilizan para sostener pequeñas turbinas eólicas. Parte del peso de la turbina lo soportan los cables, lo que hace que estas torres sean más propensas al vandalismo, comprometiendo la seguridad general de la torre. Además, los cables requieren un mantenimiento regular para garantizar que están en buen estado y correctamente tensados. Dado que los cables requieren más espacio y su bajo coste en comparación con otras opciones (que se debe al ahorro de material de la torre), se suelen utilizar en zonas rurales, donde hay mucho espacio y donde los cables tensores no son un problema.



Fig. 21. Torres eólicas basculantes. (Conceptos básicos sobre torres eólicas, s.f.-a)

Las torres basculantes vienen en diferentes alturas y tamaños, y al igual que las torres atirantadas, requieren un conjunto de cables para sujetar la torre. La diferencia con las torres mencionadas anteriormente es que las torres basculantes permiten bajar la turbina, lo que permite a los trabajadores realizar el mantenimiento en tierra firme. En lugares con vientos fuertes, como los huracanes, este mecanismo permite proteger las turbinas salvándolas de la destrucción. (Conceptos básicos sobre torres eólicas, s.f.-b)



Fig. 22. Torre híbrida (asociación de la industria eólica danesa)

Algunas torres se fabrican con distintas combinaciones de las técnicas mencionadas. Un ejemplo es la torre de tres patas que se ve en la figura 22, que es una torre híbrida entre una torre de celosía y una torre atirantada.

5.- DISEÑO DEL ROTOR

Las palas son una de las partes más importantes de un aerogenerador, por su capacidad para extraer energía del viento. Características como la relación de velocidad de la punta, el ángulo de ataque y el material utilizado en la fabricación de la pala desempeñan papeles importantes a la hora de determinar su eficiencia.

5.1.- Materiales

Las palas del rotor forman una estructura delicada, por lo que debe prestarse especial atención a la selección de materiales. Los materiales utilizados para el diseño del rotor deben ser:

- **Rigidez:** La alta rigidez del material es necesaria para mantener un rendimiento aerodinámico óptimo.
- **Ligeros:** La baja densidad es necesaria para reducir las fuerzas gravitatorias.
- **Duradero:** se necesita una larga vida útil para reducir la degradación del material.

La selección de materiales para las palas de los rotores es una tarea compleja y multifacética que requiere la optimización de las propiedades, el rendimiento y la economía. (Brøndsted et al., 2005)

En la actualidad, la mayoría de las palas se fabrican con poliéster reforzado con fibra de vidrio o epoxi. Se están investigando otros materiales, como compuestos de madera como la madera-epoxi o la madera-fibra-epoxi. (Iberdrola)

5.2.- Relación velocidad punta

La relación de velocidad de punta se define como la relación entre la velocidad de las palas del rotor y la velocidad relativa del viento.

$$\lambda = \frac{\Omega r}{V_w}$$

Donde λ es la relación de velocidad de la punta Ω la velocidad de rotación (rad/s), r es el radio de la pala y V_w es la velocidad del viento.

La relación de velocidad de punta es uno de los parámetros más importantes a la hora de diseñar una turbina. A la hora de seleccionar la velocidad de punta adecuada, deben tenerse en cuenta aspectos como la eficiencia, el par, el esfuerzo mecánico, la aerodinámica y el ruido. Las velocidades de punta elevadas aumentan la eficiencia, el ruido, el esfuerzo centrífugo y aerodinámico de la turbina y disminuyen el par. Las HAWT modernas suelen utilizar una relación de velocidad de punta de nueve a diez para los rotores de dos palas y de seis a nueve para los de tres palas. (Schubel & Crossley, 2012)

5.3.- Forma y cantidad del plano de las aspas

Existen varias teorías para calcular la longitud de cuerda óptima, una de ellas se basa en la optimización de Betz:

$$C_{opt} = \frac{2\pi r}{n} \frac{8}{9C_l} \frac{U_{wd}}{\lambda V_r}$$

Donde $V_r = \sqrt{V_w^2 + U}$; r =radio (m); n =Cantidad de pala; C_l = Coeficiente de sustentación; V_r =Velocidad resultante local del aire (m/s); U =velocidad del viento (m/s); U_{wd} =velocidad del viento de diseño (m/s); C_{opt} =Longitud de cuerda óptima.

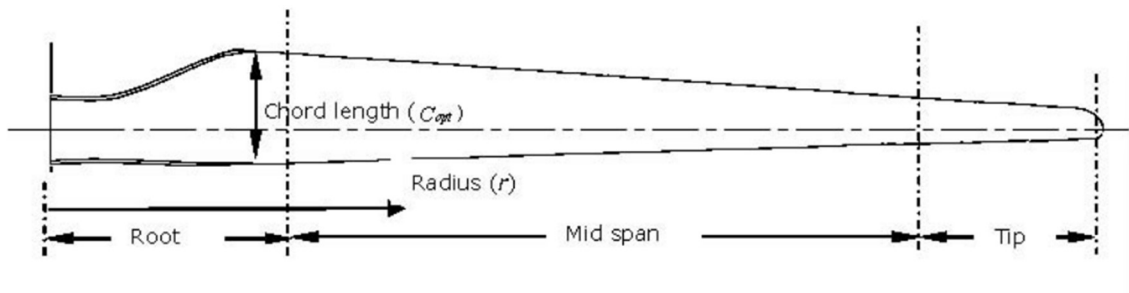


Fig. 23. Geometría del rotor (Schubel & Crossley, 2012)

Suponiendo un coeficiente de sustentación constante, la longitud de cuerda de la pala depende principalmente del número de palas y de la relación de velocidad de punta. Generalmente, en la práctica se simplifica la longitud de cuerda para facilitar la fabricación. Las pérdidas de la simplificación pueden justificarse por un importante ahorro de costes de producción.

