

Series in instrumentation technology and applications



Applied Instrumentation Student works

2021-2022 academic year

Editors: Trinitat Pradell José E. García Oscar Casas





ÍNDEX

Pròleg	1
Treballs	4
Exospheric Mass Spectrometer (EMS). The heart of a lunar sensor J. Bonet, G. Izquierdo, B. Ros, A. Sánchez, M. Sánchez	4
<i>James Webb Space Telescope: an Overview</i> A.Carceller, J. Grandes, G. Pascual, M. Torrecillas, O. Wojde	9
Capacitats dels sensors CMOS dins l'astronomia G. Eliasson, M. Lorenzo, A. Marzábal, R. Novel, I. Teixidó	14
Detecció i importància de senyals elèctrics en plantes R. Masagué, D. Alonso, D. Muñoz, E. Guardiola, O. Mayné	21
EEG headsets and its applcations A.Salvador, C. Arribalzaga, D. Jiménez, G. Castro, J. Gallardo	25
<i>Sensors Remots per l'arqueologia</i> J. Borràs, I. de Ciurana, D. Olivé , M.Piera, A. Pons	30
Aplicacions no invasives d'ultrasons focalitzats pel tractament de càncers O. Baldrís, P. Floriach, M. Molla, G. Roca, G. Rodrigo	34
Present and future of gravitational wave astronomy F. Cid, M. Delgado, P. Mercader, F. Muñoz, B. Ruscalleda	40
Generation and storage of energy through piezoelectric systems J. Estarellas, J. Gómez, E. Donada, M. Martí, E. Ruiz	44

"La creativitat és la intel·ligència divertint-se" Albert Einstein (Físic, 1879-1955)

Pròleg

La creativitat té poder i importància en tots els àmbits de les nostres vides i en totes les edats. Moltes vegades realitzar el que està dins del comú és el més acceptat i el més fàcil, però arriscarse a trencar esquemes pot arribar a ser un èxit. Avui dia, el món s'ha tornat en digital i hi ha nous problemes que necessiten noves solucions que han d'estar plenes de creativitat. De vegades es torna difícil sortir-se del que és habitual i de les limitacions o barreres que el món ens ha posat, però a poc a poc s'ha de reconèixer el valor del nou, nou i creatiu al món, i la instrumentació electrònica ha d'ajudar a fer-ho.

I és que la instrumentació és una branca cientifico-tècnica que té com a objectiu millorar la capacitat de percepció de la realitat mitjançant l'ús de qualsevol tipus de tècnica i sistema. Aquesta percepció de la realitat fa referència a l'extracció de la informació de l'entorn mitjançant la identificació i la quantificació de les seves característiques variables. Des de l'antiguitat, la instrumentació i la mesura han estat una necessitat vital per a l'home, però és amb l'aparició dels primers dispositius electrònics, al començament del segle XX, que la instrumentació electrònica s'ha començat a desenvolupar exponencialment i ha permès que els avenços hagin arribat a qualsevol àmbit d'aplicació. Equips i instruments que diferencien i identifiquen automàticament les persones pel núvol de partícules biològiques que els envolten, o altres que permeten transduir els pensaments en accions de control ja no són únicament un efecte utilitzat en pel·lícules de ciència ficció, sinó una realitat cada cop més present a qualsevol aplicació del nostre entorn. Per això, el futur de la instrumentació no sols està lligat als desenvolupaments físics i electrònics, molt important, sinó també a la creativitat dels enginyers actuals i futurs.

Aquest llibre recull els treballs realitzats pels alumnes d'Enginyeria Física de la Universitat Politècnica de Catalunya dins l'assignatura d'Instrumentació al curs acadèmic 2021-2022, i presenten l'ús de tècniques instrumentals modernes en diferents àmbits d'aplicació: astronomia, salut, arqueologia,.... Esperem que la lectura sigui una motivació que permeti, en un futur no gaire llunyà, el desenvolupament per algun de vosaltres d'alguna tècnica instrumental que superi l'estat de l'art presentat en aquest llibre.

Barcelona, juny 2022 José E. García Trinitat Pradell Oscar Casas Professors de l'assignatura d'instrumentació

Exospheric Mass Spectrometer (EMS). The heart of a lunar sensor

Jana Bonet, Gemma Izquierdo, Berta Ros, Aina Sánchez, Miquel Sánchez Instrumentació. Grau en Enginyeria Física. Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Nord, 08034 Barcelona

The study of lunar water cycles has been of interest for years now, and it has been studied with the help of detectors such as NMS. This sensor allows to determine the composition of the Moon's exosphere with the help of mass spectrometry and is part of the PITMS instrument, which was carried to the moon in 2021 under Nasa's Artemis programme. In this article, its main parts and inner workings, as well as requirements and adaptations needed for outer space are discussed and analyzed.

I. INTRODUCTION

Over the last years and through the different missions to the Moon, the evaporation and absorption cycles of the gasses that compose the lunar atmosphere have been modeled. From Apollo 17, it was discovered that the concentration of argon in the lunar atmosphere would decrease at night due to the cooling of the lunar surface (absorption of the gas) and it would increase again after sunrise. **[1]**

In order to study the thin atmosphere and the conditions near the lunar surface, in 2013 the robotic LADEE mission was launched, which would spend 100 days orbiting the moon to get the desired data using, among others, a neutral mass spectrometer (NMS). The aim of this paper is to get some insight into this sensor, focusing on the specifications and modifications it has undergone with respect to previous models of NMS. [3]

II. How does a NMS work?

A NMS is based on mass spectrometry to analyze exospheric gas samples, and is provided of an ion trap and several guiding systems for molecules (Figure 1).

A) MS OPERATION

A mass spectrometer is a sensor that measures the mass-to-charge ratio (m/Q) of one or more molecules present in a sample. These measurements can often be used to calculate the exact molecular weight of the sample components as well. Typically, mass spectrometers can be used to identify unknown compounds via molecular weight determination, quantify known compounds, and determine the structure and chemical properties of molecules.

Four basic components are, for the most part, standard in all mass spectrometers: a sample inlet, a mass analyzer and an ion detector. The sample inlet lets the sample get into the sensor, the ionization source ionizes the particles so that we are able to measure inert species, mass analyzers separate the ions according to their mass-to-charge ratio, and they use the Lorentz force

(1)
$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{Q} \left(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \right)$$

from which we can deduce the mass-to-charge ratio:

(2)
$$(\frac{m}{Q}) a = E + v \times B$$

The final element of the mass spectrometer is the detector, which records either the charge induced or the current produced when an ion passes by or hits a surface.



FIG. 1: Schematic view of the NMS [1]

Typically, some type of electron multiplier is used, though other detectors including Faraday cups and ion-to-photon detectors are also used in order to have a greater charge to be measurable. For our purposes, the NMS has some specific components that will be exposed in what follows.

B) OPEN SOURCE AND CLOSED SOURCE (OS/OC)

OS/CS consists of two separate modules: In each module there are two filaments that are operated separately, and the current and voltage of each filament are controlled by two DACs. The emission level is programmable as a function of current and usually set between 50 uA and 20 uA. The electrode voltages are regulated to 2 % absolute and 0.5 % relative accuracy. [1]

CLOSED ION SOURCE

The closed ion source consists of a spherical antechamber with a small aperture through which the gas sample flows, from a nearly 2π steradian range [6]. The gas is then thermalized with the walls, and a small fraction is ionized, and then led to the lens focusing system through another small exit hole and towards the mass spectrometer.

OPEN ION SOURCE

The Open Ion Source (OIS) measures species such as O and N that are destroyed or transformed by collisions in the closed ion source.

A sample of gas is captured from the atmosphere, and before anything, exospheric ions are discarded with a set of electrodes and only neutral molecules remain. These molecules enter the ionization chamber and cross a beam of electrons created by a heated filament composed of 7 % tungsten, 3 % rhenium, 0.0127 cm in length, and 6 coils. A fraction of these particles will be ionized and then led to the mass analyzer through the electrostatic deflector. The percentage of molecules of a gas ionized is directly related to the energy of the emitted electrons.

The electrostatic deflector bandpass is of 25 eV, and then these ions enter the quadrupole mass spectrometer.

C) QUADRUPOLE MASS ANALYZER AND DETECTOR

The quadrupole mass analyzer consists of four cylindrical rods, set parallel to each other. Each opposing rod pair is connected together electrically, and a radio frequency voltage with a DC offset voltage is applied between one pair of rods and the other. Ions travel down the quadrupole between the rods. Only ions of a certain mass-to-charge ratio will reach the detector for a given ratio of voltages: other ions have unstable trajectories and will collide with the rods. In the case of the NMS onboard the LADEE, two fixed frequencies were used over the 2–150 Da mass range: 3.0 MHz for the mass range 2 to 19.5 Da and 1.4 MHz for the range 19.5 to 150.5 Da. More generally, the voltages $(Vdc + Vaccos(\omega t))$ and $-(Vdc + Vaccos(\omega t))$, where ω is the frequency of Vac, are applied to opposite rod pairs resulting in a two-dimensional quadrupole field. Furthermore, the Vdchas an additional voltage added to it that is a function of the mass. This voltage is adjusted to allow ions to spend sufficient time in the mass resolving field thus reducing the mass peak width and hence increasing the mass resolution. The resolution will also depend on many parameters such as the length of the analyzer. The analyzer has to be long enough to allow the distinction of the different trajectories. The time required to allow this will depend on the wavelength of the ion motion.

After exiting the quadrupole mass analyzer, the ions encounter two identical detection chains composed of a series of ion focusing lenses, a channel electron multiplier, a pulse amplifier, a pulse height discriminator, and a counter. The ion focusing lens system consists of four lenses positioned between the exit of the quadrupole analyzer and the entrance of the multipliers. A voltage ranging from -200 V to 550 V is applied to each lens to focus the ions exiting the analyzer into the detectors. The detector used in this case is an electron multiplier which is a serial connection of discrete metal plates called dynodes

that amplifies a current of ions by a factor of $\sim 10^8$ into a measurable current of electrons. When an ion enters the electron multiplier, it is stopped by the first conversion dynode. The energy of the impact is dissipated in part by the ejection of electrons from the dynode material, creating an electrical charge. The number of secondary electrons released depends on the type of incident primary particle, its energy, and the characteristic of the incident surface. Additional secondary electrons are ejected by a cascade process through subsequent dynodes. At the final dynode, the accumulated charge is measured as a voltage pulse. The multipliers can count single ions with a dynamic range of

 10^6 Hz. Beyond this count rate, the detector will begin to suffer from two different phenomena. The first is a "dead time" effect, which refers to the amount of time the detector is not functioning while it is processing signals already received (measured in ns). The second is a quasi-simultaneous arrival effect, where two ions strike the conversion dynode of the electron multiplier at once but it is only recognized as a single ion.

III. THERMAL DESIGN

One of the main issues that needed to be taken care of when launching this kind of sensor into space, was the wide range of temperatures it would be subjected to. Specifically, the sensor would be exposed to solar radiation of the order of more than 1000 W/m^2 when passing through the sun-exposed face and only a few W/m^2 when passing through the dark face of the moon.

Most materials used to build NMS have different responses depending on the temperature they are working at. For this reason, those thermal effects must be taken into consideration to avoid wrong measurements. Our sensor could work between -20 °C and +65 °C without having damaging effects on its components, but to protect the electronics, requirements were narrowed down to -20 °C - 40 °C. To maintain this range of temperatures throughout the whole mission, the sensor was equipped with thermal control elements such as an aluminum heat strap and a multi-layer insulator.

All these modifications increased the amount of time that the sensor could be working; it could take samples during almost the whole duration of the lunar orbit. Without these elements, it was only possible to use the sensor under the right environmental conditions. However, it was possible that the sensor would heat up over the higher temperature limit during the hotter part of the orbit. In that case, the sensor should be turned off during a short period of time to avoid damaging its components. [1]

III. QUALIFICATION AND CALIBRATION

The sensor underwent a series of tests to check its performance under the environmental conditions of the Moon's exosphere and scientific conditions imposed by the LADEE mission. Also, it had to be ensured that it would tolerate the launch of LADEE.

А) Емі/емс

To account for the interaction of the NMS with the rest of the spacecraft, the NMS and its cabling system were subjected to testing to determine which frequencies would interfere with its proper functioning and if its radiated frequencies would interfere with other instruments. This was achieved through an electromagnetic interference and compatibility (EMI/EMC) test. The results showed that it emitted normally (within the test limits) except for three frequency ranges: 40–180 MHz with a maximum 19 dB exceedance at 140 MHz, between 220–380 MHz with a maximum 16 dB exceedance at 320 MHz, and smaller deviations (< 3 dB) at 2.04 GHz and 2.06 GHz.[1]

However, these exceedances were not a problem, because they occurred during times where the NMS was turned off.

Electric field radiated susceptibility (RS) testing was also performed, and it was found that NMS performance was not affected for fields between 2 MHz-18 GHz, as well as conducted susceptibility testing, from which it was shown that there was no degradation in its performance when exposed to RF signals. **[8]**

B) THERMAL BALANCE AND VACUUM TESTS

In order to validate the thermal model, which is used to predict temperatures for different phases of the mission, the NMS instrument underwent a thermal balance test with thermal blankets (textile insulators made of wool based on alkaline earth silicates). The tests subjected the sensor to three different thermal balance temperatures, thus covering the NMS operational temperature range. At every single balance temperature, several phases of the LADEE lunar orbit were conducted to mimic subsolar and cold orbit operation. The obtained results were used to modify the thermal model in a way that an instrument power dissipation of 34 W was measured. The thermal model was used to simulate on-orbit temperature of -40 °C. The NMS was maintained at this temperature by its survival heaters for 4 hours, and it successfully powered afterwards.

The NMS instrument also underwent thermal vacuum tests, with the goal of allowing more efficient temperature transitions in thermal cycling. Thermal cycles were performed between -30 °C and +50 °C. Comprehensive

Performance Tests (CPT) were conducted at each temperature plateau and several transitions. Mass tuning activities were performed at different temperatures with the aim of compensating thermal effects in RF electronics. Altogether, CPT results revealed favorable performance from both engineering and science perspectives. [1]



FIG. 2: Illustration of the thermal and vacuum tests. [1]

C) SENSIBILITY

One of the greatest challenges of this mission was the fact that the measurements of the different species in the lunar atmosphere had to be done while the sensor was moving (LADEE was constantly orbiting the moon). That is, the amount of time available to make the measurement was really short. Furthermore, the exosphere of the moon has a very low density, which implies that the probability of detecting the desired molecules is lower. In order to solve this problem, scientists worked to increase the sensibility of

the sensor to a nominal sensibility for Argon-40 of $2.3 \cdot 10^{-2}$ counts/s. This sensibility is considerably higher than any of the previous NMS models designed until then. [1]



FIG. 3: Instrument performance during calibration (noble gasses were introduced). [1]

SENSITIVITY DEPENDENCE WITH TEMPERATURE

The warming up of the instrument's electrical and mechanical components due to the dissipated electrical energy leads to variations of the sensitivity sensor. These alterations are mainly caused by two sources:

• Shifting of the location of mass peaks caused by RF thermal drift. As a result of the fringe field effects in the quadrupole rods, the transmission of the mass filter varies for small excursions from the target mass. This creates small structures in any given mass peak. As the RF electronics warm-up, the AC and DC analogue outputs drift slightly.

These voltage deviations result in a slight alteration (up to 0.2 Da) of the selected mass on the targeted peak and therefore the on observed count level. Given the case that the density of the measured gas is constant, this shift manifests as a sensitivity change, whose amplitude is temperature and mass dependent, for the measured species. After submitting the sensor to thermal tests in which the instruments were operated at a wide range of temperatures (from -30 °C to 50 °C), it was shown that the maximum perceived sensitivity change (17.6%) was with a mass of 36 uma.

• Thermomolecular pressure difference between the hot closed source (CS) and the much cooler sensor. As the NMS requires a hot filament, there is a considerable scope of temperatures in which there is a non-uniform distribution of gas density. Taking into account the hydrostatic equilibrium for a collision less gas in a bounded system, such as the closed source, which is

(3)
$$nc=constant$$

(being n the local gas density and $c = \left(\frac{kT}{2\pi m}\right)^{1/2}$, with effective gas temperature T), the spacecraft velocity and the exospheric velocity distribution, the flux of atoms out of the instrument at the interface of the CS entrance and the lunar exosphere can be calculated, from which thE relationship of detector output, delta (counts per second), to the concentration of atoms in the exosphere can be deduced.

The time dependence of the temperature of the closed source, TCS, as it is heated by the active filament has been determined from several measurements of the 36Ar peak, in-flight but before the cap was ejected. The data fitting strongly suggests that TCS (t)

(4)
$$T_0 = 1 + \alpha (1 - e^{-t/\tau})$$

is a good approximation for modes of operation in which only the CS is active, and the CS is active continuously. [1]

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

As predicted from other missions, the lunar atmosphere is dominated by Argon and Helium, [4] but the LADEE's mission finally confirmed for the first time after years of speculation the important presence of Neon in it.

This mission also provided the necessary data to tune the models that predicted the abundance of determined substances depending on the time of the day on the moon. It showed that the concentration peak of Argon occurs at sunrise, Neon at 4 a.m. and Helium at 1 a.m.

The atmosphere of the moon is really thin and this is because the moon's mass is not high enough to keep the particles of the gas close. The reason why there is always an exosphere surrounding the moon is because of the solar wind and constant collisions which release Argon, Helium and Neon (among others) on the moon's surface.

In addition, the NMS showed that some of the Argon-40 present on the exosphere is due to the decay

of naturally occurring radioactive potassium-40. In the same way, 20 percent of the Helium is also coming from the moon's surface; it is the result of the radioactive decay of thorium and uranium (found in lunar rocks). **[5]**

V. CONCLUSIONS

Thanks to improvements in measurement and detection techniques, it has been possible to achieve a design of the NMS ideally fitted to work in conditions such as the space vacuum and temperatures, as well as to resist the launch and many other challenges a space mission presents.

VI. REFERENCES

[1] Mahaffy, P.R., Richard Hodges, R., Benna, M. et al. The Neutral Mass Spectrometer on the Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer Mission. Space Sci Rev 185, 27–61 (2014). <u>https://doi.org/10.1007/s11214-014-0043-9</u>

[2] Halekas, J. S., Benna, M., Mahaffy, P. R., Elphic, R. C., Poppe, A. R., & Delory, G. T. (2015). Detections of lunar exospheric ions by the LADEE neutral mass spectrometer. Geophysical Research Letters, 42(13), 5162-5169.

[3] Jessica Culler (2014). LADEE's Science and Instruments. NASA (web page): https://www.nasa.gov/mission_pages/ladee/science/index.ht ml

[4] Rick Elphic (August 2015). LADEE Project Scientist Update. NASA (web page): https://www.nasa.gov/ames/ladee/ladee-project-scientist-up date-august-2015

[5] William Steigerwald (August 2015, Maryland). NASA's LADEE Spacecraft Finds Neon in Lunar Atmosphere. NASA (web page): https://www.nasa.gov/content/goddard/ladee-lunar-neon

[6] Park, C. J., & Ahn, J. R. (2005). A closed ion source with a cylindrical repeller for sensitivity enhancement in quadrupole mass spectrometry. Review of Scientific Instruments, 76(4), 044101.doi:10.1063/1.1889447

[7] Analyzers, R. G. Choosing a Quadrupole Gas Analyzer.

[8] Valavan, S. (2014). Understanding electromagnetic compliance tests in digital isolators. White Paper, Texas Instruments.

We have studied how the various special requirements were adapted to the NMS to meet specifications for the LADEE mission, the inner workings of all its components and the working of the instrument as a whole. Different testing was performed on the NMS before sending it on its mission, and it was found to have exceptional sensitivity and adaptability to the conditions it would be exposed to.

This mission, with the help of the NMS, will help us quantize the composition of the lunar exosphere with more precision, with the hope of someday using this knowledge to put the first human settlement on the Moon.

James Webb Space Telescope: an Overview

Amadeu Carceller, Joan Grandes, Guillem Pascual,

Marc Torrecillas and Oskar Wojdeł

Instrumentació. Grau en Enginyeria Física. Universitat Politècnica de Catalunya Campus Nord, 08034 Barcelona

The James Webb Space Telescope (JWST) is one of the most important and powerful tools in modern astronomy and astrophysics.

In this article we present a short summary of the main capabilities and tools that JWST has. They consist of a set of four different sensors, namely: Near Infra-Red Camera (NIRCam), Near Infra-Red Spectrograph (NIRSpec), Near Infra-Red Imager and Slitless Spectrograph (NIRISS), and Mid Infra-Red Instrument (MIRI).

We also do a short overview of their predicted uses, and anticipated measurements and observations which JWST will hopefully enable for the first time.

I. INTRODUCTION

The James Webb Space Telescope (JWST) is one of the most advanced telescopes ever built. As its name suggests, it is a space telescope, just like the Hubble Space Telescope (HST), which it is a spiritual successor of.

Despite the great success of the HST, it is now over 30 years old. As such, it has become very outdated; not obsolete, it is still a very important and useful tool, but a 30 year old telescope, last serviced in 2009, simply cannot be expected to keep up with the newest technological advancements.

One of the problems Hubble has is that its orbit is only 95 minutes long; it spends about 45 minutes in the Sun, without protection from the atmosphere, and another 45 minutes in the Earth's shadow. This prevents it from using the most advanced and sensitive instruments, because in spite of the New Outer Blanket Lavers (NOBLs) which protect it from the Sun on one side, and from the cold on the other, those instruments would not withstand the changes in temperature which are unavoidable in such an orbit.

Which is why, unlike the HST, which orbits the Earth, the JWST actually orbits the Sun and the Earth simultaneously, in such a way that it is always on the opposite side of the Earth from the Sun (the three are always aligned in the order Sun-Earth-JWST). It is in "orbit" around the L2 point, the second Lagrange point (of the Sun-Earth system), although in reality the L2 is just a point in space, there is nothing actually there. This surprisingly means that it is always in the Sun; however, at the same time, the Earth and Sun and Moon are always on the same side (all three are close enough and bright enough to interfere), which means only one side needs to be shielded.

In particular, the JWST includes a tennis court-sized rhombic sunshield; five separate layers of Kapton coated with aluminum, one on top of the other. The temperature on the sunny side is 85° C, while the temperature in the shade is -233° C, which is what allows JWST to use its four main sensor arrays (one of which actually needs to be cooled down to even lower temperatures using active cooling). Another advantage of this positioning is that in contrast with the HST, the temperature is much more stable, so the telescope does not need to be designed to withstand temperature changes, and the mirrors only need to be aligned once.

The main goal of the JWST is to study the universe in the near (0.5 - 5 microns) and mid (5 - 30 microns)infra-red regions of the electromagnetic spectrum. In order to do so, JWST carries 4 main scientific instruments: Near Infra-Red Camera (NIRCam), Near Infra-Red Spectrograph (NIRSpec), Near Infra-Red Imager and Slitless Spectrograph (NIRISS), and Mid Infra-Red Instrument (MIRI).

In a way, JWST is meant to pick up where HST left off: HST has been looking ever farther into the past of the universe by taking photos of faraway galaxies, but there is a limit to its sensitivity, due to three separate factors. As has already been discussed, thermal variations, together with a fixed mirror size, impose an upper limit on the signal-to-noise ratio that can be achieved. But most fundamentally, the HST simply cannot reach the wavelengths necessary to see any further into the past: the light from objects that are so far away gets red-shifted into the infrared region, while the HST mostly sees visible light, so these objects become even fainter than they already are.

II. INSTRUMENTS

In the following sections the four instruments will be discussed, along with their strengths and main modes of operation. Furthermore, some examples of their expected uses will be given when appropriate (especially since in some cases the instruments have elements or mechanisms specifically designed to do some particular observations).

A. NIRCam

The main purpose of the Near Infrared Camera (NIR-Cam) is to produce high resolution images in the range from 0.6 microns to 5 microns. Besides, it performs other important functions, like wavefront sensing and grism slitless spectroscopy. It operates at 37 K (NIR instruments operate at temperatures near 30 K).

NIRCam consists of two nearly identical modules which can operate simultaneously (Figure 1). These modules can be thought of as two cameras located side by side. Each module has two channels, one for short wavelenghts $(0.6 - 2.3\mu m)$ and another for long wavelenghts $(2.4 - 5\mu m)$. Light is divided by a dichroic beam splitter and sent to one of the channels.



FIG. 1. Schematic representation of the two NirCam modules. Image taken from the JWST User Documentation webpage [1]

NIRCam has twenty-nine filters available for its imaging functions. These filters can be extra-wide, wide, medium or narrow. After being filtered, the incident photons are finally absorbed and converted into electric voltages in the detectors. NIRCam has ten mercurycadmium-telluride (HgCdTe) detector arrays. These detectors can sense longer or shorter wavelengths depending on the ratio of mercury to cadmium. This property has been used to ensure that each NIRCam detector has peak performance over the specific wavelengths for which it will be used.

NIRCam has five observing modes for science: imaging, coronagraphic imaging, wide field slitless spectroscopy, time-series imaging and grism time series. Coronagraphy enables high contrast imaging. NIRCam is equipped with three round- and two bar-shaped coronagraphic masks in each module. These masks, combined with two Lyot stops, suppress diffracted light of a selected bright object to reveal much fainter objects nearby.

Even though NIRCam is mainly a camera, it can also perform some spectroscopy functions. In order to do so, each module has two grisms installed in the long wavelength channel. Grisms are a combination of a prism and a diffraction grating. The ones in NIRCam, together with specific filters, perform slitless spectroscopy with a power of resolution $R = \lambda/\Delta\lambda \sim 1600$, where $\Delta\lambda$ is the spectral resolution.

Apart from the above mentioned observing modes for imaging and spectroscopy, NIRCam has also been designed to obtain wavefront sensing measures. These measures are used for the alignment and phasing of the eighteen primary mirrors of the telescope, allowing them to act as a single telescope. For more details see [1], [2].

B. NIRSpec

The Near Infrared Spectrograph (NIRSpec) functions as the JSWT's main spectrograph. It has 4 different observing modes, which allow it to have a wavelength range of 0.6 to $5.3\mu m$ and resolving powers ranging from ~ 100 to ~ 2700[3]. Thanks to its modes, NIRSpec can be used for many different purposes, including statistical survey spectroscopy for galaxy formation and evolution studies, characterization of stellar populations, spatially resolved spectroscopy of extended targets, and characterization of exoplanet atmospheres using transit observations.



FIG. 2. Schematic layout of some of the elements that constitute NIRSpec. Image taken from https://doi.org/10.48550/arxiv.2202.03305

[4]

Although the NIRSpec follows the same principles as a regular spectrograph, its functioning has a key difference which allows it to be much more efficient. The light from the optics instrument is filtered and reflected off a curved mirror, similarly to a regular spectrograph. However, it is then passed through around 250,000 micro-shutters. These are tiny windows with a size of $100-200\mu m$. They are made of silicon nitride, which allows them to move at cryogenic temperatures without breaking. Prior to a measurement, certain shutters are selected by giving them a small electric charge. This makes them open

when a magnetic arm is moved across them, while the rest of the shutters remain closed. As a result, the light only passes through the open shutters. This allows NIR-Spec to take the spectra of over 100 targets simultaneously without contamination from the background or other nearby objects[3]. The distribution of these elements can be seen in Figure 2.

C. NIRISS

The Near Infrared Imager and Slitless Spectrographer is mainly used as a complement for NIRSpec and NIR-Cam, however it has some unique features that make it useful to study exoplanets and distant galaxies. Its wavelength range goes form 0.8 to 5 microns. It is packaged with the Fine Guidance Sensor (FGS), which is functionally independent and provides the telescope with an excellent precision to point at distant astonomical objects.

NIRISS optical path is similar to the one in NIRCAM, but simpler, it ends up with a single Hawaii 2RG sensor chip array. It also contains, a pupil and a filter wheel, that enable four distinct observing modes:

- Wide Field Slitless Spectroscopy: Low resolution, $R \approx 150, 0.8 - 2.2 \mu m, 2.2' \times 2.2'$ field of view. It uses a pair of grisms that disperse along the direction of fast and slow readouts. Can be used in parallel observing mode, or to detect high-redshift emission-line galaxies.

- Single Object Slitless Spectrescopy: Medium resolution, $R\approx700,\ 0.6-2.8\mu m.$ It produces three orders of cross-dispersed spectra of bright objects. It is the NIRISS time series observation mode, so it has to be highly precise, it's main usage is to obtain spectra of transiting exoplanets around stars with J-band Vega magnitudes between 7 and 15.

- Aperture Masking Interferometry: High spatial resolution, moderate contrast imaging at 2.8, 3.8, 4.3 and $4.8\mu m$. It uses an opaque mask with seven holes, that let light through. This converts the full aperture of JWST into an interferometric array. The apertures are placed in such a way that the vectors between the centres of each of them generate fringes with unique frequencies in the image plane. As a result, the interferograph is sharper than the one obtained with direct imaging. This mode interferometry can resole objects close as $\delta\theta = 0.5\lambda/D$, corresponding to Michelson criterion, in front of the Rayleigh criterion, $\delta\theta = 1.22\lambda/D$.

- Imaging: Multi-wavelength imaging, $2.2' \times 2.2'$ field of view. It is mainly used in parallel observations with NIRCam i.e. they operate simultaneously, each viewing a different part of JWST focal plane. This enhances the efficency and information of the data obtained.

As an example of the functioning of the wheels shown in 3, if Aperture Masking Interferometry is to be enabled, the pupil wheel must be set at NRM, and the filters can vary between F277W, F380M, F430M and F480M.



FIG. 3. Representation of the pupil and filter wheels. Image taken from the JWST User Documentation webpage [1]

D. MIRI [5]

The fourth main instrument of the telescope is the Mid-Infrared Instrument(MIRI), whose sensors cover wavelengths from 4.9 to 28.8μ m. Among other possibilities, this range allows it to receive even the low-energy thermal radiation from exoplanets, or observe absorption lines from atmosphere gases like H_2O or NH_3 , and especially transition lines from organic molecules which often fall in this zone of the spectrum. MIRI mainly consists of three parts: the Optical Module, which contains the Imager, the Medium-Resolution Spectrometer (MRS) and the Input Optics and Calibration unit; the cooling system; and lastly the electronics that control the mechanisms of the instrument and the focal plane modules.

Radiation incoming from the outside enters the optical module from the pick-off mirror in the Input Optics and Calibration unit. The part of the focal plane received is divided into two regions, that go to the Imager and to the MRS, respectively. The first unit is used for imaging, with and without coronagraphs, and low-resolution spectrometry; while the second is used for spectrometry with higher resolution in the mid-infrared range of the spectrum.



FIG. 4. Overview of the MIRI optical architecture, showing the primary components. Image taken from http://ircamera.as.arizona.edu/MIRI/paper2.pdf

The focal plane that goes into the Imager is partitioned into three zones(5). One of them passes through the coronagraph, a device designed to eliminate the light coming from a brighter or closer star, in order to observe objects which are much less intense, like planets or galaxies. This is done either by blocking the light (Lyot stops) or creating a destructive interference of the light with itself (4 quadrant phase masks). The second part of the plane is a small slit that directs light for the Low-Resolution Spectroscope, which covers wavelengths of 5 to $10\mu m$. The third part of the focal plane is the largest, and is used for normal imaging. Light from all three sections goes into a series of mirrors that direct it through a filter that can be selected from a wheel before arriving at the Focal Plane Module (FPM), which contains a detector array of 1024×1024 cells, that finally takes the whole image of these three parts. This process is shown in this animation by the ESA.



FIG. 5. The positions of the MIRIM and MRS fields of view in the JWST focal plane. Image taken from http://ircamera.as.arizona.edu/MIRI/paper2.pdf

The other region of the entire focal plane received by the telescope goes into the MRS unit. Using an Integral Field Unit, the spectrum of the whole plane will be obtained, which is more detailed than those obtained from a single slit. Light first passes through the Spectrometer Pre-Optics, which consist of a series of mirrors and prisms that spread the light into wavelengths, generating the spectrum. Then the spectrum is divided into 4 channels (two for short wavelengths, and two for long ones). Each one of them can be also adjusted on three different bands, but only one of the three can be used at the same time for each channel. Finally, each pair of channels (short and long) is headed to one of the two FPMs, that take the image of the selected parts of the spectrum. The path of each channel is shown in detail in this animation by the ESA.

In order to detect even the faintest signals observable by the instrument, the MIRI needs to avoid interference as much as possible. It is well known that bodies emit thermal or blackbody radiation, which increases with their temperature. Because of this, in order to be precise and avoid interference and noise from themselves, the FPMs need to be very cool. As it has been explained in the introduction, the sunshield of the telescope cools it down to a temperature of about 40 K, however, as MIRI works with longer wavelengths, it needs an even lower temperature, lower than 6.7 K. To achieve this, the MIRI has an additional system of refrigeration that uses helium cooled by a Joule-Thompson process of expansion.

III. CONCLUSION

As has been seen, JWST includes four scientific instruments, each designed to operate in some particular way. However, despite being so specialised, they include enough options and settings to be highly versatile within their own areas of operation. This is logical given how expensive JWST has been, and how hard it would be to modify or repair it in any way: JWST's placement is probably its biggest drawback as it is pretty much inaccessible now.

Overall, JWST rightfully deserves a place among the most advanced and important research tools humans have ever built, perhaps along with the Large Hadron Collider, or the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory.

- JWST User Documentation, https://jwst-docs.stsci. edu/jwst-near-infrared-camera (), accessed: May 6, 2022.
- [2] L. G. Burriesci, NIRCam Instrument Overview, SPIE 5904, Cryogenic Optical Systems and Instruments XI (2005), https://doi.org/10.1117/12.613596.
- [3] JWST Near Infrared Spectrograph, https://jwst-docs. stsci.edu/jwst-near-infrared-spectrograph# JWSTNearInfraredSpectrograph-ref (), accessed:

May 15, 2022.