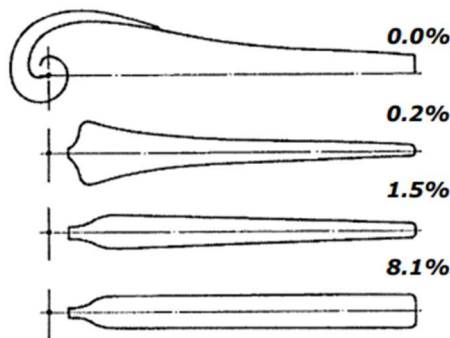


Fig. 24. Pérdidas de eficiencia como resultado de la simplificación a la longitud de cuerda ideal (Schubel & Crossley, 2012)

El número de palas también debe tenerse en cuenta porque afecta a la velocidad y la eficiencia de una turbina eólica. La potencia que un aerogenerador extrae del viento es directamente proporcional al área de barrido de las palas; por consiguiente, las palas tienen un efecto directo en la generación de energía. Cuantas más palas tenga una turbina, mayor será el par que produzca y menor la velocidad de rotación. Como la mayoría de las turbinas utilizadas para generar electricidad deben funcionar a altas velocidades, no necesitan mucho par. Por ello, se consigue una mayor generación de energía con un menor número de palas. En general, la mayoría de las HAWT tienen tres palas. Aunque los diseños de una o dos palas son el número óptimo en cuanto a eficiencia, estos diseños causan desequilibrio, lo que hace que las palas vibren, aumentando el riesgo de un daño mecánico catastrófico, y, por tanto, no son prácticos. Los problemas mecánicos de las turbinas de dos palas pueden solucionarse con un diseño de cuatro palas, pero sin tener en cuenta el peso extra de la pala, económicamente cuatro palas son más caras que tres. Por estas razones, las turbinas fabricadas con tres palas representan un compromiso ideal entre alta producción de energía, alta estabilidad, peso ligero y durabilidad de la turbina. (Adeyeye et al., 2021)

En cuanto al ruido, los diseños de dos palas deben girar más rápido para obtener la máxima eficiencia, lo que supone una desventaja para los aerogeneradores terrestres porque el ruido aumenta debido al incremento de la velocidad de las puntas.

También hay que tener en cuenta el impacto visual de los aerogeneradores. Se dice que los diseños de tres palas parecen más suaves al girar y, por tanto, más agradables a la vista.

5.4.- Aerodinámica

El rendimiento aerodinámico es fundamental para un diseño eficiente del rotor. La sustentación aerodinámica es la fuerza que genera la potencia de la turbina, y debe maximizarse con un diseño adecuado, además, también existe una fuerza de resistencia al arrastre, que debe minimizarse ya que se opone al movimiento de la pala. La relación entre sustentación y resistencia define la relación entre estas dos fuerzas:

$$\text{Ratio de sustentacion/resistencia} = \frac{\text{Coeficiente de sustentación}}{\text{Coefficient of resistencia}} = \frac{C_l}{C_d}$$

El coeficiente es difícil de predecir matemáticamente, por eso tradicionalmente los perfiles aerodinámicos se prueban experimentalmente, buscando conseguir un coeficiente superior a 30. (Schubel & Crossley, 2012)

El ángulo de ataque es el ángulo de la corriente que se aproxima con respecto a la línea de cuerda. En las grandes turbinas, se ajusta constantemente para dar a las palas el ángulo óptimo con respecto al viento. En la mayoría de las formas de pala aerodinámica, un ángulo de ataque de 25 a 30 grados crea la mayor sustentación con la menor resistencia, pero este ángulo varía mucho según la turbina.

El ángulo de torsión es otro parámetro importante, que depende de la relación entre la velocidad de la punta y el ángulo de ataque. Por lo general, la sección de la aleta en el buje está inclinada hacia el viento debido a la elevada relación entre la velocidad del viento y la velocidad radial de la pala. En cambio, la punta de la pala suele estar casi normal respecto al viento. El ángulo de giro puede reducirse para disminuir los costes de fabricación, pero estas simplificaciones deben estar bien justificadas teniendo en cuenta que se reducirá el rendimiento global del aerogenerador.

5.5.- Condiciones fuera de diseño y regulación de potencia

Las primeras turbinas eólicas se diseñaron para funcionar a una velocidad de rotación fija, por lo que, cuando las condiciones del viento no eran ideales, disminuía su eficiencia. Hoy en día, el uso de turbinas de velocidad fija se limita a los diseños más pequeños. En las turbinas eólicas de mayor tamaño esto ya no ocurre, y se sugiere que la caja de engranajes puede quedar obsoleta en las turbinas futuras.

Las turbinas modernas funcionan a velocidades del viento superiores a las nominales. Por eso, hay que aplicar un método que limite la velocidad de giro para evitar una carga excesiva de la pala, el buje, la multiplicadora y el generador. Además, la turbina también debe mantener un alto rendimiento a bajas velocidades del viento.

Dado que la velocidad del viento afecta directamente al ángulo de incidencia del flujo de aire resultante sobre la pala, el ángulo de inclinación de la pala debe modificarse en

consecuencia. Esto se conoce como cabeceo, que mantiene la fuerza de sustentación de la sección aerodinámica. Esto se consigue girando mecánicamente toda la longitud de la pala. Con el cabeceo es posible aumentar la sustentación en condiciones de poco viento y evitar el exceso de velocidad del rotor en condiciones de mucho viento.

5.6.- Diseño de palas inteligentes

La tendencia actual en el diseño de palas son las llamadas "palas inteligentes", que modifican su forma en función de las condiciones del viento. Existen numerosos enfoques en la categoría de diseño inteligente, que consisten en superficies de control aerodinámico o materiales actuadores inteligentes. El objetivo de esta investigación es limitar las cargas y la fatiga para aumentar la captación de energía. El uso de superficies de control aerodinámico incluye flaps tipo alerón, control de camber, torsión activa y control de capa límite. Las figuras 25 y 26 muestran una comparación del rendimiento aerodinámico basado en una variedad de conceptos de superficies de control aerodinámico:

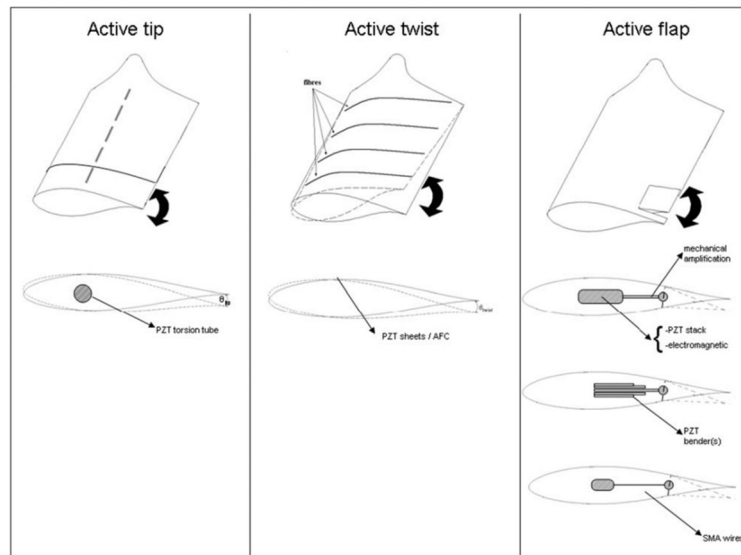


Fig. 25. Conceptos de estructura inteligente (Schubel & Crossley, 2012)

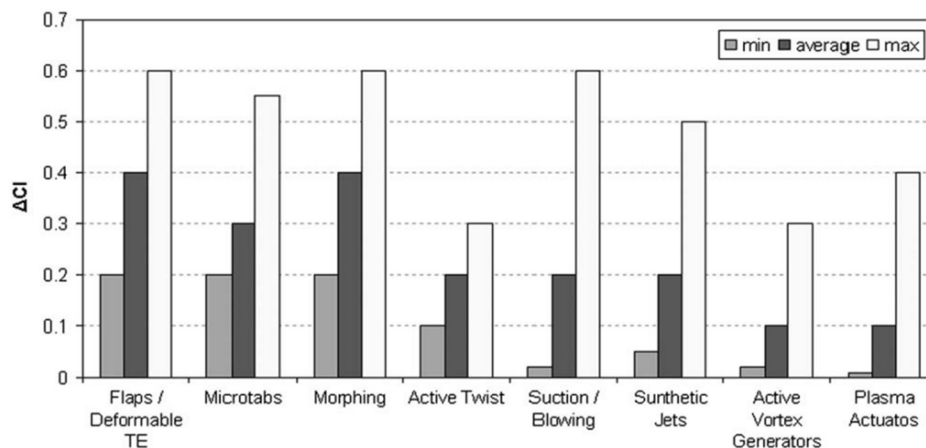


Fig. 26. Comparación de los conceptos de dispositivos aerodinámicos en términos de capacidad de control de la sustentación (Schubel & Crossley, 2012)

Los conceptos propuestos para las superficies de control aerodinámico requieren un accionamiento rápido sin sistemas mecánicos complejos ni grandes relaciones entre energía y peso. Para ello, es necesario utilizar sistemas de actuación con materiales inteligentes. Los materiales inteligentes más utilizados son los ferroeléctricos, los de reología variable y las aleaciones con memoria de forma. El desarrollo de su tecnología ha alcanzado un alto nivel y existen soluciones comerciales que se utilizan ampliamente.(Schubel y Crossley, 2012)

6.- Offshore vs onshore

La ubicación de los aerogeneradores, ya sea en alta mar o en tierra, desempeña un papel crucial a la hora de maximizar la eficiencia y la eficacia de la generación de energía eólica. En esta sección exploraremos las ubicaciones óptimas para los aerogeneradores, teniendo en cuenta factores como la disponibilidad de recursos eólicos, el impacto ambiental y la viabilidad económica.

Las turbinas eólicas pueden instalarse en tierra o en el mar. La principal diferencia entre onshore (en el mar) y offshore (en tierra firme) es su entorno. Los parques eólicos marinos son mucho más complejos de diseñar, instalar y mantener, ya que hay muchos factores que pueden afectar al proceso.(Esteban et al., 2011)

Debido a sus diferentes entornos, las turbinas eólicas terrestres y marinas tienen diferentes tipos de cimientos. Para los aerogeneradores terrestres se utilizan varios tipos de cimientos y, aunque sus formas pueden variar, todos se basan en el mismo principio: el uso de hormigón armado.



Fig. 27. Tipos de cimentación para aerogeneradores terrestres(Austin & Jerath, 2017)

En la transición a la energía eólica marina, como la profundidad del mar varía significativamente en función de las zonas en las que se ubican las turbinas, hubo que desarrollar distintos tipos de cimientos. Estos cimientos están sometidos a una compleja combinación de cargas eólicas e hidrodinámicas de dirección, amplitud y frecuencia variables.

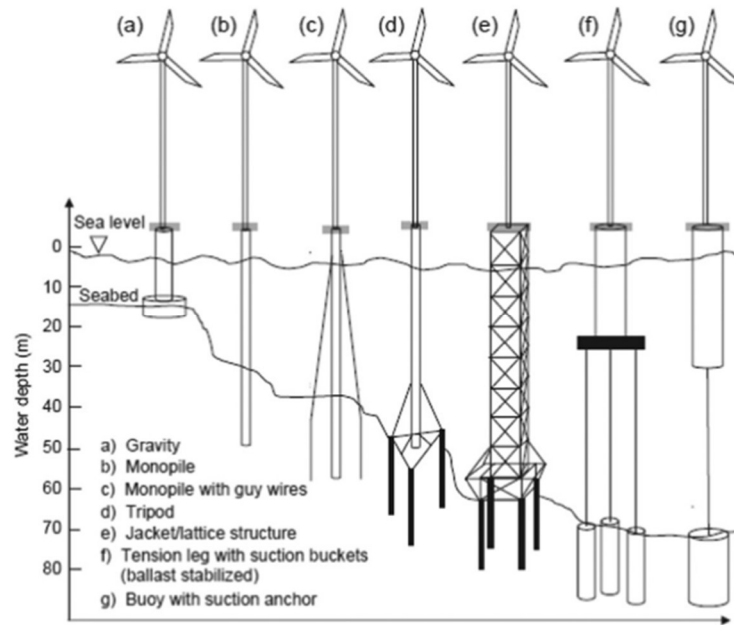


Fig. 28. Tipos de cimentación para aerogeneradores marinos en función de la profundidad del agua

En 2022, del total de 900 GW de capacidad eólica instalada, el 93% correspondía a sistemas terrestres, mientras que sólo el 7% era eólica marina. La eólica terrestre es una tecnología desarrollada, presente en 115 países de todo el mundo, mientras que la eólica marina se encuentra en una fase temprana de expansión, con capacidad sólo presente en 20 países. (Agencia Internacional de la Energía)

Aunque la energía eólica terrestre sigue dominando el mercado, los parques eólicos marinos empiezan a ocupar parte del mar del paisaje costero de algunos países, lo que se explica por varios factores, como la falta de espacio para el desarrollo de parques eólicos terrestres, el apoyo gubernamental y el menor impacto ambiental previsto de los parques eólicos marinos. Además, la energía eólica marina ofrece dos grandes ventajas frente a la terrestre, como son:

- **Calidad del viento:** La velocidad del viento suele ser mayor, aumentando con la distancia a la costa, y más uniforme, lo que provoca menos efectos de turbulencia. Por tanto, se reducen los efectos de la fatiga, lo que aumenta la vida útil del aerogenerador.
- **Zonas de emplazamiento:** Hay zonas libres más grandes y adecuadas en el mar donde pueden instalarse parques eólicos marinos. La contaminación acústica, así como el impacto visual, son problemas menores, ya que la ubicación de los parques eólicos está lejos de zonas pobladas. Además, al no existir limitaciones estrictas en cuanto a la carga a transportar, es posible instalar turbinas de mayor tamaño, consiguiendo más producción por unidad instalada.