[4] P. Jakobsen, P. Ferruit, C. A. de Oliveira, S. Arribas, G. Bagnasco, R. Barho, T. L. Beck, S. Birkmann, T. Böker, A. J. Bunker, S. Charlot, P. de Jong, G. de Marchi, R. Ehrenwinkler, M. Falcolini, R. Fels, M. Franx, D. Franz, M. Funke, G. Giardino, X. Gnata, W. Holota, K. Honnen, P. L. Jensen, M. Jentsch, T. Johnson, D. Jollet, H. Karl, G. Kling, J. Köhler, M. G. Kolm, N. Kumari, M. E. Lander, R. Lemke, M. López-Caniego, N. Lützgendorf, R. Maiolino, E. Manjavacas, A. Marston, M. Maschmann, R. Maurer, B. Messerschmidt, S. H. Moseley, P. Mosner, D. B. Mott, J. Muzerolle, N. Pirzkal, J. F. Pittet, A. Plitzke, W. Posselt, B. Rapp, B. J. Rauscher, T. Rawle, H. W. Rix, A. Rödel, P. Rumler, E. Sabbi, J. C. Salvignol, T. Schmid, M. Sirianni, C. Smith, P. Strada, M. t. Plate, J. Valenti, T. Wettemann, T. Wiehe, M. Wiesmayer, C. J. Willott, R. Wright, P. Zeidler, and C. Zincke, The Near-Infrared Spectrograph (NIRSpec) on the James Webb Space Telescope I. Overview of the instrument and its capabilities (2022).

 [5] MIRI Encyclopedia by the University of Arizona, http:// ircamera.as.arizona.edu/MIRI/encyclopedia.htm, accessed: May 13, 2022.

Capacitats dels sensors CMOS dins l'astronomia

Guillem Eliasson Silvestre, Miriam Lorenzo Laguno, Arnau Marzábal Gatell, Raquel Novel Ortega, Isabel Teixidó Moreno

Instrumentació. Grau en Enginyeria Física. Universitat Politècnica de Catalunya.

Campus Nord, 08034 Barcelona

La detecció de fotons en l'àmbit de l'astronomia és una tasca complexa que s'ha desenvolupat durant el segle XX, i per a la qual actualment tenim disponibles dos tipus de sensors, els CCD (Charge Coupled Device) i els ATP (Active Pixel Detector), que utilitzen la tecnologia CMOS. Destacarem el darrer tipus de sensor, que redueix significativament el soroll aleatori, així comparant amb dos tipus de sensors en el seu funcionament.

Paraules clau: CMOS, CCD, EMCCD, Obturador global, Obturador rodant, Dark noise, Read noise

I. INTRODUCCIÓ

El descobriment del primer telescopi data de 1608. Va ser el primer aparell que va atorgar a l'ésser humà una millora en la visió de cossos celestes respecte l'ull nu. Des d'aleshores, els sensors relacionats amb l'astronomia han anat millorant les seves prestacions, i han sorgit els detectors de fotons. Tecnologies com la CMOS-ATP (Active Pixel Detector), CCD (Charge Coupled Device) i EMCCD (Electron Multiplying CCD), permeten una observació cada vegada més precisa dels cossos celestes. Cadascuna d'aquestes tecnologies és més útil en determinats contexts, ja sigui pel seu disseny, per les seves fonts d'error o pel seu cost i manteniment.

Per què és important tenir un sensor que ens per permeti fer lectures ràpides? No només per veure objectes en moviment, sinó que també és important a la hora de prendre decisions ràpides i aplicar correccions pertinents, per exemple, per adaptar-se a les condicions atmosfèriques.

Capturar objectes espacials no és en cap cas una tasca senzilla.. Per una banda, els objectes dels que volem obtenir una imatge estan a milers de quilòmetres de nosaltres cosa que implica que la senyal que ens arribi estigui molt atenuat. Pel mig hi haurà gasos, pols espacial i altres possibles cossos menors que difuminaran i empitjoraran la ressolucó de la imatge. Per altra banda, hi ha objectes de dimensions molt reduïdes i potencialment orbitant a milers de metres per segon, fent molt complicat el seu seguiment i la calibració del sensor.

II. SENSORS I CARACTERÍSTIQUES

Tots els sensors fotogràfics es basen en el mateix esquema de convertidors. Hi ha un receptor de fotons (fotoreceptor) que converteix els fotons que rep a càrrega, amb un condensador aquesta càrrega es converteix a voltage i aquest ja pot ser amplificat o directament llegit per un convertidor analògic digital (CAD). Ara bé, aquestes conversions es poden fer de moltes maneres i es aquí on es diferencien els tipus de sensors òptics. Típicament hi ha dos esquemes de funcionament que predominen els CCD/EMCCD i els CMOS.

CCD

Els *charge-coupled devices* o CCD van ser les primeres càmeres digitals que es van disposar per a la imatge científica. Els CCD han tingut un ús actiu en aquest sector durant dècades, ja que s'adapten molt bé en aplicacions d'alta lluminositat, com ara en la documentació cel·lular o en les imatges de mostres fixes. No obstant això, aquesta tecnologia manca en termes de sensibilitat i velocitat, limitant el nombre de mostres que poden ser capturades a nivells acceptables.

Els sensors CCD consisteixen en una matriu de fotoreceptors que durant el període d'exposició acumularant càrrega proporcional a la quantitat de fotons rebuts. En acabar el període d'exposició la càrrega generada a cada fotoreceptor s'anirà desplaçant fila per fila fins arribar al "readout" o zona de lectura on ens convertirà en tensió i finalment s'enviarà al CAD. Aquest traspàs de càrrega fila per fila és el tret característic d'aquest tipus de sensors. És important que el temps d'exposició sigui el mateix per a tots els fotosensors (per mantenir la coherència en la lectura) per això els sensors CCD utilitzen generalment un obturador mecànic per regular el temps d'exposició de la superfície sensible a la llum. Aquest consisteix en cortines d'obturació frontals i posteriors convencionals situades davant del sensor que s'obren i es tanquen. Aquest procés mecànic és relativament lent, la qual cosa condueix menys fotogrames per segon i errors quantitatius per a temps d'exposició més curts.

A més, els obturadors mecànics tenen una vida útil limitada i per tant l'ús intensiu de la càmera s'ha de complementar amb un sistema de manteniment freqüent. Això pot ser un repte per als observatoris en llocs remots.

EMCCD

Els electron multiplication charged-coupled devices o EMCCD sorgeixen uns anys més tard i ofereixen una millora en la rapidesa i la sensibilitat amb què es capturen les imatges. Aquests dispositius són útils per a imatges amb poca llum o inclús per al recompte de fotons. Aquestes millores són gràcies al fet que les càmeres estan retroil·luminades (augmentant la QE aproximadament un 90%), i que tenen píxels molt grans (16-24 µm), ambdós canvis augmenten molt la sensibilitat. L'addició més significativa, però, és la multiplicació d'electrons, que dona lloc al seu nom.

Molts sensors EMCCD tenen un obturador electrònic, de manera que l'exposició a la llum s'atura mitjançant el desplaçament dels fotoelectrons detectats а una àrea d'emmagatzematge abans de la lectura. Gràcies a aquest sistema, l'obturador electrònic no només és més precís que els obturadors mecànics, sinó que també dóna lloc a una important reducció del temps mort durant el qual la càmera no s'exposa a la llum. És a dir, com les exposicions posteriors poden començar a mesurar que es llegeix el senyal des de l'àrea d'emmagatzematge, es guanya velocitat de fotogrames. Això s'anomena "cicle de treball alt".



FIG. 1: Esquema de funcionament del sensor EMCCD.

CMOS

La principal característica dels sensor CMOS és el fet que cada fotoreceptor (o cada fila de fotoreceptors) te integrat el seu propi circuit electrònic amb el seu CAD propi, és a dir la sortida de cada fotoreceptor (o cada fila, depenent del model) és digital, a diferència dels sensors CCD. Aquest esquema es coneix amb el nom de paral·lelització. Si bé és cert que aquesta tecnologia existia ja d'abans dels CCD, no ha sigut fins als darrers anys que gràcies a millores en les seves característiques s'ha implementat en l'observació espacial.

Els sensors CMOS utilitzen **obturadors electròncis** precisos que permeten obtenir imatges continues **sense pèrdua de dades**. Normalment, els sensors CMOS fan el procés d'exposició, lectura i neteja del sensor fila per fila, mitjançant un procés anomenat obturador rodant ("Rolling Shutter").El fet, que el temps d'exposició no coincideix en el temps per a tots els fotoreceptors, pot introduir distorsions als objectes en moviment ràpid (shutter artifacts), retards entre fotogrames i dificultats amb la sincronització que serien perjudicials per a moltes aplicacions d'astronomia.



FIG. 2: [1] Diagrama de cronometratge d'adquisició per al funcionament del "Rolling Shutter". L'adquisició comença a la part superior del sensor, baixant fila per fila fins a la inferior. Aquest temps es coneix com el 'Frame Time'.

L'alternativa és **l'obturador global** ("Global Shutter"). Aquest llegeix i restableix tots els píxels del detector simultàniament, i per tant s'eviten les distorsions anteriors. Per aconseguir-ho els fotoelectrons s'han de moure immediatament a l'àrea d'emmagatzematge, pel que aquesta s'ha d'amagar sota els components del sensor. No obstant, això és difícil amb la tecnología retroil·luminada ja que aquesta àrea sol ser sensible a la llum.

Sigui com sigui el seu obturador, el procés de lectura dels senyals d'un sensor CMOS es fa **fila per fila**, ja que cada fila passa al seu convertidor analògic-digital (CAD) per mesurar-se. Per aconseguir un "global shutter", la seqüència d'exposició i lectura de cada fotograma és la següent [1]:

- 1. S'inicia l'exposició simultàniament de totes les files reiniciant les càrregues del fotodíode i l'emmagatzematge (anomenat difusió flotant, FD).
- 2. A continuació, es recullen fotons durant el temps d'exposició especificat.
- 3. Es finalitza l'exposició de la imatge i es guarden els fotoelectrons de cada píxel.
- 4. Fila per fila, es llegeix el voltatge corresponent a cada píxel de la FD.
- També fila per fila, es restableix la tensió de la FD al valor predeterminat i es torna a mesurar per guanyar precisió.

III.ERROR I SOROLL

Podem començar per identificar els tipus d'errors o incerteses que el nostres sensors poden presentar. Primerament, els **errors sistemàtics** son aquells que presenten una falta d'exactitud en la mesura que realitzem. Aquests errors es presentaran de manera previsible, per tant podem fer un model matemàtic en el temps del seu comportament i resoldre'ls amb **calibratge**.

D'altra banda tenim els **errors aleatoris**, que anomenarem pel seu sinònim "**soroll**" a partir d'ara.

El soroll introdueix menor precisió en les mesures, és a dir, els resultats difereixen en repetir les mesures en condicions experimentals similars, i per tant, no els podem modelar matemàticament. Dit això, ens centrarem en el soroll, doncs és comparativament més significatiu que l'error sistemàtic, que sempre es podrà tractar calibrant el sensor.

Signal to noise ratio (SNR)

El senyal d'un pixel és el nombre total de fotoelectrons detectats en aquell pixel, relacionat amb la "quantum efficiency" (QE). Quan més alta és aquesta, més alt el senyal.

D'altra banda, s'anomena soroll a l'error asociat amb cada mesura feta per cada pixel del sensor. El SNR serà cocient entre la senyal i el soroll generat en cada pixel, la qual cosa ens dona una idea de si tenim suficient senyal o no per a realizar una bona imatge. Si prenem *S* com el nombre detectat de fotons i σ i com els soroll de "photon shot"(S), tèrmic o "dark current" (D) i sorolls de lectura (R), que seguidament introduirem, ens queda definit el SNR com:

$$SNR = \frac{S}{(\sigma^2 S + \sigma^2 D + \sigma^2 R)^{1/2}}$$

Definició dels sorolls generals per cada sensors

Primerament, analitzem les fonts de soroll externes a la càmera. Tenim el "shot noise" del propi objecte astronòmic d'anàlisi i el soroll del propi cel astronòmic.

Veiem ara les fonts d'errors relatives a la càmera:

<u>Soroll lectura</u>, "read noise", "noise floor" o soroll de fons

És el soroll exisistent en el receptor quan no hi ha cap senyal a captar. Està generat per model electrònic de la càmera en fer la lectura de la càrrega emmagatzemada als pixels, generada per la connexió de cada component del sistema involucrat en passar el pixel a senyal. Veurem com tractar aquest tipus de soroll per tal d'aconseguir un SNR vàlid per l'observació.

• Soroll tèrmic o "dark current"

A l'utilitzar aquest tipus de sensors cal tenir molt en compte com afecta la temperatura a la sensibilitat del sensor i a la seva exactitud. En tots el detectors de fotons es genera un error anomenat "dark current", degut a que amb temps d'exposició llargs el sensor s'escalfa i els electrons de les capes de valencia exteriors s'ionitzen i queden lliures. Aquests **electrons lliures** - anomenats electrons tèrmics - generen un **corrent sorollós**, que s'afegeix al corrent natural generat pel sensor. El dark current és proporcional a la temperatura a la que es troba el sensor, i aquest efecte fa que en zones de la imatge que no estan exposades a llum generin un corrent "fals" dels electrons tèrmics.

<u>Photon shot noise</u>

Es deu a la fluctuació natural dels fotons, com una variable aleatoria de Poisson. És l'arrel quadrada del senyal i no hauria de ser més gran que l'error de lectura. Tampoc no pot ser controlat.

• <u>Soroll de "clock-induced charge" o</u> <u>"spurious charge"</u>

Està generada per la transferència de càrrega pel dispositiu, durant la qual hi ha una probabilitat d'ionització que s'afegeix a la càrrega real. Es pot reduir amb un filtre.

Soroll característic de cada sensor

CCDs

El sensor CCD és el que més perjudicat es veu pel soroll tèrmic, ja que requereix temps d'exposició molt elevats. La temperatura augmenta degut a que la ràpida commutació de càrregues a condensadors requereix corrents elevats que inevitablement dissipen calor. Això també implica que com a més freqüència s'estigui treballant més *dark current* apareixerà. A la figura veiem com augmenta la temperatura en funció del temps d'exposició d'un sensor CCD¹



FIG 3: Temperatura del xip a en funció del temps d'exposició.

Per reduir aquest soroll, es refreda el sensor fins a temperatures de l'ordre dels 220 K per temps d'exposició de fins a 500s, i 290K per temps d'exposició de menys de 20s. També es pot afegir un amplificador "lock-in" tal que s'introdueixi un filtre amb un ample de banda petit per tal de reduir el soroll Una altra manera és intentar reduir al màxim el temps d'exposició, però això augmenta el soroll de lectura.

D'altra banda, el **soroll de lectura** en els CCDs augmenta quan fem mesures ràpides de senyals, la qual cosa redueix significativament la qualitat de la senyal. Es per això que aquests sensors no son bons candidats per mesurar imatges en moviment.

EMCCD

A diferència dels CCDs clàssics, els EMCCDs sí es fan servir per observacions d'objectes en moviment, per la qual cosa cal que operin a més velocitat sense tenir una disminució tan gran com els CCDs.

Com mantenen un SNR suficientment baix a més velocitat per frame? Amplifiquen el senyal

¹ Sensor S11155-2048-01

d'entrada en relació al soroll de lectura. Fan servir amplificació on-chip, és a dir, multiplicació dels fotoelectrons en sortir de la zona d'emmagatzematge. No obstant, una font d'error addicional que s'afegeix és l'error de l'amplificació, que és una font aleatòria d'error. El soroll que més es veu afectat en l'amplificació son el "spurious noise". No obstant, aquest soroll no redueix la senyal rebuda, simplement augmeta la variança del senyal al voltant d'un valor mitjà, com es pot veure a la figura 4.



FIG 4: EM (EMCCD amb guany) vs amplificador convencional.Understanding Noise Sources in EMCCDs

CMOS

Aquests sensors redueixen tant el soroll de lectura dels CCDs com el soroll aleatori d'amplificació dels EMCCDs, operant igualment amb ràpida lectura. De fet, la parel·lització de l'arquitectura dels CMOS és la responsable que aquest tipus de sensors presentin errors incorrelats que són menors en valor que els correlats. Això és el que els permet treballar amb més velocitat de frame amb un nivell de SNR tolerable.

Per una altra banda, la implementació d'un obturador global també afegeix una font d'error. Això és perquè la FD on s'emmagatzema la càrrega abans de la lectura és fotosensible, és a dir, si els fotons arriben a aquesta àrea després del final de l'exposició, però abans que es produeixi el procés de lectura d'aquest píxel, es pot registrar un senyal anòmal. Això es coneix com a sensibilitat a la llum "paràsita" (PLS). Minimitzar el PLS en sensors retroil·luminats és un dels reptes principals per aconseguir altes sensibilitat i la capacitat de capturar imatges a alta velocitat sense distorsions.

IV. SENSORS CMOS MODERNS

Els errors de llum paràsita, les distorsions causades per l'obturador rodant i la baixa QE que presenten els sensors CMOS quan son frontalment il·luminats, han mantingut aquesta arquitectura lluny del rendiment dels altres tipus de sensors en l'àmbit de l'astronomia on es requereixen QE molt altes i la mínima font d'errors.