Mientras que sus desventajas son:

- **Costes:** El proceso de obtención de permisos y de ingeniería, la construcción (especialmente las cimentaciones marinas y la integración de la obra eléctrica) aumentan significativamente el coste de la tecnología eólica marina.

- **Tecnología joven:** La tecnología eólica marina necesita más desarrollo. Aún está por determinar qué generador es el más adecuado para los parques eólicos marinos (sobre todo para las turbinas con cimientos flotantes), que tendrán que adaptarse a las condiciones marinas, como la corrosión y las cargas más elevadas.
- **Mantenimiento:** Acceso limitado y más caro a los aerogeneradores.

Aunque las turbinas eólicas marinas son la opción más cara en la actualidad, su coste está disminuyendo, y se espera que siga haciéndolo durante la próxima década. (Esteban et al., 2011)

7.- Regulación de la instalación de pequeños aerogeneradores en viviendas de los Países Bajos.

La instalación de pequeños aerogeneradores en viviendas supone una oportunidad para la producción descentralizada de energía y la vida sostenible, sobre todo en las regiones ventosas de los Países Bajos. A medida que aumentan las soluciones de energías renovables, resulta esencial comprender la estructura normativa. En esta sección, se examinará la normativa que regula la instalación de pequeños aerogeneradores en propiedades residenciales en los Países Bajos.

Para instalar una turbina eólica siempre se necesita un permiso medioambiental. Este permiso se aplica no sólo a los grandes parques eólicos, sino también a los aerogeneradores privados más pequeños. El permiso medioambiental es necesario para la construcción de la turbina eólica (artículo 2.1, primer párrafo, letra a, de las Disposiciones Generales de la Ley de Medio Ambiente WABO), a menudo para desviarse del plan de zonificación (artículo 2.1, primer párrafo, letra c, WABO) y para la puesta en servicio de un establecimiento (medioambiental) (artículo 2.1, primer párrafo, letra e, WABO). (*Particuliere Windmolens - van Doleweerd LAW*, s.f.)

Cuando se instala un pequeño aerogenerador en una casa o negocio, o cerca de ellos, el propietario debe solicitar y recibir primero un permiso medioambiental. Esto se aplica a los aerogeneradores en su propio mástil, pero también a los que se colocan en el tejado. Además, se requiere un permiso medioambiental para cada instalación de un aerogenerador, lo que significa que hay que presentar una nueva solicitud para cada instalación adicional de un aerogenerador.

El permiso ambiental está compuesto por varias normas que regulan la instalación de una turbina eólica. La norma sobre ruido establece que el nivel medio de ruido causado por una turbina eólica no puede superar los 47 dB en lugares sensibles al ruido (por ejemplo, una casa). Además, se aplica un nivel de ruido máximo de 41 dB durante el periodo nocturno. La norma sobre ruido se aplica por instalación, independientemente del número de aerogeneradores o del tipo de turbina. No obstante, la autoridad competente puede fijar una norma inferior para una instalación a fin de tener en cuenta la acumulación debida a múltiples instalaciones con aerogeneradores.

También se aplica una norma de seguridad, en la que se estudiará la seguridad del aerogenerador según varias normas diferentes del plan medioambiental, y si se aprueba,

recibirá un certificado que dura 20 años, además la seguridad del aerogenerador, se inspeccionará una vez al año. (*Externe Veiligheid*, s.f.)

También se implantó una norma sobre la sombra proyectada en las casas de los vecinos, en la que los aerogeneradores deben tener un dispositivo que detenga la turbina eólica, para evitar la proyección de sombras si:

- La distancia entre el aerogenerador y otras viviendas es inferior a 12 veces el diámetro del rotor.
- Las sombras proyectadas sobre otras viviendas pueden producirse más de diecisiete días al año y veinte minutos al día.

(*Slagschaduw Bij Windenergie Op Land*, s.f.)

Además, los aerogeneradores tampoco deben molestar a los radares civiles y militares del país. (*Radar Bij Windprojecten*, s.f.)

La posibilidad de obtener un permiso medioambiental depende del municipio. Algunos municipios pueden tener una política especial al respecto, o puede estar regulado en el plan de zonificación. Por eso hay que investigar bien las posibilidades a la hora de colocar una turbina eólica. Puede haber un coste significativo asociado a la obtención del permiso correcto, lo que puede afectar al tiempo de amortización de la turbina.

Un número creciente de municipios ha elaborado una política específica (*facetbestemmingsplannen* o *beleidsnoties*) para estos pequeños (micro) molinos y/o aerogeneradores. En ella se indica exactamente qué es posible y en qué condiciones. Si en su municipio no existe una política específica sobre aerogeneradores, se aplican las normas del *bestemmingsplan* (plan de destino).

La política del municipio suele estar orientada a la ubicación, además, la eficiencia de la turbina también depende de la ubicación. Por eso, la viabilidad de la turbina dependerá en gran medida de la ubicación. (*Particuliere Windmolens - van Doleweerd LAW*, s.f.)

Ejemplo: municipio de Wijchen

El municipio ha manifestado su decisión de disponer de un marco de evaluación integrado para evitar la proliferación de aerogeneradores e identificar las oportunidades de integración de las turbinas eólicas en el paisaje. Una vez adoptado, este memorándum servirá de marco político municipal para evaluar las solicitudes de instalación de pequeñas turbinas eólicas tanto dentro como fuera de las zonas urbanizadas y servirá de base para las revisiones del plan de zonificación.

Este memorándum se centra en las pequeñas turbinas eólicas. El ayuntamiento ha declarado que, a pesar de las dificultades para establecer un límite inferior o superior estricto para un aerogenerador pequeño, la distinción entre un aerogenerador pequeño y uno grande

estará clara para todos. Los grandes aerogeneradores pueden erigirse a una altura de entre 80 y 120 metros. Los aerogeneradores pequeños (a los que se refiere este memorándum) no superarán los 20 metros en su propio mástil, mientras que cuando se coloquen sobre una estructura existente, la altura máxima será de cinco metros. A menudo se trata de solicitantes privados que piden uno o un número limitado de aerogeneradores.

En la actualidad, el municipio de Wijchen no cuenta con una política específica en materia de turbinas eólicas. En principio, las turbinas eólicas siempre están sujetas a permisos de construcción, lo que significa que el plan de zonificación constituye actualmente el marco de evaluación más importante para las solicitudes de erección de una turbina eólica. En la práctica, parece que casi ningún plan zonal del municipio de Wijchen contempla la posibilidad de erigir un aerogenerador. En la zona periférica, las estructuras están permitidas como máximo hasta una altura de 10 metros y, dentro de las zonas edificadas, suele aplicarse una altura máxima de construcción o de canalón, con lo que la posibilidad de erigir algo aquí es muy limitada. Por tanto, una solicitud para instalar un aerogenerador siempre estará, en principio, en conflicto con el plan de zonificación. Las opciones de exención también son limitadas. Los planes de zonificación no suelen prever una opción de exención interna y el llamado reglamento de casos de migajas (artículo 3.23 Wro jo artículo 4.1.1 Bro) sólo prevé un reglamento de exención fuera del plan para estructuras de hasta 10 metros de altura. Esto será a menudo insuficiente para las turbinas eólicas. Por lo tanto, siempre habrá que prever una revisión parcial del plan de zonificación o una decisión sobre el proyecto.

El municipio de Wijchen acoge con entusiasmo las iniciativas relacionadas con la energía sostenible y ecológica. Desde esta perspectiva, existe una actitud básica positiva hacia la instalación de pequeños aerogeneradores. Sin embargo, la eficacia de los aerogeneradores pequeños, especialmente en relación con el precio de compra, es objeto de debate. El municipio de Wijchen afirma que los pequeños aerogeneradores no son tan eficientes como otros proveedores de electricidad verde (como los colectores solares), lo que se debe a que los pequeños aerogeneradores son relativamente caros, producen poca energía y su periodo de amortización es relativamente largo (entre 21 y 98 años).

El plan de ordenación paisajística (LOP) indica, por tanto, que la instalación de aerogeneradores crea una nueva capa en el paisaje, que suele ser visible desde gran distancia, sobre todo en campo abierto. El impacto espacial también es considerable en las zonas urbanizadas, pero allí un molino de viento suele desaparecer sobre el fondo de los edificios existentes o puede integrarse bien. Desde el punto de vista espacial, un aerogenerador encaja mejor en un entorno técnico y muy dinámico, como un parque empresarial o a lo largo de grandes infraestructuras.

Como ya se ha dicho, el tiempo de amortización es largo, el rendimiento es bajo y el impacto espacial suele ser grande. No obstante, el municipio de Wijchen considera importante facilitar iniciativas relacionadas con la electricidad verde y la generación de energía sostenible y formular principios políticos relativos a las pequeñas turbinas eólicas. El municipio de Wijchen ha optado por un enfoque por zonas, distinguiendo entre tres tipos de zonas:

1. Zonas urbanizadas, zonas residenciales y centros urbanos: En estas zonas, el impacto espacial de los aerogeneradores pequeños suele ser fácil de supervisar. Los aerogeneradores pequeños no suelen causar las molestias de los grandes (ruido, sombra proyectada, etc.). Sin embargo, la eficiencia real de un molino o turbina probablemente no será muy alta debido a la falta de un suministro de viento sin obstáculos. Desde un punto de vista urbanístico y estético,

lo mejor es integrar desde el principio una turbina eólica en un proyecto de construcción (a gran escala), en forma de las llamadas turbinas urbanas. Colocar molinos y turbinas por separado en el entorno de un pueblo no suele ser deseable desde el punto de vista urbanístico y estético. Además, para un molino de viento separado de este tipo debe seguirse un procedimiento relativamente complejo (a saber, una revisión del plan de zonificación posiblemente precedida de una decisión sobre el proyecto). En un proyecto de construcción a gran escala, la turbina puede integrarse en la planificación y el procedimiento. En vista de la rentabilidad limitada, hay que tener en cuenta que la instalación de una turbina eólica tiene principalmente una función simbólica.

2. Zonas muy dinámicas con un aspecto técnico, que son principalmente parques empresariales y a veces líneas de infraestructuras a gran escala: Desde un punto de vista espacial, un elemento técnico y dinámico como un aerogenerador encaja perfectamente en un entorno técnico de un parque empresarial o a menos de 50 metros de una infraestructura a gran escala como una autopista, una línea de ferrocarril o una estructura de ingeniería (puente, viaducto, etc.), si no está situado en una zona abierta o residencial. También en este caso, dada la limitada eficiencia, la instalación de un aerogenerador tiene principalmente una función simbólica.

3. Zonas periféricas y reservas naturales: En la zona periférica y las reservas naturales se aplica un marco de evaluación especialmente cuidadoso. Aunque la oferta eólica (sin obstáculos) será mayor en la zona periférica (abierta) y las reservas naturales, las turbinas eólicas de la zona periférica también tienen el mayor impacto espacial. Dado su carácter dinámico y técnico, no suelen encajar bien en las zonas abiertas y las reservas naturales. Al permitir la instalación de aerogeneradores individuales, se corre el peligro de desordenar el paisaje. En este caso, el desorden se refiere al daño al paisaje original, que reduce el valor visual. Aunque el desorden está ligado a la percepción personal, el grado de desorden depende en gran medida de la cantidad de elementos (perturbadores) y de la variación de las funciones de uso del suelo dentro del paisaje. Por lo tanto, el municipio opta por permitir únicamente pequeñas turbinas eólicas dentro de los bloques de edificios existentes, en consonancia con los edificios existentes de empresas agrícolas y no agrícolas y viviendas. La agrupación evita el desorden del paisaje. Por el momento, antes del establecimiento de un aerogenerador debe realizarse una revisión del plan de zonificación (precedida o no de una decisión sobre el proyecto), en la que pueden sopesarse los aspectos estéticos y medioambientales y las partes interesadas tienen la oportunidad de participar. Para las reservas naturales y las zonas situadas fuera de los bloques de edificios existentes, los aerogeneradores sueltos pueden desvirtuar el carácter rural y natural de la zona periférica y tener un efecto de desorden. Por lo tanto, en estas zonas no se permiten los aerogeneradores pequeños. (Overheid.nl)

[Procedimiento para solicitar un permiso medioambiental:](#)

El procedimiento para solicitar un permiso ambiental para una pequeña turbina eólica es el mismo que el procedimiento normal para un permiso ambiental. Dependiendo de la ubicación, será diferente si sólo se requiere el permiso ambiental para la actividad de construcción o si la actividad también se desvía del plan de zonificación.