Ara bé, els dissenys més moderns dels sensors CMOS no només han aconseguit igualar el rendiment dels sensors CCD/EMCCD sinò millorar-lo en certs aspectes. Les millores més importants que han introduït els sensors CMOS moderns son:

- La implementació de l'obturador global reduint les distorsions causades per l'obturador rodant permetent capturar cossos a altes velocitats.
- El canvi de il·luminació frontal a fotoreceptors retroil·luminats, canvi que ha augmentat molt notablement la QE dels sensors, inclús superant, a certes freqüències els sensors CCD (Fig.5)
- Reducció del soroll de lectura mantenint uns valors raonables de llum paràsita amb una alta linealitat factors que contribueixen a un alt rang dinàmic



FIG 5: Comparació de l'Eficiència Quàntica (QE) dels sensors CCD típics i els sensors CMOS moderns.

Aquestes millores juntament amb els avantatges que ja tenen els sensors amb arquitectura CMOS (altes velocitats de captura i poc soroll de lectura) ha portat aquest sensors a ser una de les millors opcions del mercat.

V. CONCLUSIONS

L'observació espacial actual presenta grans dificultats tècniques degudes a la poca lluminositat que ens arriba de les estrelles o les altes velocitats que poden agafar els cossos celestes. Les tecnologies clàssiques, com l'ús de sensors CCD amb grans períodes d'exposició o l'ús de sensors EMCCD per l'observació de cossos amb altes velocitats, presenten grans fonts d'error i una velocitat de captura reduïda. En aquest artícle hem analitzat els diferents tipus de sensors fotogràfics: el seu funcionament i estructura, les fonts d'errors que presenten i els avenços recents, enfocant l'anàlisis a l'àmbit de l'astronomia, i caracteritzant les principals dificultats que aquesta branca presenta.

Si bé és cert que els sensors CCD i EMCCD havien monopolitzat l'observació espacial, la tecnologia CMOS moderna ha sigut capaç d'integrar millores com els obturadors globals o els sensors retroil·luminats, que han portat aquesta arquitectura a primera línia de l'observació espacial, presentant clars avenços respecte les tecnologies existents.

AGRAÏMENTS

Volem expressar el nostre sincer agraïment als professors de l'assignatura, i en especial al nostre supervisor Oscar Casas, per oferir-nos el seu temps, coneixement i dedicació i així permetre'ns realitzar aquest treball.

REFERÈNCIES

[1] Achieving a True Global Shutter with Large Format, Back-Illuminated CMOS | Teledyne Princeton Instruments. (n.d.). Princeton Instruments.

https://www.princetoninstruments.com/products /technologies-family/lacera/tech-notes/achievin g-a-true-global-shutter-with-large-format-back-i lluminated-cmos

 [2] Advanced CMOS Detectors for Astronomy | Teledyne Princeton Instruments. (n.d.). Princeton Instruments. https://www.princetoninstruments.com/products /cosmos-family/cosmos/app-notes/advanced-cm os-detectors-for-astronomy

- [3] A comparision between back and front illuminated sensors. (2019, June 7). Scientist Live. https://www.scientistlive.com/content/comparisi on-between-back-and-front-illuminated-sensors
- [4] Crisp, R. (2021, January 5). Eliminate noise sources in CMOS image sensor designs. EDN Asia. https://www.ednasia.com/eliminate-noise-sourc es-in-cmos-image-sensor-designs/
- [5] Learn | EMCCD: The Basics in Technology.
 (n.d.). Princeton Instruments.
 https://www.princetoninstruments.com/learn/ca mera-fundamentals/emccds-the-basics
- [6] Learn | Scientific Camera Noise Sources | Teledyne Princeton Instruments. (n.d.).
 Princeton Instruments. https://www.princetoninstruments.com/learn/ca mera-fundamentals/scientific-camera-noise-sour ces
- [7] Learn | sCMOS Sensor Technology: The Basics.
 (n.d.). Princeton Instruments.
 https://www.princetoninstruments.com/learn/ca mera-fundamentals/scmos-the-basics
- [8] Learn | Signal to Noise Ratio (SNR) | Teledyne Princeton Instruments. (n.d.). Princeton Instruments. https://www.princetoninstruments.com/learn/ca mera-fundamentals/signal-to-noise-ratio
- [9] Learn | Silicon-Based CCD Sensor Technology: The Basics. (n.d.). Princeton Instruments. https://www.princetoninstruments.com/learn/ca mera-fundamentals/ccd-the-basics
- [10] New Era in Dynamic Range and Linearity for Scientific CMOS Cameras | Teledyne Princeton Instruments. (n.d.). Princeton Instruments. https://www.princetoninstruments.com/products /technologies-family/lacera/tech-notes/new-era-

in-dynamic-range-and-linearity-for-scientific-c mos

- [11] Temperature dependence of dark current in a CCD. (n.d.). Pdx. http://web.pdx.edu/~d4eb/ccd/SPIE_2002.pdf
- This Month in Astronomical History: 50 Years of CCDs. (2019, October 29). American Astronomical Society. https://aas.org/posts/news/2019/10/month-astro nomical-history-50-years-ccds
- [13] Types Of Camera Sensor. (n.d.). Teledyne Photometrics. https://www.photometrics.com/learn/camera-bas ics/types-of-camera-sensor
- [14] Understanding Noise Sources in EMCCDs- Oxford Instruments. (n.d.). Andor -Oxford Instruments. https://andor.oxinst.com/learning/view/article/se nsitivity

Detecció i importància de senyals elèctrics en plantes

Rita Masagué, Dídac Alonso, Daniel Muñoz, Edgar Guardiola, Oriol Mayné Instrumentació. Grau en Enginyeria Física. Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Nord, 08034 Barcelona e-mail: oriol.mayne@estudiantat.upc.edu

Les plantes, així com els éssers humans i els animals, reaccionen mitjançant impulsos elèctrics quan reben un estímul extern. La finalitat d'aquest treball és presentar breument les diferents particularitats a les quals donen lloc els senyals elèctrics en les plantes i els seus corresponents significats fisiològics. A més, també s'introduiran els tipus de senyals elèctrics, els diferents mètodes de mesura d'aquests senyals i, al seu torn, algunes aplicacions per descriure l'impacte dels factors ambientals.

Paraules clau: potencial d'acció (AP), potencial de variació (VP), estímul elèctric, elèctrode.

I. INTRODUCCIÓ

Tot i que les primeres plantes terrestres van colonitzar la superficie terrestre fa uns 472 milions d'anys, no va ser fins a l'any 1873 en el que el fisiòleg britànic, Burdon-Sanderson, va ser el primer a descobrir l'activitat elèctrica present en les plantes.

Durant la primera meitat del segle XX, es van dur a terme una sèrie d'estudis per tal de detectar el potencial d'acció (AP). De fet, estudis recents han demostrat que els senyals elèctrics estan molt relacionats amb les diferents activitats fisiològiques de les plantes, ja que s'ha evidenciat que funcionen com un mitjà per transmetre la informació més ràpid que els senyals químics (com, per exemple, les hormones).

Aquest fenomen no és exclusiu de les plantes sensitives vasculars, que reaccionen de manera quasi espontània al tacte, o de les plantes inferiors, sinó també es duu a terme en les plantes vasculars no sensitives. Tot això va confluir en una sèrie d'experiments realitzats per J.I. Schroeder, R. Hedrich i J.M. Fernandez, que van concloure en el descobriment de canals iònics, presents en les cèl·lules vegetals, canals que fins ara eren suposadament exclusius de les cèl·lules animals. Per aquest mateix motiu, una de les qüestions que van sorgir era si aquests canals iònics responien de la mateixa manera que els dels animals. Tot i que semblava un argument plausible, varen esdevenir fets evidenciats que esclarien que els tipus de respostes elèctriques eren diferents, és a dir, la percepció d'estímuls és diferent.

Són aquests senyals i, per tant, les seves mesures els que protagonitzaran aquest article.

II. TIPUS DE SENYALS ELÈCTRIQUES

És ben conegut que diferents estímuls de l'ambient poden causar senyals elèctrics en els organismes, provocant-ne una resposta. No obstant això, trobem dos grans tipus de senyals, originades per raons diferents.

1. Potencial d'acció (AP)

Aquest tipus de senval ha estat molt estudiat i documentat en el regne animal, i es caracteritza per una ràpida propagació a través dels teixits i unes amplituds i velocitats constants. El seu funcionament consisteix en els processos de polarització i despolarització. En el cas dels animals, quan una regió és prou excitada, apareix un flux cap a l'interior de la cèl·lula de Na⁺ degut al canvi en la permeabilitat de la membrana, i aquesta despolarització es va estenent al llarg de la cèl·lula i en les cèl·lules veïnes. Les cèl·lules que s'usen per a aquest fi se les anomena excitables, i consisteixen bàsicament en les neurones i les cèl·lules musculars i endocrines. A continuació, es duu el procés invers per a repolaritzar les cèl·lules per al següent senval, la qual cosa es duu a terme mitjançant un flux cap a l'exterior de K⁺.

Aquest comportament exemplifica el caràcter de tot-o-res del procés, doncs si l'estímul no arriba a un cert llindar d'excitació, a partir del qual s'inicia la despolarització de la membrana, la transmissió no es durà a terme i l'organisme no rebrà aquesta informació. Si, en canvi, l'estímul és més fort del necessari, el senyal no es propagarà amb major amplitud o velocitat, sinó que s'enviarà repetides vegades, donant a entendre, amb aquest mètode, la urgència de l'excitació.

En el que respecta als organismes vegetals, aquest procés s'ha observat i documentat de manera anàloga, amb ions Ca^{2+} , Cl^- i K^+ . El cas més ben estudiat és en les algues Chara [20] i Nitella[21],

en particular les cèl·lules internodals, en les quals s'ha notificat una velocitat del potencial d'acció d'entre 10 - 20 mm/s.

Altres exemples de plantes altament sensitives és la mimosa pudica [18][19], coneguda per la seva reacció davant el tacte, la qual es relaciona amb la transmissió d'un potencial d'acció. En aquest procés, la transmissió dura al voltant dels 5 segons a una velocitat de 20 - 30 mm/s, la qual és bastant ràpida si la comparem amb altres espècies, i fins i tot de velocitats semblants els amb mol·luscs, les anodontes en particular, que presenta 45 mm/s. Malgrat això, quan la posem en comparació amb els mamífers [16], amb 100 m/s, la velocitat és molt reduïda.

2. Potencial de variació (VP)

De la mateixa manera que el potencial d'acció, el potencial de variació també es transmet al llarg dels canvis en el potencial de membrana, mitjançant la despolarització i la polarització. Tanmateix, presenta notòries diferències, ja que el rang d'intensitats del senyal és molt variable i el procés de repolarització es veu retardat i molt més lent. Per aquest motiu, alguns autors anomenen aquest potencial com a potencial d'ona lenta [17]. També és destacable com es genera, perquè requereix estímuls més abusius.

En el cas de la mimosa pudica, hem explicat que davant el tacte es produeix un potencial d'acció que causa un moviment reflex en les fulles veïnes. No obstant això, aquesta pertorbació no s'estén al llarg de la tija i cap als altres branquillons. Per altra banda, si cremem una fulla o la tallem, es produeix un potencial de variació, i aquest no es limita a unes poques fulles, sinó a tota la planta.

III. MECANISMES DE TRANSMISSIÓ DE SENYAL

El senyal elèctric es transmet a altres cèl·lules simplàsmiques via els plasmodesmes, això causa l'acoblament elèctric entre aquestes cèl·lules. Estudis recents indiquen que els plasmodesmes actuen com relés localment, és a dir, controlen i amplifiquen el senyal.

Per fer arribar el senyal elèctric a zones distants de la planta, s'usa el floema. El floema es pot trobar a tota la planta, està format pel tub cribrós, un conjunt de cèl·lules que actua com a conductor de baixa resistència permetent la transmissió d'AP. Les cèl·lules del tub cribrós, utilitzen canals K⁺, i en algunes espècies Ca²⁺. En moltes espècies, el floema està envoltat per l'esclerènquima, que és un teixit de suport per les plantes, a més té la capacitat de poder restringir la transmissió del senyal elèctric a través d'ella. És a dir, el senyal es transmet via els plasmodesmes a les cèl·lules veïnes lateralment fins que arriba al floema, on es pot transmetre a la resta de la planta. Per fer-ho possible, hi ha un baix grau d'acoblament elèctric en la direcció lateral, causat pels pocs plasmodesmes situats a la interficie entre cèl·lules companyes (CC) i floemes de cèl·lules de parènquima (PAs). No obstant això, els plasmodesmes poden obrir-se, donant pas a la propagació del senyal AP. Pel senyal VP tenim que una ràpida pèrdua en els vasos del xilema produeix despolaritzacions del senyal. Això genera una ona



Figura 1. Transmissió elèctrica a llargues distàncies. A la dreta es genera un senyal AP que es propaga pels plasmodesmes fins a arribar al floema (SE: tub cribrós, *"sieve elements"*). A l'esquerra tenim un senyal VP, generat adjacent a les cèl·lules de parènquima (PA) i adjacent als vasos de xilema. També usen els plasmodesmes per arribar al floema, però en aquest cas la seva amplitud es va reduint més notòriament.

hidràulica, que crea canvis en el flux ionitzat de les cèl·lules adjacents. A continuació, aquestes cèl·lules generen el VP que també es pot moure lateralment a través dels plasmodesmes i per distàncies grans pel floema, tal com passa per l'AP. Cal destacar que gràcies a aquest sistema de transport, les plantes són capaces d'enviar senyals a distàncies de fins a 20 cm.

IV. Tècniques de mesura de senyals elèctrics

Les tècniques de mesura es poden classificar en dues categories: extracel·lulars i intracel·lulars. Les extracel lulars s'usen quan s'aspira a mesurar el comportament dels senvals en conjunts de cèl·lules o la transmissió de senvals a través de la planta, la detectant suma del procés de despolarització-repolarització d'un gran nombre de cèl·lules, mentre que les intracel·lulars es trien en cas que facin mesures amb l'objectiu de detectar el potencial de membrana i els seus canvis en transmetre informació a través de senvals elèctrics.

1. Tècniques extracel·lulars

Les dues tècniques extracel·lulars principals són la inserció d'elèctrodes al teixit intercel·lular i les mesures superficials. Ambdues ofereixen mesures sobre l'evolució dels potencials i la transmissió de senyals; les mesures superficials, en ser menys invasives i poder-se combinar més fàcilment amb altres tècniques de mesura fisiològica, són les més usades habitualment.

El disseny dels aparells de mesura superficials, recollit a [1]-[2], consisteix en un cable de Ag/AgCl recobert per cotó, tot plegat humitejat amb una solució de KCl. Aquests terminals, que actuen com a elèctrodes, es posen a la superficie de la planta allà on es vulgui realitzar la mesura, i detectaran una tensió. Es poden situar múltiples elèctrodes a la planta, amb un d'ells situant-se a la regió distal de la planta o a terra per actuar com a referència. Per tal de connectar-los al convertidor, primer es fa servir per a cada elèctrode un cable aïllat connectat a un amplificador d'alta impedància (atès que el senyal ofereix un voltatge molt petit, de l'ordre de mV).

Per als sensors introduïts al teixit intercel·lular, s'usen també cables de Ag/AgCl, aquests d'un gruix d'entre 0.4-1 mm [2], que actuen com a elèctrodes. El tractament es fa igual que en el cas anterior, amb un amplificador i un convertidor adient. A causa del fet que la ruptura de la superfície per introduir els cables genera una reacció per part de la planta per la ferida que li suposa, pot alterar les mesures [3], de manera que normalment no s'usa com a primera opció.

2. Tècniques intracel·lulars

En aquestes tècniques, es mesura el potencial de membrana a cèl·lules individuals; l'objectiu és detectar els canvis ràpids en el potencial fruit de la transmissió d'impulsos elèctrics.

Per tal de realitzar aquestes mesures, s'insereixen dos microelèctrodes de vidre d'1 μ m de diàmetre, plens d'una solució de KCl i connectats per cables d'Ag/AgCl a un amplificador i convertidor dels condicionaments anteriors. Un dels microelèctrodes s'insereix al citoplasma de la cèl·lula i l'altre al líquid intercel·lular que l'envolta.

Aquestes mesures s'acostumen a fer en cèl·lules del floema. En transmetre's un senyal, els intercanvis d'ions entre la cèl·lula i l'exterior que provoquen un canvi ràpid del potencial de membrana, i alhora permet que aquest senyal es propagui cap a cèl·lules posteriors per seguir amb la transmissió del senyal. Aquest canvi és mesurable i és el que ens permet detectar aquests senyals.

V. Impacte Fisiològic dels senyals elèctrics

Tant els potencials d'acció (AP) com els potencials de variació (VP), poden informar d'estímuls locals a cèl·lules llunyanes, causant les reaccions associades als senyals. La presència de senyals AP ha estat ben documentada com a resposta a estímuls de tipus mecànic, elèctric o de xoc de temperatura. D'altra banda, els senyals VP s'han vist presents esposant l'organisme a escalfor o laceració.

Hi ha una varietat significativa en els efectes fisiològics. Entre dels més ben documentats, s'inclouen el tancament de tampa i l'alliberament d'enzims digestius en plantes carnívores com la *Dionea* [4] i la regulació del moviment de fulles a la *Mimosa* [4][5][6] com a resultat d'un estímul mecànic.

També s'han documentat increments en la respiració cel·lular com a resposta a estímuls elèctrics a *Conocephalum* [7], de pol·linització a *Incarvilea* i *Hibiscus* [8][9] i d'escalfament a *Vicia* [11].

Com a exemples de respostes de llarga distància, hi ha la *Mimosa*. Mitjançant AP i VP, regula la forma de les fulles i produeix una reducció transitòria de la fotosíntesi per tal de presentar-se menys atractiva de cara als herbívors quan rep algun estímul que podria ser indicador de la seva presència [11][12].

Fins i tot s'ha trobat que es poden induir canvis en l'expressió dels gens en *Arabidopsis* tan sols minuts després de ser tocada [13]. Tant senyals AP com VP poden induir l'expressió del gens [14]. S'ha parat especial atenció al gen de regulació d'inhibidors de proteasa (*pin2*), però també s'ha descobert que la biosíntesi d'àcid jasmonic també és induït per senyals elèctrics en plantes de patata [15].

VI. CONCLUSIONS

La finalitat d'aquest treball era, essencialment, presentar la manera amb què les plantes fan ús de la transmissió de senyals elèctrics davant d'estímuls externs i la manera com mesurem aquests senyals. Malgrat que aquestes tècniques de mesura han resultat ser eficaces, el fet que aquests senyals difereixen molt dels senyals dels animals provoca que no tinguem tants models matemàtics que mesurin amb precisió el potencial transmès.

És per aquest motiu que continuen les investigacions guiades per la recerca de millors

mètodes de mesura amb la finalitat de poder descriure amb exactitud un model predictiu del comportament d'aquests senyals i, d'aquesta manera, poder-los utilitzar en diferents àrees com el clàssic exemple de l'agricultura.

[1] Francynês C, et al., *Equipment and protocol for measurement of extracellular electrical signals, gas exchange and turgor pressure in plants*. MethodsX, Vol 8, 101215 (2021). doi: 10.1016/j.mex.2021.101214.

[2] Jörg F, et. al., *Electrical signals and their physiological significance in plants*. Plant, Cell and Environment (2007) 30, 249–257. doi: 10.1111/j.1365-3040.2006.01614.x.

[3] Silvia L, et. al., *Plant electrophysiology: bibliometric analysis, methods and applications in the monitoring of plant-environment interactions.* a DYNA, 88(218), pp. 212-223 (2021). doi: 10.15446/dyna.v88n218.92405

[4] Sibaoka T. (1969) *Physiology of rapid movements in higher plants*. Annual Review of Plant Physiology 20, 165–184.

[5] Fromm J. & Eschrich W. (1988) Transport processes in stimulated and non-stimulated leaves of Mimosa pudica.

[6] Sibaoka T. (1966) *Action potentials in plant organs*. Symposia of the Society for Experimental Biology 20, 49–73.

[7] Dziubinska H., Trebacz K. & Zawadzki T. (1989) *The effect of excitation on the rate of respiration in the liverwort Conoceph- alum conicum.* Physiologia Plantarum 75, 417–423.

[8] Sinyukhin A.M. & Britikov E.A. (1967) *Action potentials in the reproductive system of plants.* Nature 215, 1278–1280.

[9] Fromm J., Hajirezaei M. & Wilke I. (1995) *The biochemical response of electrical signaling in the reproductive system of Hibiscus plants*. Plant Physiology 109, 375–384.

[10] Filek M. & Koscielniak J. (1997) The effect of wounding the roots by high temperature on the respiration rate of the shoot and propagation of electric signal in horse bean seedlings (Vicia faba L. minor). Plant Science 123, 39–46.

[11] Koziolek C., Grams T.E.E., Schreiber U., Matyssek R. & Fromm J.(2004) *Transient knockout of photosynthesis mediated by electrical signals.* New Phytologist 161, 715–722. [12] Lautner S., Grams T.E.E., Matyssek R. & Fromm J. (2005) *Characteristics of electrical signals in poplar and responses in photo-synthesis.* Plant Physiology 138, 2200–2209.

[13] Shiina T. & Tazawa M. (1986) Action potential in Luffa cylindrica and its effects on elongation growth. Plant Cell Physiology 27, 1081–1089.

[14] Stankovic B. & Davies E. (1996) Both action potentials and variation potentials induce proteinase inhibitor gene expression in tomato. FEBS Letters 390, 275–279.

[15] Fisahn J., Herde O., Willmitzer L. & Pena-Cortes H. (2004) Analysis of the transient increase in cytosolic Ca^{2+} during the action potential of higher plants with high temporal resolution: requirement of Ca^{2+} transients for induction of jasmonic acid biosynthesis and PINII gene expression. Plant and Cell Physiology 45, 456–459.

[16] Lüttge U., Kluge M. & Bauer G. (2005) *Botanik.* Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany.

[17] Stahlberg R., Cleland R.E. & Van Volkenburgh E. (2006) Slow wave potentials – a propagating electrical signal unique to higher plants. In Communication in Plants – Neuronal Aspects of Plant Life (eds F. Baluska, S. Mancuso & D. Volkmann), pp. 291–308

[18] Fromm J. & Eschrich W. (1988c) *Transport* processes in stimulated and non-stimulated leaves of Mimosa pudica. III. Displacement of ions during seismonastic leaf movements. Trees 2, 65–72.

[19] Samejima M. & Sibaoka T. (1982) *Membrane* potentials and resistances in excitable cells in the petiole and main pulvinus of Mimosa pudica. Plant Cell Physiology 23, 459–465.

[20] Okihara K., Ohkawa T., Tsutsui I. & Kasai M. (1991) A Ca^{2+} and voltage-dependent Cl-sensitive anion channel in the Chara plasmalemma: a patch-clamp study. Plant Cell Physiol 32, 593–601.

[21] Spanswick R.M. & Costerton J.W.F. (1967) *Plasmodesmata in Nitella translucens: structure and electrical resistance.* Journal of Cell Science 2, 451–464.

[.] Megías M, Molist P, Pombal MA. (2019). *Atlas de histología vegetal y animal. Tejidos vegetales.* Conductores:

https://mmegias.webs.uvigo.es/1-vegetal/guiada_v_ conductores.php

EEG HEADSETS AND ITS APPLCATIONS

Aleix Salvador, Carlos Arribalzaga, Donato Jiménez, Gerard Castro, Javier Gallardo

Abstract – The objective of this document is to present the main features of non intrusive brain sensing technology in EEG headsets. Firstly the electronic and technical features of the EEG headsets will be discussed. Secondly it will be explained how the brain signal acquisition is accomplished and conditioned. Thirdly a particular model of an EEG will be presented. Lastly the present and future applications of this technology will be explored.

Keywords – Acquisition, Brain, EEG, Electronic, Headset, Processing, Neuroscience, Non-invasive, Technical, Scientific, Signal.

NOMENCLATURE

EEG	Electroencephalography
V_{pp}	Peak to peak voltage
SPS	Samples per second

I. INTRODUCTION

Electroencephalography (EEG) refers to a method for registering the electrical activity in the brain. The electrical signals produced by neurons trigger a shift in voltage. These signals can be detected by electrodes placed on the scalp in a non-invasive way. This means that no break in the skin is created and there is no contact with the mucosa or any internal body cavity beyond a natural or artificial body orifice.

These "brain waves" cover frequencies from 0Hz up to 100 Hz, and are classified in the following groups: delta (0.5-4 Hz), theta (4-8 Hz), alpha (8-12 Hz), beta (12-35Hz), and gamma (>35 Hz) waves (Fig.1) [1]. Different kind of brain waves are associated with certain brain states, as seen in Figure 1. The analysis of these waves is used in many fields, from medical diagnosis to research in neuroscience and psychology.

II. TECHNICAL FEATURES

EEG headsets technical features can be divided into three main areas: the sensor layer for signal acquisition, the amplification layer for signal conditioning, and the connectivity layer.

A. Sensor layer

The recording of electrical activity in the brain is achieved by placing electrodes on the scalp. The output signal can be the difference in voltage registered by sequential electrodes or the voltage with respect to a reference electrode. The positioning of the electrodes over the scalp is important to ensure consistency between different experiments. The International 10-20 system dictates the adequate positions for the electrodes in a standard 19 channel setup used in research (Fig.2a) The amount of electrodes determines the amount of



Fig. 1. Brain wave samples for each frequency domain and the brain states associated to each wave type.

information that is processed, and thus different applications require a different number of them.

Traditional EEG electrodes can be made of gold (Au), platinum (Pt), silver/silver-chloride (Ag/AgCl), tin (Sn) and stainless steel. Ag/AgCl electrodes usually display the best performance with excellent direct current (DC)-stability, low noise level and low resistance [2].

To improve conductivity between the scalp and the electrode, different techniques are used. This classifies the electrode sensors in two main categories, wet and dry electrodes (Fig. 3).



Fig. 2. Electrode locations of International 10-20 system for EEG recording.

1) Dry electrodes: Dry electrodes make direct contact with the scalp. This makes them easy to use, with no extra requirements and setup. However, the higher scalp-electrode impedance requires a better signal conditioning for it to be useful. For instance, the conditioning circuit needs to have a higher impedance to avoid signal attenuation. 2) Wet electrodes: Wet or semi-dry electrodes require some kind of electrolytic substance to improve conduction in the contact between the scalp and the electrode (Fig 3). This substances vary from regular tap water to saline solutions or gel systems. This kind of sensors can work with less conditioning, but a previous procedure before each use is needed.

A higher conductance in the electrode-skin interface (which is improved by skin preparation and applied substances) reduces the requirements in the signal transportation and amplifier features, but at the cost of lower ergonomics and usability. This considerations have to be taken into account when deciding which kind of sensor is to be used for a certain purpose.

3) Electrode and wire shielding: Active electrodes have an electronic circuit embedded between the sensor and the wire, which reduces the need for shielding but increases price and fragility. In passive electrodes both parts are welded directly together, but need more shielding.

This shielding is necessary to mitigate the interference caused by stray capacities appearing in the circuit. One way to reduce this interference is to cover the inner wire with a braided one around, creating a coaxial cable which acts as a Faraday Cage protecting the inner current from external electromagnetic fields.

Passive shielding consists in connecting the braid to ground, while active shielding is based on feeding the inner signal back to the braid. This is the most recommended shielding in EEG given that the signal source is of low amplitude (of the order of the μV) and high impedance. Most EEG headsets use active shielding because it is not an expensive feature but has a big impact on signal quality.

B. Amplification layer

The analog signal from the electrode sensor has to be conditioned and converted into a digital signal to be read by the computer. This process is carried out with a differential amplifier and an Analog-to-Digital Converter (ADC).

1) Amplification: The dynamic range of the amplifier is the range in which input signal can be recorded. This range is limited by the power supply of the amplifier (V_{cc}) and also its gain (G): $V_{max} = V_{cc}/G$. EEG signal and other electric signals recorded by the electrodes (see Fig. 4) come in the range of the mV, so usually a dynamic range of 50mVis acceptable. [3]. The internal noise of an EEG amplifier should always be of the order of $1\mu V$ to avoid hiding the EEG signal. Another important feature of the amplifier is the Common Mode Rejection Ratio (CMRR), which is the ability to attenuate the common voltage in the positive and negative inputs and amplifying the differential voltage. In an EEG amplifier, this means that the EEG signal is amplified while artifacts such as AC interference (see chapter III) is attenuated. The CMRR is the ratio of amplification between the Differential and the Common voltage, and should be at least of 80dB at frequencies around 50Hz, which is the frequency of AC current in electricity supplies and constitute a

main source of interference. A common value in commercial amplifiers is 110dB.

2) Input impedance: Input impedance refers to the impedance of the amplifier. As mentioned before, EEG signal is a high impedance signal. Skin-electrode impedance can range between some $k\Omega$ in wet electrodes to $M\Omega$ in dry ones. Therefore, an amplifier should have an input impedance of at least $100M\Omega$ to keep the loading effect error under 1%.

3) Analog-to-Digital Converter: The EEG signal frequency spectrum is between 0.5Hz and 80Hz (see Introduction). According to Nyquist theorem, the sampling rate must be at least twice the input bandwidth to ensure there is no aliasing. Although 160Hz would satisfy this requirement, the standard sampling rate in EEG is 256Hz (note that 256 is a power of 2), and more demanding scenarios sometimes use 512Hz or even 1024Hz sampling rates. The effective bandwidth of the ADC, which is the frequency band in which the attenuation is less than 3db, usually are of over 80Hz. However, for certain usages where frequencies above 30-40Hz are not used, the bandwidth can be narrowed to avoid noise without losing information and quality at lower frequencies. Regarding ADC precision, the standard is of 24 bits for clinical or research purposes, but can be as low as 12 bits in commercial headsets.

C. Connectivity layer

The way in which the device connects with the computer has a direct impact in the features of and EEG headset. The connection can be wired or wireless.

1) Wired: Most wired EEG headsets nowadays use USB technology, which provides almost unlimited amount of data transferred in real time, with low latency and high robustness against packet loss or corruption. The main disadvantage of wire connections is the movement constrain imposed by the cable.

2) Wireless: A wide range of wireless connections are used, being WiFi and Bluetooth the standard options. Some manufacturers use their own connection technology. A comparison between different wireless technologies and the wired option is shown in Fig. 3.

	Data throughput	Impact on amplifier size	Impact on battery	Data packet delay	Movement freedom	Need for external elements
Wired	Very High	Low	Low	Very Low	No	No
WIFI TCP	High / Very high	Medium / Low	e High	High	Yes	No
WIFI UDP	High / Very high	edium / Low	e High	High / Medium	Yes	No
Bluetooth	e Medium / Low	e Medium / Low	e Medium / Low	e Medium / Low	Yes	No
BLE	Low	e Medium / Low	Low	Medium / Low	Yes	No
Propietary technology	Adapted to the device	Medium / Low	Medium / Low	Medium / Low	Yes	Yes

Fig. 3. Connectivity options for EEG headsets.

III. Sources of error in the measure

A. Artifacts and interference

An artifact is a part of the signal recorded by the electrodes which is not produced by brain activity, i.e, noise in the EEG signal. The origin of the artifacts can be physiological or technical.

1) Physiological artifacts: As commented above, other electrical signals coming from the human body can be detected by the electrode and interfere with the EEG signal. This include signals from eye movement (electrooculogram or EOG), muscle activity (electromyography or EMG), cardiac activity (electrocardiogram or ECG), perspiration and respiration. Fig. 4 shows the amplitude of this artifact signals in comparison with EEG, which has to be taken into account when designing the amplifier.



Fig. 4. Amplitude of physiological artifacts.

2) Technical artifacts: This kind of artifacts are related to the montage of the electrodes on the scalp, the electronics and the power supply. Spontaneous changes in the skinelectrode contacts due to body movement or touching the electrode cause interference in the potential sensed, which usually affects only one channel. In the wired connection case, the movement of the cable can also distort the skin-sensor contact and the sensor output signal. Another main source of interference is the EM interference from AC lines, which arise specially when the shielding is insufficient. This kind of interference is well characterized in the frequency domain, at a frequency of 50Hz (60Hz in some countries such as USA).

B. Loading effect

To calculate the loading effect on the measure of the potential generated by brain activity, we need an electrical model of the different areas this potential must go through before "arriving" to each electrode. In order to do so, we have studied separately the electrical model of the skin surrounding the cranium, the cranium bones and the liquid interface between the cranium bone and the brain - as these are the main 3 areas of our cranium anatomy (Fig. 5).

The liquid interface is in the subarachnoid space, which is filled with brain-spinal liquid and can be modeled as a resistance, denoted as R_{liquid} from now on. The cranium bone, and any bone in general, can be modeled as a piezoelectric material [4]. Therefore, we will represent it by a capacitor of capacitance Cbone and a generator of voltage Vbone connected in series. As the measures realized do not compress the cranium bones, we can assume V_{bone} to be zero in order to make calculations easier.



Fig. 5. Layers of the Scalp

The skin surrounding the cranium is perhaps the most complex element to model. To do so, we have taken Fu Yulin and Ying Dong's model of the interaction of a wet electrode with the skin (Fig. 6), and applied it to the particular case of cranium skin.



Fig. 6. Fu Yulin and Ying Dong's model of the interaction of a wet electrode with the skin

By connecting the wet electrodes to the body, a halfcell is formed at the electrochemical electrode-electrolyte interface [5]. Here, the $V_{half-cell}$ is the half-cell potential, and the interface is modeled by a capacitor $C_{half-cell}$ and a resistor $R_{half-cell} = R_{hc}$ in parallel. The gel itself is modeled as a resistance R_{gel} . A difference in ionic concentration across the stratum corneum results in a potential $V_{ionic-concentration}$, which is given by the Nernst equation. The epidermis can be represented as a resistance $R_{epidermis}$ and a capacitance Cepidermis in parallel. The dermis, subcutaneous tissues, connective tissues, pericranium and aponeurosis capacitances can be neglected and their impedance is therefore modeled as a resistance $R_{dermis+te\,jidoconectivo+aponeurosis+pericraneo} = R_{dtap}$.