Todas las actividades se presentan a la autoridad competente a través de un único formulario digital desde la Oficina de Medio Ambiente en Línea (OLO). Esta evalúa si la turbina eólica se ajusta al plan de zonificación y cumple los requisitos medioambientales y de seguridad.

El plazo del procedimiento ordinario es de ocho semanas. Si aún no se ha tomado ninguna decisión sobre la concesión del permiso, el plazo se prorrogará una vez por seis semanas. Los permisos ambientales para miniturbinas eólicas también se presentan al comité municipal de estética o al arquitecto municipal. Por lo tanto, puede ser útil crear primero un borrador de solicitud en la OLO y discutirlo con el ayuntamiento. Así se reduce el riesgo de retraso o rechazo. También es importante informarse previamente en el ayuntamiento sobre los costes de la concesión del permiso. (*Kleine Windmolens: Wat Kun Je Ermee En Welke Vergunningen Heb Je Nodig?* | *HIER Opgewekt*, s.f.)

Si se aprueba la solicitud, se publicará el permiso. A partir de ese momento, es posible oponerse a la concesión del permiso durante un periodo de seis semanas. (*Particuliere Windmolens - van Doleweerd LAW*, s.f.)

Costes y plazo de amortización

Los costes de adquisición de una miniturbina eólica oscilan entre cientos y muchos miles de euros. Esto depende de la potencia. Los aerogeneradores pequeños tienen una potencia de entre 0,5 y 6 kW (kilovatios). Incluso con un rendimiento eléctrico óptimo, la inversión no suele amortizarse en los veinte años de vida técnica. Por tanto, la elección de una miniturbina eólica se basa principalmente en consideraciones medioambientales y no desde una perspectiva económica. Apenas existen subvenciones para la compra. Algunas provincias y municipios las conceden en el marco de acuerdos locales sobre el clima. Algunos particulares recurren a la desgravación por inversión en energía para contribuir a las inversiones en técnicas de ahorro energético o energía sostenible. (*Kleine Windmolens: Wat Kun Je Ermee En Welke Vergunningen Heb Je Nodig?* | *HIER Opgewekt*, s.f.)

8.- Selección del aerogenerador

Tras analizar los distintos tipos de aerogeneradores y su tecnología en los capítulos anteriores, ahora nos centraremos en el proceso de selección. En este capítulo se explicará qué aerogenerador se seleccionará para este proyecto.

En los apartados anteriores se ha explicado que existen dos tipos principales de aerogeneradores (aerogeneradores de eje vertical y aerogeneradores de eje horizontal) y sus diferencias. Con todos los conocimientos que he adquirido durante la investigación realizada dentro de este proyecto, he decidido seleccionar una HAWT frente a una VAWT por las siguientes razones:

- **Eficiencia:** Las HAWT son más eficientes que las VAWT. En la sección anterior se ha descrito que la normativa actual sobre la instalación de aerogeneradores en los Países Bajos no permite construir torres altas para soportar el peso de la turbina. Esto afectará a la velocidad del viento que atraviesa el aerogenerador, ya que cuanto más bajo esté situado el aerogenerador, más lento y turbulento será el viento que lo atraviese. Por estas razones, para aumentar la potencia suministrada por el aerogenerador, la

eficiencia del mismo debe ser lo más alta posible, y como se ha dicho antes, los HAWT son la mejor opción en cuanto a eficiencia hoy en día.

- **Coste:** Teniendo en cuenta que los aerogeneradores son del mismo tamaño, los VAWT son más caros que los HAWT, esto se debe a su compleja geometría, más difícil de fabricar. El periodo de amortización de un aerogenerador pequeño tiende a ser largo, y con un periodo de amortización más largo para los VAWT, un aerogenerador de eje horizontal es una mejor opción.
- **Apariencia:** Las VAWT pueden tener un buen aspecto, especialmente el rotor helicoidal en H por su diseño moderno y elegante, pero mucha gente prefiere el diseño tradicional de las HAWT de tres o dos palas frente al diseño moderno de las VAWT. Aunque este apartado es subjetivo, se ha considerado que las HAWT de dos o tres palas son una opción más elegante que podría incorporarse más fácilmente al paisaje residencial de los barrios holandeses.
- **Tecnología:** La tecnología de las HAWT está más madura, por lo que se han sometido a más pruebas, lo que las hace menos propensas a fallos, y además están más disponibles que las VAWT.
- **Potencia:** Los HAWT pueden producir más potencia que los VAWT. Tras investigar en google shopping, todos los aerogeneradores pequeños que eran capaces de producir una potencia superior a 2 kW eran HAWT.

Ahora que ya se ha definido qué tipo de aerogenerador se va a elegir y por qué, vamos a sumergirnos en sus componentes. Los HAWT tienen diferentes partes, cada una de ellas tiene un propósito único, para lograr un rendimiento eficiente de la turbina eólica, cada una de las partes debe funcionar correctamente. Los aerogeneradores horizontales pequeños tienen algunas diferencias en las piezas y el mecanismo utilizado en comparación con los grandes aerogeneradores horizontales utilizados en los parques eólicos. Por eso es importante elegir el mecanismo y las piezas que mejor se adapten al tamaño de nuestro aerogenerador.