We will abbreviate this complex electric model of the skin and represent it as a "black box" we wil name "Skin Model" (Fig 7.).

Putting the three areas studied together, we obtain the following model:

Now, we can easily compute the load effect on the measure, which will be given by:

Which will be given by: $V_0 = \frac{R_e(V_g + V_{ionic-concentration} + V_{hc})}{R_{liquid} + \frac{1}{jwC_{bone}} + R_{epi} \| \frac{1}{jwC_{epi}} + R_{gel} + R_{hc} \| \frac{1}{jwC_{half-cell}} + R_e + R_{dtap}}$ Now we use the aproximation: $V_{ionic-concentration} + V_{hc} \ll Vg$ $\rightarrow \frac{V_0}{V_g} \simeq \frac{R_e}{R_{liquid} + \frac{1}{jwC_{bone}} + R_{epi} \| \frac{1}{jwC_{epi}} + R_{gel} + R_{hc} \| \frac{1}{jwC_{half-cell}} + R_e + R_{dtap}}}{R_g}$ For the EEG to work idealy we would like $V_0 \simeq V_g$





Fig. 7. Skin model circuit

$$R_e \gg R_{liquid} + \frac{1}{jwC_{bone}} + R_{epi} \parallel \frac{1}{jwC_{epi}} + R_{gel} + R_{hc} \parallel \frac{1}{jwC_{half-cell}} + R_{dtap}^{\text{Fig. 8. Full model}}$$

IV. EMOTIV EPOC X

	1
Number of	14
Channels	
Sampling	Sequential Sampling. Single ADC
Method	
Sampling	128 SPS / 256 SPS (2048 Hz internal)
Rate	
EEG	14 bits 1 LSB = $0.51V$ (16 bit
Resolution	ADC, 2 bits instrumental noise floor is
	discarded), settings can be changed to
	16-bit
Bandwith	0.2 - 45Hz, digital notch filters at 50Hz
	and 60Hz
Dynamic	$8400 \ \mu V(pp)$
Range (input	
referred)	

In this section we will describe a particular EEG, EPOC X from EMOTIV and we will show some of the results we have found by performing some test to the sensor. EPOC X is a wet electrode wich uses saline based electrodes, in our experiment we will use the saline solution Bio-true by Baucsh+Lomb. EPOC X has a total number of 14 electrodes for measuring wich are: AF3, AF4, F3, F4, F7, F8, FC5, FC6, T7, T8, O1, O2, P7, P8, plus four reference electrodes CMS and DRL at locations P3/CMS, P4/DLR and M2/CMS2 and M1/DRL2. M1/P4 and M2/P3 are the reference electrodes which are used to calculate the difference of potential with each electrode, M1 and P4 are for the right hemisphere and M2 and P3 for the left one. You will notice some new locations not present in the 10-20 system presented before these are part of the extensive 10-20 system. The data is processed and by the sensor and trasfered to the computer via either bluetooth conexion. The sampling method used is sequential sampling using a single analog to digital converter with a sampling rate of 128 SPS / 256 SPS. The EEG resolution is defined by the memory in this case of 14 bits, with a dynamic range if of $8400\mu V$ that means the resolution is of $\frac{8400\mu V}{2^{14}} = 0.5127\mu V$

A. Practical Test

We performed some measurements under different stimulus. To interpret the signals we used *EmotivBCI* which is a interface provided by *Emotiv* with this finality. It has a few modes, we are going to explain the two which lead to the more notorious conclusions.

1) Emotions/State of mind: This mode plotted the intensity of different emotions/states of mind (Engagement, Excitement, Focus, Interest, Relaxation, Stress) of the human subject over time.

We tested it with different stimulus and we found that similar activities like: watching football, playing videogames or solving mathematical problems, produced nearly indistinguishable signals (high intensities in engagement, focus, excitement, and low on relaxation) and the opposite happend for nearly sleeping or listening to relaxed music, which also where pretty similar between them.

On the other hand, very different activities (two activities from different groups of the above mentioned) where very far on the intensity graphs, and where coherent on the emotions. This shows that more precision might be need it but it clearly differentiates different states of mind.

B. Facial Expression

This mode showed a computed generated face which copied the facial expressions the human subject did.

It was really good at detecting which facial muscles where being activated, like moving the eyebrows, or moving the mouth in different ways. The software/sensor could be cheated if activating the same muscles needed for an action without doing it, like pressing the teeth together and not opening the mouth.

This mode proved that the sensor has a high sensibility and precision at detecting the contraction of different muscles around the face and skull.

V. Applications

A. Neuromarketing

EEG research is used by economists in the field of neuromarketing to detect brain processes that influence consumer decisions, active brain areas when we purchase a product/service, and mental states that a person is in when exploring physical or virtual stores.

B. Human Factors

Human Factors is a branch of psychology that focuses on workplace optimization, both in terms of tools and interfaces as well as social interaction. EEG research is employed in this field to uncover brain processes linked to personality traits like introversion/extroversion or social anxiety.

C. Social Interaction

We spend the majority of our lives interacting with others as social actors. Brain mechanisms related to social perception, self-evaluation, and social conduct are researched in social interaction research. Importantly, social interactions and communication are not passive ways of interpreting stimuli.

D. sychology and Neuroscience

EEG is commonly used in psychological studies to investigate the brain mechanisms that underpin attention, learning, and memory.

E. Clinical and Psychiatric Studies

Behavioral, attentional, and cognitive processing deficiencies can be detected whenever brain processes are compromised (e.g., lesions, inherited dysfunctions, illnesses). EEG is used in clinical and psychiatric domains to assess patients' cognitive states, identify lesion sites, and classify symptoms.

F. Brain Computer Interfaces (BCI)

Brain-computer interfaces are a relatively new but rapidly growing field for EEG. Today, we have a far better understanding of which brain areas are active when we detect inputs, plan and execute bodily motions, or acquire and recall information. There is also a big interest in brain to robot interfaces, especially for people with mobility impairments [6].

VI. CONCLUSIONS

The EEG headsets are already functional but they still haven't reached their full potential, and although right now they aren't a widespread technology among most of population probably one day they will, and this work might be the entrance door to this world for lots of people who might be interested.

This paper just covers the surface of all the science and technology there is behind the EEG headsets, and there is much more that is going to come on the near future, improving the sensors and the interpretation of the data.

Its multiple and interdisciplinary applications makes them a very valuable asset, and that will push science further.

REFERENCES

- [1] P. A. Abhang, B. W. Gawali, S. C. Mehrotra, "Technological basics of EEG recording and operation of apparatus", *Introduction to EEG-and speech-based emotion recognition*, pp. 19–50, 2016.
- [2] P. Tallgren, S. Vanhatalo, K. Kaila, J. Voipio, "Evaluation of commercially available electrodes and gels for recording of slow EEG potentials", *Clinical Neurophysiology*, vol. 116, no. 4, pp. 799–806, 2005.
- [3] R. R. Harrison, "A Versatile Integrated Circuit for the Acquisition of Biopotentials", in 2007 IEEE Custom Integrated Circuits Conference, pp. 115–122, 2007, doi: 10.1109/CICC.2007.4405694.
- [4] K. Fu-Cheng, et al, "The application of nanogenerators and piezoelectricity in osteogenesis, Science and Technology of Advanced Materials", *Science and Technology of Advanced Materials*, 2019.
- [5] F. Yulin, J. Zhao, Y. Dong, X. Wang, "Dry Electrodes for Human Bioelectrical Signal Monitoring. Sensors.", *Sensors*, 2020.
- [6] Á. Costa, E. Hortal, E. Iáñez, J. M. Azorín, "A supplementary system for a brain-machine interface based on jaw artifacts for the bidimensional control of a robotic arm", *PloS one*, vol. 9, no. 11, p. e112352, 2014.

Sensors Remots per l'arqueologia

Jesús Borràs, Inca de Ciurana, Dídac Olivé, Manel Piera, Ana Pons Instrumentació. Grau en Enginyeria Física. Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Nord, 08034 Barcelona

Entendre i conèixer els costums, tradicions i possessions dels nostres avantpassats sempre ha estat de gran interès per als ésser humans; és per això que s'han desenvolupat diferents mètodes remots per poder investigar zones inaccessibles. En aquest treball s'explica el funcionament de les tècniques més rellevants en l'actualitat juntament amb exemples reals on s'han utilitzat i s'han obtinguts excel·lents resultats.

I. INTRODUCCIÓ

L'arqueologia és la ciència que estudia el comportament dels éssers humans a partir de l'anàlisi de les restes materials que es troben en els jaciments. De forma tradicional la troballa d'aquestes restes es feia mitjançant un procés d'excavació. Gràcies als avenços en la tecnologia, s'han creat sensors que permeten obtenir la informació de forma remota i sense la necessitat de realitzar procesos d'excavació.

II. Tècniques

Existeixen una gran quantitat de tècniques de detecció però les principals són: el Ground Penetrating Radar (GPR), els Magnetòmetres, el SOund Navigation And Ranging, també conegut com SONAR, i el Light Detection And Ranging (LiDAR).

II.I GPR

Ground Penetrating Radar funciona transmetent petits polsos d'ones de ràdio d'alta freqüència al terra i mesurant el temps que triguen aquests senyals a reflectir-se en objectes o capes contrastades del sòl i tornar a l'antena emissora. Com més temps triga el senyal a tornar, més profund serà l'element en funció. A mesura que un sistema GPR és utilitzat a través d'un jaciment, tots els diferents reflexos s'enregistren i es mostren com a capes verticals del sòl. Si aquestes dades es recullen seguint un patró de quadrícula, es poden ajuntar les diferents capes i crear un mapa tridimensional del lloc d'interès que es pot dividir en capes horitzontals per visualitzar què hi ha a cada profunditat.

II.II MAGNETÒMETRES

Un magnetòmetre és un dispositiu que mesura el camp magnètic. Existeixen diferents tipus de magnetòmetres que mesuren la direcció, la intensitat, o un canvi en el camp magnètic d'una localització en particular. Per exemple, una brúixola és un magnetòmetre molt senzill que mesura el camp magnètic de la terra.

El sensor magnètic més comú són els sensors d'estat sòlid que aprofiten l'efecte Hall. L'efecte Hall consisteix en la diferència de potencial que apareix en un conductor que és travessat per un corrent elèctric quan s'aplica un camp magnètic perpendicular al flux de portadors. La tensió produïda és proporcional a la intensitat del camp magnètic i també detecta la seva polaritat. Gràcies a aquest efecte els magnetòmetres poden mesurar els camps magnètics i les seves variacions.

Els magnetòmetres no s'han de confondre amb els detectors de metalls. Només poden detectar materials ferromagnètics però són capaços de detectar aquests objectes a una distància major que els detectors de metalls que funcionen a partir de la conductivitat. Els magnetòmetres poden detectar grans objectes, com un cotxe, a desenes de metres de profunditat mentres que l'abast d'un detector de metalls rarament és superior als 2 metres.

En arqueologia, els magnetòmetres s'utilitzen per mesurar el camp magnètic de la terra i, degut a la presència de materials ferromagnètics, detectar anomalies de diferents tipus. D'aquesta manera els arqueòlegs són capaços de detectar objectes d'èpoques passades sense haver de fer cap excavació. El magnetòmetre detecta aquestes distorsions i com més a prop és l'objecte més fàcil és percebre'l. El dispositiu ens indica que hi ha alguna cosa que distorsiona el camp magnètic, però no es pot discernir de què es tracta.

II.III SONAR

El dispositiu SONAR emet un micropols d'alta freqüència d'ones sonores i mesura el temps de retard del eco tornant cap al sensor, d'aquesta manera es capaç de detectar els objectes sota l'aigua. El mètode funciona de manera similar al GPR amb la diferència que s'utilitzen ones sonores en comptes d'ones electromagnètiques. Els sonars escanejen en forma cònica i no lineal, de manera que rep dades d'una àrea cada cop més àmplia com més profund sigui el terreny. Existeixen dos tipus de sonar: el passiu i l'actiu. El passiu 'escolta' directament el so dels objectes que romanen submergits en moviment; en aquest cas, l'ona recorre únicament la distància entre l'objecte i el receptor. S'obté la informació precisa per determinar la direcció de l'objecte, analitzar el seu moviment i possibilitar la seva identificació. En canvi, l'actiu sí que emet l'ona sonora i rep el seu eco per processar les dades. L'efecte Doppler que presenta l'eco permet apreciar el moviment relatiu i posició que té l'objecte respecte l'emissor.

Els emissors d'alta potència poden ser perjudicials per a la fauna marina, tot i que actualment no és coneix exactament com. Alguns animals marins com els dofins o balenes utilitzen sistemes de ecolocalització per detectar depredadors i preses.

II.IV LIDAR

La tecnologia LIDAR permet captar un gran nombre de punts 3D i emmagatzema les coordenades globals exactes per reproduir l'espai a investigar. L'aparell determina les distàncies entre un emisor de llum fins un objecte o superficie emprant un feix de llum làser polsat. La distància a l'objecte es calcula mesurant el temps de retard entre l'ona emesa i ona reflectida. És a dir, a cada coordenada (x,y) d'una superficie se li atribueix una alçada z obtenint així la posició de l'objecte amb una precisió aproximada entre 2,5 i 10 cm.

Per realitzar el registre del relleu s'acostuma a utilitzar un avió o helicòpter el qual emet el pols de làser i atrapa el làser reflexat amb els sensors que mesuren la distància recorreguda i l'angle d'arribada. Aquest sistema és capaç de recollir informació a diferents altures ja que per un mateix pols es poden captar dos o més ecos; per aquesta raó el LIDAR es fa servir en vegetacions frondoses o zones poc accessibles.

Per assegurar-se de la posició del sensor i l'orientació dels raigs es necessita un Sistema Global de Navegació per Satèl·lit (GNSS) i una Unitat de Medició Inercial (IMU). Les dades obtingudes s'han de processar per obtenir finalment el mapa de l'àrea estudiada. Totes aquestes mesures es duen a terme amb molta rapidesa.

Aquest mètode també s'utilitza en el disseny de cotxes autònoms.

III. EXEMPLES I APLICACIONS

III.I. SONAR

El SONAR, mencionat anteriorment, són les sigles de Sound Navigation and Ranging. Les principals aplicacions d'aquesta tècnica, entre moltes d'altres, són processos de comunicació i detecció d'objectes sota de l'aigua. En relació amb l'arqueologia, s'utilitza per la cartografía i la imatge del fons marí per la detecció de restes de naufragis o altres jaciments. Un exemple bàsic en la pràctica de l'arqueologia submarina, seria un vaixell amb un aparell SONAR navegant per una zona determinada del mar per tal d'obtenir un mapa del fons marí i detectar possibles anomalies (figura 1). Aquest sistema remot d'arqueologia submarina va ser un avenç molt important que ara permet estudiar el fons marí més profund amb menys cost econòmic i més seguretat. Així mateix, el SONAR cobreix gran àrea i facilita l'obtenció d'un mapa molt extens. Juntament amb el Lidar, seria l'aparell usat en l'arqueologia del fons marí.



FIG. 1. Imatge Sonar de la proa del S.S. Montebello a una profunditat de 275 m. Vaixell de petroli americà que va ser enfonsat el 1941 per un submarí Japonès durant la segona guerra mundial. **[1]**

A part dels seus usos en l'àmbit de l'arqueologia, l'ús del SONAR és molt comú en embarcacions nàutiques i submarins. S'utilitza per detectar objectes o obstruccions submarines, com ara, petites roques, mines o icebergs; per tal de reduir el risc i prevenir qualsevol accident o imprevist. Totes les embarcacions solen tenir un aparell de sonda nàutica electrònica, amb sistema SONAR, per determinar la profunditat i la naturalesa del fons marí. A més a més, també s'usa per la comunicació entre vaixells i submarins militars i per detectar atacs de torpedes o míssils submarins, sobretot en època de guerra. Addicionalment, també s'empra en el comerç del peix a l'hora de buscar i pescar el peix. Una aplicació emergent, és l'ús del SONAR en la medicina per la obtenció d'ecografies. S'envien ones sonores d'alta freqüència al cos humà i s'analitzen els ecos i es crea una imatge (figura 2). L'avantatge de les ecografies SONAR és que la imatge es captura a temps real, això permet l'observació del moviment dels òrgans interns i de la sang a través dels vasos sanguinis.



FIG. 2. Imatge d'una ecografia. Exemple de l'ús del Sonar en la medicina **[2]**

III.II. LIDAR

El LiDAR, Light Detection and Ranging, té aplicacions molt semblants a les del Sonar. La principal diferència és que mentre el Sonar utilitza ones sonores, el Lidar fa servir llum en forma de pols làser per analitzar les seves reflexions i detectar i mesurar les distàncies. La principal aplicació del Lidar són operacions de topografia i processos per generar mapes i imatges 3D del terreny o bé dels núvols. En el context arqueològic, a part de utilitzar-se en l'entorn marítim com el Sonar, també s'utilitza en la descoberta de jaciments o altres fenòmens històrics en terra ferma. L'exemple més comú d'aquesta pràctica seria un Drone, o altres màquines aèries, amb un aparell Lidar sobrevolant la zona que es vol estudiar per tal d'obtenir un mapa de punts molt precís i estudiar el terreny. Aquest sistema d'arqueologia remot ha permès operacions més ràpides, més precises i més econòmiques. Avui i en dia, l'ús de Drones ha facilitat encara més aquesta pràctica reduint el cost i el risc a l'hora de fer volar avions i helicòpters.

Així mateix, aquest sistema remot és considerat la "revolució arqueològica", ja que ha revolucionat la manera de treballar i ha permès descobrir molts jaciments històrics i fins i tot, una antiga ciutat Maia (figura 3). "En 45 minuts de vol, l'equip LiDAR ha aconseguit l'equivalent a una dècada de prospecció arqueològica" va dir l'antropòleg Christopher Fisher [4]. El Lidar va revelar una vila Romana a Croàcia i moltes altres ciutats a Mèxic i a Gran Bretanya. A més d'això, s'ha usat per descobrir misteris sobre l'arquitectura i la construcció de la "National Cathedral" a Washington, D.C.. El LiDAR ha arribat a descobrir jaciments de fins el 2000 a. C..



FIG. 3. Imatge LiDAR de la plaça central de la ciutat Maia de Tikal del 600 a.C., avui i en dia, Guatemala. **[5]**

A més a més del seus usos en l'àmbit de l'arqueologia, el LiDAR també és molt útil per la inspecció i el manteniment de les línies elèctriques; és capaç de detectar possibles danys o anomalies per tal de prevenir qualsevol incident i augmentar la seguretat. Addicionalment, també s'usa en l'àmbit forestal i l'agricultura a l'hora inspeccionar nou terreny i expandir les collites o utilitzar nous recursos per augmentar la productivitat. A més, pot crear models 3D que mostrin l'impacte de l'activitat humana en boscos perquè el LiDAR té l'habilitat de penetrar en la coberta de l'arbre. Finalment, el Lidar podria resultar molt eficaç per l'ampliació del transport massiu, pot escanejar àmplies àrees i generar dades útils per la construcció de futures infraestructures de transport.

III.III. GPR

Els usos del GPR són força variats, tots ells implicats en la recerca d'objectes i construccions sota terra.

En primer lloc, el GPR és molt útil en la planificació d'excavacions. Saber on excavar per fer l'excavació segura i ràpida és molt eficient, ja que implica que les ruïnes i relíquies no es faran malbé, i també que el personal treballador no prendrà mal a l'hora d'excavar. Següentment, veurem que aquest tema està fortament relacionat amb els següents:

Un altre ús molt important que se li dona és la creació de mapes de cementiris antics. Si existeix la possibilitat que en el terreny estudiat pugui haver-hi antigues necròpolis o cementiris improvisats, aquesta tècnica ajuda a localitzar tombes i cartografiar tota la zona, que és útil per restaurar correctament les ruïnes i no cometre errors irreversibles excavant en llocs fràgils.

Una altra manipulació útil del GPR és localitzar armes ocultes. S'utilitza especialment en zones on anys abans va haver-hi una batalla. A part d'ajudar a l'àmbit històric per veure quin tipus d'armes es feien servir en aquell temps, també pot ser un ajut a la seguretat civil, per exemple, trobant mines explosives i bombes que no van explotar.

A més a més, també l'usen en l'àmbit de la criminologia per descobrir armes d'un crim que van ser ocultades pels delinqüents, ajudant a resoldre aquests casos d'una manera no destructiva i eficient. També es pot emprar per localitzar tombes clandestines, especialment per localitzar víctimes de crims. Així doncs, podem concloure que un mètode associat principalment a l'arqueologia de vegades pot ser realment útil en els camps que no hi tenen res a veure.

Un cas especial i controvertit on es va fer servir el GPR és l'incident d'OVNI a Aurora, Texas, el 1897. Es diu que el 19 d'abril de 1897, un diari de Texas va descriure l'accident ovni, explicant que els vilatans van concloure que el pilot "no era d'aquest món" i el van enterrar al cementiri del poble. Les peces de la nau espacial també van ser mig enterrades una mica més lluny d'on es va trobar el cadàver. El GPR va ser usat perquè l'associació de cementiri, no permetia l'exhumació i van haver de considerar una manera alternativa per poder buscar proves d'aquest cas sense haver d'interactuar directament a la zona. Molts programes de televisió han emès i investigat aquest esdeveniment i han intentat descobrir algunes proves sobre el que va passar, però el més especial que s'ha aconseguit fins al dia d'avui és un munt d'alumini enterrat i una tomba sense marques, nom

[1]

https://www.mbari.org/sonar-images-from-robotic-submersi ble-help-officials-determine-if-historic-shipwreck-poses-oil -pollution-threat/, consultat 13/5/2022.

[2]

https://www.lancashiretelegraph.co.uk/news/18349464.son ographer-questions-private-baby-scans-continuing-amid-cor onavirus-crisis/, consultat 13/5/2022.

[3]

https://www.bas.ac.uk/media-post/new-antarctic-seabed-son ar-images-reveal-clues-to-sea-level-rise/, consultat 13/5/2022.

[4]

https://www.nationalgeographic.com/culture/article/lasers-li dar-driving-revolution-archaeology, consultat 13/5/2022.

[5] <u>https://www.sapiens.org/archaeology/jeremy-sabloff/</u>, consultat 13/5/2022.

https://www.geeksforgeeks.org/explain-the-working-and-ap plication-of-sonar/, consultat 13/5/2022.

[7] <u>https://www.microdrones.com/en/content/5-compelling-app</u> <u>lications-for-lidar-technology/</u>, consultat 13/5/2022.

[8] https://weinspecttexas.com/the-use-of-ground-penetrating-r adar-in-archaeological-site-assessment/ , consultat 13/05/222

[9]

i molt deteriorada, a la zona prop d'altres tombes de la dècada de 1890.

Finalment, el GPR també es fa servir en la recerca de tresors. Saber que un instrument és capaç de descobrir tresors enterrats desperta la cobdícia i curiositat de molts. La gent anomenada caça tresors professionals, fa ús del GPR com el seu instrument principal per treballar, dedicant la seva vida a obtenir objectes de valor per vendre'ls o guardar-los com a trofeu de dedicació, esforç i, evidentment, molta sort.

IV. CONCLUSIONS

En definitiva, els arqueòlegs tenen a la seva disposició una gran quantitat d'instruments amb diferents característiques. Per això han de saber en cada situació quin és el sensor més idoni a utilitzar. En el cas que es vulgui detectar la presència de materials ferromagnètics en una àrea el millor és el magnetòmetre, si ja es coneix la ubicació d'un jaciment sota terra amb el GPR es pot fer un mapa tridimensional de les capes del sòl, el LIDAR és més útil per fer mapes de grans extensions de terreny i trobar jaciments sota la vegetació i el SONAR és més específic per l'exploració marina.

https://en.wikipedia.org/wiki/Aurora,_Texas,_UFO_inciden t/, consultat 13/05/2022

[10]

https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/traba jos_03_04/subacuatica/Sonar.htm, consultat 13/05/2022 [11]

https://www.yellowscan-lidar.com/es/knowledge/how-lidarworks/, consultat 13/5/2022

[12] <u>https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetometer</u>, consultat 07/05/2022

[13] <u>https://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect</u>, consultat 07/05/2022

[14] <u>https://www.youtube.com/watch?v=0kgw_P5q9_o</u>, consultat 07/05/2022

^[6]

Aplicacions no invasives d'ultrasons focalitzats pel tractament de càncers

O. Baldrís, P. Floriach, M. Molla, G. Roca, G. Rodrigo

Instrumentació. Grau en Enginyeria Física. Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Nord, 08034 Barcelona

El principal problema de l'utilitzar ultrasons focalitzats d'alta energia, igual que gran part dels tractaments contra el càncer o patologies similars, ve donat per la mort de cèl·lules benignes al voltant de tumors. És per aquesta raó que actualment s'utilitzen polsos d'ultrasons de baixa energia. En aquest article donem una visió genèrica dels mètodes principals d'aquest camp d'estudi tant en l'aspecte d'instrumentació (emissió i focalització d'ultrasons amb arranjaments d'emissors i amb lents hologràfiques per modular la fase dels ultrasons) com en el biològic i mecànic (Oncotròpsia, polsos d'ultrasons a baixa freqüència i sonoporació amb microbombolles).

Paraules clau: Ultrasons, Càncer, Teràpies no invasives

I. INTRODUCCIÓ

Els ultrasons (US) són ones mecàniques amb les mateixes propietats físiques que les del so audible però amb freqüències més altes (de 20 KHz fins a diversos GHz), inaudible per als humans.

A dia d'avui ja és típic i s'empra tecnologia d'ultrasons focalitzats per a eliminar cèl·lules cancerígenes de pacients. Aquests tractaments es consideren invasius ja que l'alta freqüència i energia dels ultrasons (High Intensity Focalized Ultrasound, HIFU) escalfen i maten també cèl·lules no cancerígenes. Per aquesta raó des del 2015 s'han investigat certes propietats i respostes de les cèl·lules a tot un espectre de ultrasons per a trobar tractaments menys invasius on només morin cèl·lules cancerígenes.

Certs laboratoris han arribat a una mateixa solució al problema usant metodologies diferents. Aquesta consisteix en fer servir polsos curts d'ultrasons de baixa intensitat amb freqüències molt concretes que degut a certes propietats fisiològiques i morfològiques només afecten a les cèl·lules tumorals, deixant intacte el sistema immunològic i evitant qualsevol toxicitat. A aquest procés se l'ha batejat amb el nom *d'Oncotropsy*. En aquest article donem una visió general d'aquests mètodes.

Per poder dur a terme els procediments mèdics és necessari poder enfocar ones de so amb freqüències en la zona d'ultrasò a un o diversos punts d'un teixit, tenint en compte el tipus de teixit i les condicions en què es troba. Quan es volen enfocar al cervell, per exemple, s'ha de considerar que han de passar a través del crani i l'anomenada barrera hematoencefàl·lica, que causen aberracions importants a les ones sonores. En aquest article exposem dues tècniques per aconseguir aquesta tasca: arranjaments de diverses fonts d'ones sonores (*phased arrays*) i lents hologràfiques.

Cal destacar que tots els estudis referents a aquest camp són molt recents i encara no s'ha pogut provar la seva efectivitat en humans.

II. METODOLOGIES I EXPERIMENTS

II.1 Càlculs i modelatge previ

Prèviament als estudis experimentals, explicats a continuació, cal calcular si realment la resposta vibracional és diferent entre les cèl·lules cancerígenes i les benignes i quins paràmetres morfològics ho causen. Aquesta part de l'estudi és totalment analítica i computacional ^[11].

II.1.1 Morfologia

La morfologia i estructura de les cèl·lules és un factor determinant en la resposta vibracional. Les principals diferències es troben en la mida del nucli (7-9 micres per cèl·lules benignes i 50 micres per tumorals), la mida del nuclèol i la rigidesa de la membrana de diversos components cel·lulars.

II.1.2Ressonància i modes normals de freqüència

Per altra banda si calculem, fent servir diferents paràmetres per modelar les diferents morfologies, els modes i freqüències normals de les cèl·lules (freqüències a la que tendeixen a vibrar les cèl·lules sota un estímul harmònic) s'observen diferències notòries en la resposta transitòria. Com podem veure en la figura 1, hi ha una diferència espectral de 230000 rad/s entre la primera freqüència normal de cèl·lules cancerígenes (100% cancerous potential) i no cancerígenes (20% cancerous potential) per una morfologia determinada (nuclear-nucleolar ratio, n/c=1). A part si les fem vibrar a la freqüència de ressonància de cadascuna (freqüències similars), les tumorals tenen una resposta molt més accentuada que les no cancerígenes. Aquests fets confirmen que podem rebentar cèl·lules tumorals sense afectar a la resta i serveixen de guia per poder calibrar els paràmetres dels raigs ultrasònics emesos.

L'únic que caldrà tenir en compte és el solapament entre algunes freqüències normals dels dos tipus de cèl·lules.



FIG. 1. Espectre de freqüències normals per cèl·lules amb diferent potencial cancerigen i morfologia (n/c).

II.2 LIPUS amb ones estacionàries

El LIPUS (Low Intensity Pulsed Ultrasound) és una altra tècnica utilitzada. Emprada en medicina els últims anys en la regeneració de teixit biològic (ossos, cartílags, tendons, etc.), ha esdevingut recentment una de les tècniques que permeten eliminar cèl·lules cancerígenes sense malmetre el teixit sa que les rodeja, substituint així altres tècniques com el HIFU, molt més invasives. El LIPUS està basat en la formació d'ones acústiques estacionàries que provoquen variacions de les forces mecàniques que experimenten les cèl·lules, fet que deriva en l'alteració cel·lular (cytodisruption) i posterior destrucció de les cèl·lules malignes que es desitja eliminar. Les ones són fruit de la interferència d'una ona d'ultrasò incident amb la seva reflexió; per crear-les, per tant, hi ha dos elements necessaris: una font d'emissió d'ultrasons i un element que actuï com a reflector. La destrucció de les cèl·lules es produeix arrel del fenomen conegut com a cavitació, definit com un mecanisme local d'amplificació de la pressió acústica, que és generat per les pròpies cèl·lules en unes condicions determinades en presència d'un reflector.

El LIPUS resulta especialment útil en el tractament de tumors de tipus cerebral, com glioblastomes o medul·loblastomes, gràcies a la possibilitat d'obrir la barrera hematoencefàlica o *blood-brain barrier*, una membrana semipermeable (situada al cervell humà) que actua com una espècie de frontera entre la sang i el cervell, permetent l'absorció d'elements necessaris pel cervell com aigua, oxigen o sucre i impedint l'entrada de neurotoxines nocives per a aquest. Està formada per cèl·lules endotelials (cèl·lules que recobreixen els vasos sanguinis). Tot i ser imprescindible pel correcte funcionament del cos humà, la barrera esdevé un problema en el tractament de tumors cerebrals (entre d'altres malalties cerebrals) ja que no permet el pas de medicines curatives. Una solució a aquest problema, relacionada amb el LIPUS ^[6], és l'emissió

d'ultrasons al cervell i la posterior injecció de microbombolles que vibren degut als polsos d'ultrasons de manera que poden, d'alguna manera, apartar les cèl·lules endotelials i obrir la barrera per acabar arribant al tumor.

En presència d'ones estacionàries i cavitació (creixement de bombolles en un fluid seguit d'una depressió que les fa implotar), s'ha pogut demostrar que el LIPUS és efectiu per a la destrucció selectiva de cèl·lules cancerígenes. Els resultats experimentals obtinguts per investigadors de l'Institut Tecnològic de Califòrnia a la ref. [7] confirmen que aplicat a una freqüència de 0.5 MHz i amb polsos de 20 ms de duració s'han aconseguit resultats amb un bon marge que permet no destruir el teixit sa (encara no s'han pogut demostrar en éssers vius).

II.3 Sonoporació amb microbombolles

Una altra tècnica que també utilitza ultrasons és la sonoporació. En aquest cas, el tractament consisteix en utilitzar l'emissió d'ultrasons per augmentar la permeabilitat de la membrana cel·lular i així permetre l'entrada de fàrmacs dintre la cèl·lula. Es pot utilitzar en diversos contextos i substàncies diferents. En el cas del càncer, es subministra certs gens pDNA (GFP o IFN-β) per injecció intratumoral, juntament amb cèl·lules T (Tcells), en casos també pot utilitzar-se quimioteràpia. S'irradia la zona amb ultrasons focalitzats de l'ordre dels MHz i de 4 MPa 24.4 MPa de pic positiu i 5.2 MPa de pic negatiu. D'aquesta manera, s'aconsegueix la formació de porus de 10-150 nm [8]. Així el medicament penetra la membrana de la cèl·lula maligna i queda atrapat a l'aturar l'emissió de les ones. Dins, provoca una resposta immunològica de la cèl·lula. La freqüència de les ones varia amb la mida de la substància que es vol introduir. Per T cells, d'1 a 5 MHz és suficient i per a generar porus més grans cal freqüències més petites (~250kHz) ^[9]. Tot i que encara s'està estudiant, s'ha pogut observar, que amb aquest procés les cèl·lules malignes es poden reduir fins un 5,3% in vitro i 4,2% in vivo ^[10]. Els principals avantatges que presenta són viabilitat clínica, seguretat, capacitat d'accedir a teixits no superficials i de manera no invasiva.

III. ENFOCAMENT DE RAIGS ULTRASÒNICS

Ambdues tècniques es basen en el mateix procediment: Primer s'identifica l'estructura del teixit on es vol enviar l'ultrasò (a partir d'imatges de tomografia computacional i de MRI) i seguidament es calcula el front de l'ona que emetrien diverses fonts virtuals situades a la zona objectiu cap a una superfície situada a l'exterior del cos.

Finalment un emissor situat a aquesta superfície emet el pols d'ona invertit en el temps (o amb la fase conjugada).

III.1 Ultrasònica de phased array

El mètode més estudiat i emprat per tal de generar ultrasons focalitzats és conegut com a phased array. En aquest mètode es fa servir una matriu de sensors ultrasònics posicionats al voltant del objecte on es vol aplicar. Quan un sol sensor ultrasònic és utilitzat, aquest emet i detecta ultrasons en una zona concreta, i presenta dificultats per ser aplicat en un objecte de volum més gran o en situacions que requereixin major precisió.