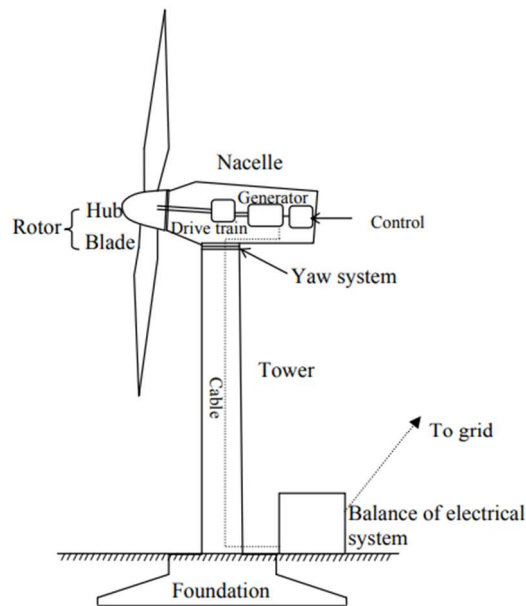


Fig. 29. Partes de un aerogenerador horizontal (Sobre la evaluación tecnoeconómica de la GD eólica)

Las piezas que forman un pequeño aerogenerador horizontal son:

- **Torre:** Como la velocidad del viento aumenta con la altura, la turbina eólica debe montarse en una torre o en el tejado de una casa. La torre es una mejor opción porque el viento que atraviesa una turbina montada en el tejado de una casa será más turbulento que el viento que se encuentra en lo alto de una torre. El viento turbulento reduce el rendimiento de una turbina eólica, por eso siempre es preferible tener un flujo laminar, que es más fácil encontrar en lo alto de una torre. La torre elegida para este proyecto será una torre de celosía por su mayor facilidad de transporte y menor precio.
- **Góndola:** La góndola es la estructura que se sitúa en la parte superior de la torre de un aerogenerador. Alberga el generador, la multiplicadora y otros componentes clave que son esenciales para transformar la energía cinética del viento en electricidad. Su forma suele ser cilíndrica en los grandes aerogeneradores, pero puede tener formas diferentes en los pequeños. (HIA energía)
- **Generador:** Es la parte más importante de la góndola. Convierte la energía mecánica producida por las palas del rotor en energía eléctrica. El generador suele ser una máquina síncrona, lo que significa que la velocidad está sincronizada con la frecuencia de la red eléctrica. La mayoría de los aerogeneradores utilizan un generador trifásico, lo que significa que producen tres corrientes alternas desfasadas entre sí.
- **Cola:** Los aerogeneradores deben estar orientados hacia el viento para poder funcionar correctamente. Los aerogeneradores utilizan el "yaw system", que se encarga de girar el aerogenerador para que esté orientado hacia el viento. Los

grandes aerogeneradores utilizan un "active yaw system" que emplea motores eléctricos o hidráulicos para hacer girar el pesado aerogenerador. Los aerogeneradores más pequeños utilizan un "passive yaw system" en el que se aprovecha la fuerza del viento para ajustar la orientación del rotor. Hay tres tipos diferentes de sistemas de bostezo pasivos, el elegido consiste en:

- Rodamiento de rodillos: Conecta la torre y la góndola. Permite la rotación de la góndola alrededor del eje vertical.
 - Aleta caudal: Está montada en la góndola, y utiliza la fuerza del viento para ajustar el rotor, haciéndolo orientarse hacia el viento.
 - Freno: Cuando se alcanza la orientación necesaria, un freno de guiñada activo detiene la góndola. Esto evita las vibraciones y reduce la fatiga.
- **Caja de cambios:** La caja de cambios se encarga de aumentar la velocidad de giro de las palas del rotor hasta un nivel adecuado para accionar el generador. Las palas del rotor giran a una velocidad relativamente lenta, pero como el generador necesita girar a una velocidad mucho mayor, se necesita una multiplicadora. La caja de engranajes sólo es necesaria en los grandes aerogeneradores, los pequeños no requieren el uso de cajas de engranajes porque sus rotores ya giran a gran velocidad. Esto los hace adecuados para ser acoplados directamente a su generador eléctrico. ("Temas fundamentales y avanzados de la energía eólica", 2012)
 - **Rotores:** El mejor diseño consiste en un rotor de 3 palas, porque produce mucho menos ruido que los rotores de dos palas y es más eficiente que los rotores de cuatro o más palas.
 - **Sistema de control:** Para proteger el rotor es necesario un sistema de control. Su objetivo es evitar que el rotor gire fuera de control en condiciones de viento extremas y protegerlo de los rayos.

Ahora que ya se han definido las diferentes partes del aerogenerador, es el momento de continuar con el proyecto en el anexo, en el que se explicará con más detalle cómo se realizará la instalación del aerogenerador.

9.- BIBLIOGRAFÍA:

Velocidad media del viento en 10 años para diferentes alturas | Atlas | Dutch Offshore Wind Atlas. (s.f.). Recuperado el 17 de junio de 2024, de <https://www.dutchoffshorewindatlas.nl/atlas/image-library/image-library/wind-speed-parameter-f>

- Adeyeye, K. A., Ijumba, N., & Colton, J. (2021). The Effect of the Number of Blades on the Efficiency of A Wind Turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 801(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/801/1/012020>
- Austin, S., & Jerath, S. (2017). Effect of soil-foundation-structure interaction on the seismic response of wind turbines. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(3). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.05.007>
- Barbu, M., Darie, G., & Patrascu, R. (2021). A technical analysis and comparison of tubular and lattice towers for wind turbines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 664(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/664/1/012044>
- Borg, M., R&d, B., Collu, M., & Brennan, F. (2012). *Offshore Floating Vertical Axis Wind Turbines: Advantages, Disadvantages and Dynamics Modeling State of the Art INNO-MPP-Investigation of the novel challenges of an integrated offshore Multi-Purpose Platform View project H2Ocean View project*. <https://doi.org/10.3940/rina.mre.2012.05>
- Brøndsted, P., Lilholt, H., & Lystrup, A. (2005). Composite materials for wind power turbine blades. En *Annual Review of Materials Research* (Vol. 35). <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.35.100303.110641>
- de Lana, J. A., Júnior, P. A. A. M., Magalhães, C. A., Magalhães, A. L. M. A., de Andrade Junior, A. C., & de Barros Ribeiro, M. S. (2021). Estudio del comportamiento de una torre eólica de hormigón pretensado de sección circular. *Estructuras de Ingeniería*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111403>
- Esteban, M. D., Díez, J. J., López, J. S., & Negro, V. (2011). Por qué energía eólica marina? En *Renewable Energy* (Vol. 36, Issue 2). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.009>
- Externe veiligheid*. (sin fecha). Obtenido el 28 de abril de 2024, del sitio Web: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/windenergie-op-land/externe-veiligheid>.
- Temas fundamentales y avanzados en energía eólica. (2012). En *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. <https://doi.org/10.5772/731>
- Geluidnormering windmolens*. (s.f.). Obtenido el 28 de abril de 2024, del sitio Web: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/windenergie-op-land/wonen-windturbine/geluidnormering-windmolens>.
- Ley de disposiciones generales "Wabo" - Rijkswaterstaat Environment*. (s.f.). Obtenido el 28 de abril de 2024, del sitio Web: <https://rwsenvironment.eu/subjects/general-provisions-0/>.
- González-Longatt, F., Wall, P., & Terzija, V. (s.f.). *Efecto estela en el rendimiento de parques eólicos: Steady-state and dynamic behavior*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.053>
- Grogg, K. (s.f.). *Harvesting the Wind: The Physics of Wind Turbines*. Obtenido el 23 de octubre de 2022, del sitio Web: <http://digitalcommons.carleton.edu/pacp/7>.
- Gupta, R., Biswas, A., & Sharma, K. K. (2008). Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius-three-bladed Darrieus rotor. *Renewable Energy*, 33(9), 1974-1981. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2007.12.008>

- Islam, M., Ting, D. S. K., & Fartaj, A. (2008). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 12, Issue 4). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.023>
- Kaldellis, J. K., y Zafirakis, D. (2011). La (r)evolución de la energía eólica: Breve repaso de una larga historia. *Renewable Energy*, 36(7), 1887-1901. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2011.01.002>
- Kleine windmolens: wat kun je ermee en welke vergunningen heb je nodig? | HIER opgewekt.* (s.f.). Obtenido el 9 de febrero de 2023, del sitio Web: <https://www.hieropgewekt.nl/kennisdossiers/kleine-windmolens-wat-kun-je-ermee-en-welke-vergunningen-heb-je-nodig#omgevingsvergunning>.
- Koulatsou, K. G., Kazakis, G., Gantes, C. J., & Lagaros, N. D. (2020). Resonance Investigation and its Effects on Weight Optimization of Tubular Steel Wind Turbine Towers. *Procedia Manufacturing*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.198>
- Mark, S. (2013). The Earliest Sailboats in Egypt and Their Influence on the Development of Trade, Seafaring in the Red Sea, and State Development. *Journal of Ancient Egyptian Interconnections*, 5(1). https://doi.org/10.2458/azu_jaei_v05i1_mark
- Modi, V. J., & Fernando, M. S. U. K. (1989). On the performance of the savonius wind turbine. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 111(1). <https://doi.org/10.1115/1.3268289>
- Particuliere windmolens - van Doleweerd LAW.* (s.f.). Obtenido el 9 de febrero de 2023, del sitio Web: <https://www.vandoleweerdlaw.nl/particuliere-windmolens/>.
- Prevailing Winds | National Geographic Society.* (s.f.). Obtenido el 16 de octubre de 2022, del sitio Web: <https://education.nationalgeographic.org/resource/prevailing-winds>.
- Radar bij windprojecten.* (sin fecha). Obtenido el 28 de abril de 2024, del sitio Web: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/windenergie-op-land/radar-windprojecten>.
- Saad, M., Moh Saad, M. M., Asmuin, N., Tun Hussein Onn Malaysia, U., Raja, P., & Pahat, B. (2014). Comparación de aerogeneradores de eje horizontal y aerogeneradores de eje vertical. *Organización Internacional de Investigación Científica*, 04, 2-27. <https://doi.org/10.9790/3021-04822730>
- Schubel, P. J., & Crossley, R. J. (2012). Diseño de palas de aerogeneradores. En *Energies* (Vol. 5, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/en5093425>
- Slagschaduw bij windenergie op land.* (sin fecha). Obtenido el 28 de abril de 2024, del sitio Web: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/windenergie-op-land/slagschaduw>.
- Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, H., & Sopian, K. (2014). *Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations.* <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.038>
- Wakui, T., Tanzawa, Y., Hashizume, T., & Nagao, T. (2005). Hybrid configuration of darrieus and savonius rotors for stand-alone wind turbine-generator systems. En *Electrical Engineering in Japan (traducción al inglés de Denki Gakkai Ronbunshi)* (Vol. 150, Issue 4). <https://doi.org/10.1002/eej.20071>

Fundamentos de las torres eólicas. (s.f.-a). Obtenido el 6 de febrero de 2023, del sitio Web: www.homepower.com.

Fundamentos de las torres eólicas. (s.f.-b). Obtenido el 12 de marzo de 2024, del sitio Web: www.homepower.com.

Aerogeneradores: Fundamentos, Tecnologías, Aplicación, Economía - Erich Hau - Google Libros. (s.f.-a). Obtenido el 22 de octubre de 2022, del sitio Web: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=KeNEAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=how+do+wind+turbines+work&ots=Bd8UFZpbk0&sig=c_X1uPcLp7vhlwb5fJ36RSYTOcw#v=onepage&q&f=false

Aerogeneradores: Fundamentos, Tecnologías, Aplicación, Economía - Erich Hau - Google Libros. (s.f.-b). Extraído el 4 de marzo de 2024, de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=KeNEAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=wind+turbines&ots=Be2XGZj4mX&sig=xx2ENSjFdV4CBFvX8JNrYG7xrds#v=onepage&q=wind%20turbines&f=false>

10.- Normas técnicas

(Geluidnormering Windmolens, s.f.)

(Radar Bij Windprojecten, s.f.)

(Slagschaduw Bij Windenergie Op Land, s.f.)

(Externe Veiligheid, s.f.)

11.- Legislación

(Ley de Disposiciones Generales "Wabo" - Rijkswaterstaat Environment, s.f.)

12.- Conclusiones personales

La instalación de una turbina eólica en una casa en los Países Bajos puede ser un proyecto difícil por diferentes motivos. La legislación restringe la proliferación de aerogeneradores pequeños, lo que hace que el proyecto sólo sea adecuado para zonas concretas en las que los aerogeneradores cumplan todos los requisitos necesarios. Además, para que la instalación sea rentable, los aerogeneradores deben instalarse en zonas con altas velocidades de viento y muy pocos obstáculos en sus alrededores (para que el flujo de viento sea lo más laminar posible), e incluso entonces las investigaciones demuestran que muchos de los aerogeneradores apenas amortizan la inversión inicial.

Por eso, muchas personas consideran una opción más atractiva la instalación de paneles solares como fuente de electricidad. Sabiendo esto, en el anexo se estudiará si la instalación de un aerogenerador puede ser una buena opción en la ubicación elegida, en la que las condiciones serán ideales.