Una estructura de *phased array* està composta d'un seguit d'emissors ultrasònics que en la seva configuració més senzilla es col·loquen linealment, i que emeten ultrasons amb un cert retràs un de l'altre. El conjunt d'ones creades són esfèriques, i interaccionen constructivament creant un front d'ona pla. Al aplicar un retràs programat entre els emissors es permet orientar el front d'ona amb un angle determinat respecte el array emissor. Aquest front d'ona, doncs, pot ser orientat electrònicament per tal de fer arribar els ultrasons a un volum més gran o a una zona focalitzada específica.



FIG. 2. Representació gràfica de la generació de front d'ona amb *phased array*.

En aplicacions mèdiques dins del crani, aquest mètode ha estat usat amb freqüència i s'ha mostrat molt prometedor. Tot i que en els seus inicis els *arrays* estaven formats per uns pocs emissors, els desenvolupaments més recents han permès ampliar-ne el nombre fins a un miler, cosa que ha permès una major precisió i una capacitat de penetració dins del cervell més àmplia. Malgrat això, les complicacions més importants en l'aplicació d'aquest mètode es la dificultat d'arribar a zones complexes del cervell per limitacions de l'angle en que es pot aplicar el front d'ona i per manca d'intensitat suficient. Estudis recents han presentat millores significatives al implementar emissors còncaus en una estructura que envolta el crani del pacient i pot ser adaptada al crani i a les necessitats especials de cada cas.

D'aquesta forma es permet amplificar el rang de focalització i la intensitat resultant de les interferències és major.

III.2 Lents hologràfiques

En aquesta tècnica s'utilitza una placa hologràfica, una superfície que un cop impactada per una ona modifica la fase de la seva ona reflectida o transmesa de tal manera que poden prendre formes diferents, com a superfície de referència per gravar l'ona emesa per la font situada al teixit. Un cop s'ha gravat l'ona es construeix una lent hologràfica per tal que quan s'exciti amb un transductor ultrasònic uniforme pla aquesta emeti una ona que es concentri al punt desitjat.

III.2.1 Disseny de la lent

Per dissenyar la lent s'utilitza la distribució de la pressió (conjugada) de l'ona gravada a la superfície designada de la següent forma:

Es divideix la superfície en una graella amb segments quadrats a diferent altura tal que la font està situada a z = 0z = 0 i el pla hologràfic a z = h(x, y). Cada segment és considerat un oscil·lador que vibra longitudinalment i, a partir de l'expressió del coeficient de transmissió de l'ona a cada segment (ona que s'ha d'enviar/ona emesa per la font), es troba l'altura de cada segment (en funció de la fase) numèricament. Per evitar que la lent tingui altures molt diferents s'imposa que l'altura dels píxels ha d'estar entre una h_{min} fixada i una h_{max} , on la fase és 2π més gran que a h_{min} . D'aquesta manera s'aconsegueix modular la fase a cada punt per aconseguir tenir el perfil de fases de la mostra gravada, però no el d'amplituds.



FIG. 3. Disseny de la lent hologràfica.

Per no dependre d'aquest grau de llibertat es poden fabricar lent amb amplitud uniforme i un perfil de fases equivalen. Es pot aconseguir amb mètodes iteratius ^[1], però el seu cost computacional és molt elevat.

A la ref.^[2] proposen un mètode directe que es basa en escanejar la superfície hologràfica fila per fila, de tal manera que les files parelles i senars s'escanegen en direccions oposades. Cada píxel que es visita és forçat a tenir un valor d'amplitud igual a una constant, mentre que es preserva la seva fase i l'error d'aquest canvi es difon als píxels del voltant que encara no han estat visitats. Així doncs, un cop finalitza el procés d'escaneig s'ha obtingut una superfície hologràfica amb el mateix perfil de fases que el de la mostra, però independent de l'amplitud.

III.2.2 Utilitzant la lent hologràfica

A la ref. **[3]**, investigadors de la Universitat Politècnica de València han aplicat aquestes lents per tal de estudiar i quantificar la seva eficàcia. Han dissenyat i fabricat mitjançant impressió 3D diverses lents de 50mm de diàmetre amb l'objectiu de generar ones amb objectius diferents. Per tal de fer-ho, han construït un crani humà a partir d'escàners de tomografia. Aquest model 3D ha estat fabricat per mitjà de tecnologies additives, i malgrat les propietats mecàniques del material polimèric utilitzat siguin diferents a les de os humà, s'ha respectat la densitat i homogeneïtat d'aquest.





FIG. 4. Escàners del diversos punts i volum on s'enfoquen les ones: (a) Corba dins del crani. (b) Dos punts d'enfocament deparats. (c) Volum equivalent a l'hipocamp.

Per tal d'estudiar com es comportaven les lents, es va voler dissenyar-les per tal de que enfoquessin dos punts diferents del cervell, localitzats a posicions simètriques respecte la secció del crani. Per tant, la lent havia de separar el feix d'ultrasons en dos feixos amb direccions diferents. Inicialment es van dur a terme simulacions computacionals de com es projectaria el feix d'ones ultrasòniques a través del model digital, i va ser contrastat amb les dades reals obtingudes del model.

Posteriorment, es va dissenyar una altre lent amb l'objectiu de que el feix acústic girés la seva orientació formant una curvatura un cop a dins del cervell. Per tal d'aconseguir-ho, es va emparar una font virtual al punt de curvatura i a partir d'aquesta es va rastrejar com havia de ser el feix sortint de la lent per tal de poder-la dissenyar amb exactitud.

Anant un pas més enllà, es va intentar enfocar un volum sencer de la massa cerebral. En concret, es va voler fer passar els ultrasons pel volum equivalent a l'hipocamp dret.

Ja que com s'ha dit abans el model físic imprès en 3D no era prou semblant a un crani real en quant a propietats mecàniques, es van realitzar simulacions també de tots els experiments amb el model de crani complet.

Els experiment realitzats en aquesta investigació van mostrar una gran similitud entre les dades obtingudes a partir de simulacions computacionals i els resultats quantificats de les mesures presses en les diferents situacions explicades.

IV. CONCLUSIONS

Després d'haver realitzat una revisió de les diferents tècniques i tecnologies aplicables a l'ús d'ultrasons, podem comprovar que aquesta manera de tractar càncers i altres malalties presenta avantatges significatius respecte teràpies convencionals, sobretot pel fet de ser no invasiu.

Tradicionalment les teràpies amb ultrasons destruïen cèl·lules de la zona tractada sense diferenciar entre benignes i cancerígenes. Avenços més recents han aconseguit resoldre aquest assumpte per mitjà de mètodes basats en el concepte de l'onctròpsia (LIPUS per ones estacionàries i sonoporació). Tot i que aquestes tècniques ja s'han provat experimentalment amb rosegadors i mostres aïllades de cèl·lules encara falta veure els efectes en humans. Així, tot i ser un camp de recerca molt prometedor, encara és necessària una recerca experimental més àmplia per a poder confirmar la seva efectivitat.

L'aplicació d'ultrasons al cervell s'ha mostrat especialment útil a causa de les seves característiques mèdiques i morfològiques. Per tal d'enfocar aquestes ones acústiques, el mètodes més utilitzat de *phased array* ha resultat molt efectiu i nous desenvolupaments tècnics n'ha millorat les capacitats. D'altre banda, la focalització d'ultrasons amb lents hologràfiques presenta resultats prometedors i millores tecnològiques i econòmiques importants, malgrat encara ha de ser aplicat a nivell clínic.

BIBLIOGRAFIA

- Melde, K., Mark, A. G., Qiu, T., & Fischer, P. (2016). Holograms for acoustics. *Nature*, *537*(7621), 518-522.
- [2] Tsang, P. W. M., & Poon, T. C. (2013). Novel method for converting digital Fresnel hologram to phase-only hologram based on bidirectional error diffusion. *Optics express*, 21(20), 23680-23686.
- [3] Jiménez-Gambín, S., Jiménez, N., Benlloch, J. M., & Camarena, F. (2019). Holograms to focus arbitrary ultrasonic fields through the skull. *Physical Review Applied*, 12(1), 014016.
- [4] Hughes A, Hynynen K. Phys Med Biol. 2017
- [5]http://www.bercli.net/docs/ANSTpaperBERCLI homefo rmat.pdf 2007
- [6] Luntz, Stephen. "Sound waves break the blood-brain barrier", (2014).
- https://www.iflscience.com/health-and-medicine/soundwaves-break-blood-brain-barrier/

[7] Mittelstein, D. R., Ye, J., Schibber, E. F.,

- Roychoudhury, A., Martinez, L. T., Fekrazad, M. H.,
 & Gharib, M. (2020). Selective ablation of cancer cells with low intensity pulsed ultrasound. *Applied Physics Letters*, *116*(1), 013701.
- [8] Zeghimi A, Escoffre JM, Bouakaz A. Role of endocytosis in sonoporation-mediated membrane permeabilization and uptake of small molecules: a electron microscopy study. Phys Biol. 2015 Nov 24
- [9] Ilovitsh T et Al. Low-frequency ultrasound-mediated cytokine transfection enhances T cell recruitment at local and distant tumor sites. Proc Natl Acad Sci U S A. 2020 Jun 9
- [10] Douglas L Miller, Shiping Bao, Richard A Gies, Brian D Thrall, Ultrasonic enhancement of gene transfection in murine melanoma tumors, Ultrasound in Medicine & Biology, Volume 25, Issue 9, 1999, Pages 1425-1430, ISSN 0301-5629,
- [11] Heyden, Stefanie, and Michael Ortiz. "Oncotripsy: Targeting cancer cells selectively via resonant harmonic excitation." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 92 (2016): 164-175.

Present and future of gravitational wave astronomy

Ferran Cid, Marc Delgado, Pablo Mercader, Fernando Muñoz, Biel Ruscalleda

Instrumentació. Grau en Enginyeria Física. Universitat Politècnica de Catalunya Campus Nord, 08034 Barcelona

e-mail: <u>ferran.cid@estudiantat.upc.edu</u>, <u>marc.delgado.sanchez@estudiantat.upc.edu</u>,

pablo.mercader@estudiantat.upc.edu, fernando.munoz@estudiantat.upc.edu, gabriel.ruscalleda.i@estudiantat.upc.edu

It is common to have heard about gravitational waves and wonder about what they really are, and specially, how they are detected. In recent years, gravitational wave observatories have conquered the world science scene due to their unprecedented capability to observe astrophysical events. Those first observations called for tremendous efforts to improve the sensitivity of future detectors and come up with innovative ideas to filter noise in experiments. This paper provides an overview of the state of the art of gravitational wave astronomy, describing its first detection and some of the most important detectors available, and also dives into the future prospects and what can be expected from gravitational wave detection in the following years.

Keywords: gravitational waves, detectors, noise, sensitivity/

I. INTRODUCTION

Before looking into the present and future of gravitational wave astronomy, it is important to first learn about gravitational waves and their past.

The existence of gravitational waves was first proposed by Henri Poincaré back at the beginning of the 20*th* century, in the framework of special relativity. A few years afterwards, in 1915, Einstein published his general theory of relativity. Theoretical gravitational waves were properly predicted and studied as a consequence of such theory.

Without diving deep into the details, gravitational waves are ripples in the curvature of space-time generated by accelerating masses, analogous to accelerating charged particles generating electromagnetic waves. These waves propagate outwards at the speed of light along space-time in strain, and they carry a form of energy called gravitational radiation.

The sources of gravitational waves include two objects orbiting each other, such as Earth and the moon. However, current interest lies in studying waves produced by cosmical events such as supernovas, spinning neutron stars and black-hole mergers.

Obtaining information about these events is a fundamental goal for astronomers, and gravitational waves are a way of obtaining this information. This is because these waves penetrate through regions of space where electromagnetic waves cannot, and they allow us to gain some insight into very exotic cosmic events. They are also a way of learning about the early universe and other cataclysmic events. It turns out that the magnitude of these waves is inversely proportional to the distance of the source. The cosmical distances between the earth and the sources make the effect very small, and very difficult to detect. As an example, the strain of the ripple in space-time on Earth is, typically, to the order of one part in 10^{21} . Therefore, scientists had not been able to detect and demonstrate the existence of these until very recently, in 2015, with more sensitive than ever detectors.

Now that the interest and the difficulties in measuring gravitational waves has been portrayed, let's take a look into the present and future of research in this field.

II. FIRST DETECTION, WITH LASER INTERFEROMETER

It was in 2015 that gravitational waves were first detected. This Nobel-winning feat was carried out by laser interferometers at LIGO, (Laser Interferometer Gravitational wave Observatory) in Livingston, LA and Hanford, WA by a group of scientists from MIT and CalTech. Both facilities detected the same gravitational wave! The biggest challenge was being able to detect the changes that gravitational waves produce in the space-time continuum, which were to the order of 10^{-18} *m* in a LIGO-sized instrument.

The measurement was performed on gravitational waves emitted by the merging of two massive black holes, 1.3 billion years ago. This means that the event took place somewhere 1.3 billion light years away. This breakthrough means that now humanity is able to detect events that were impossible to detect with telescopes as, for instance, the merging of black holes does not radiate any light. The type of detector used was, as mentioned, a laser interferometer. Such an instrument is schemed in Figure 1, and consists of a light beam source that emits a ray into a splitter. The emitted ray usually is in the range of infrared light, and has to have a unique wavelength. The split rays travel through two four-kilometre-long tubes (Fabry-Perot cavities), at the end of which is an almost perfect mirror that reflects the rays.

When the rays come back, they are supposed to add up or interfere (the so-called *fringes*) and produce no light at all: they are expected to cancel each other out, as the phases are π rad displaced. When they combine, the detector should measure no intensity whatsoever. However, when the beams came together and were measured, the detector actually showed some intensity. This was due to the stretching and compressing of space-time, produced by gravitational waves, which had distorted the rays.



Figure 1: Layout of a Michelson wave interferometer. See Ref. [5]

This measurement had (and has) to be extremely precise, since wavelength distortion is to the order of 10^{-18} *m*. That's why the mirrors must be perfect, the Fabry-Perot cavities must measure exactly 4 *km*, and the ray must have one, and only one, unique wavelength. Achieving such precision supposes an extremely difficult technological challenge.

III. CRYOGENIC DETECTORS

The philosophy behind gravitational wave detection experiments has been exposed, but a need to increase the sensitivity of the detectors emerged after the first successful experiments. Cryogenic wave detectors arose as an alternative to achieve such an objective.

In order to detect a gravitational wave, a resonant body with a vibrational mode that can be excited by the wave is needed, such as a cylindrical antenna. The size of a resonant antenna is determined by the frequency and the velocity of sound in the material used and, since that is always orders of magnitude less than the speed of propagation of gravitational radiation, resonant mass antennas are always much smaller than the wavelength of the radiation. Typical antennas are cylindrical aluminium bars, with a length of three metres.

The mechanical oscillation induced in the antenna by interaction with the gravitational wave is transformed into an electrical signal by a transducer, and then amplified by an electrical amplifier. During this process, Brownian motion noise, associated with dissipation, and electronic noise from the amplifier limit the sensitivity of the detector.

Brownian noise is due to the chaotic motion of the detector atoms in the thermal bath at temperature T, whereas electronic noise is related to a parameter β , which varies depending on the transducer used. This parameter relates the electrical energy in the transducer with the total energy in the resonant body.

Apart from these noise sources, which are intrinsic to the sensitivity analysis of the antenna and can be accurately characterised, there are also external noise sources, such as seismic noise and cosmic ray disturbances, which are often non-stationary and difficult to characterise.

As a result, in order to reduce the detector noise and increase its sensitivity as much as possible, the strategy is to use a large mass made of a high-speed-of-sound material, reduce its temperature as much as possible and use a high- β transducer.

To achieve this, cryogenic resonant-mass detectors were conceived, which were meant to increase the sensitivity of the Weber detectors by many orders of magnitude through the use of superconducting electronic devices and working in temperatures below liquid helium (4.2 K).

There are currently several operative cryogenic detectors, but in order to explain their working conditions and characteristics, this paper will focus on the NAUTILUS detector, located at the INFN Frascati Laboratories in Italy. A layout of NAUTILUS is shown in Figure 2. The relevant feature of the cryostat is its central station, which contains two aluminium alloy shields cooled by helium gas, a stainless steel liquid helium reservoir, three massive copper rings and a special ³He - ⁴He dilution refrigerator.

A total of seven shields end up surrounding the bar, and they are suspended one from the other, forming a cascade of low-pass mechanical filters. Suspensions and thermal links amongst different components of the detector are made using copper and titanium cables and rods.



Figure 2: The NAUTILUS Gravitational Wave detector. See Ref [9].

The inner bar has a mass of 2350 kg, length of 3 m and diameter of 0.6 m, operating at a temperature of 0.1 K, which is the first massive body cooled to such low temperatures, as far as documentation shows.

The vibrations of the bar are converted into electrical signals by a resonant capacitive transducer, which are then applied to the input coil of a DC SQUID amplifier, by means of a superconducting transformer. The transducer consists of a vibrating disk and a fixed plate with a small gap, which forms a system of two coupled oscillators with the bar. The DC SQUID is a planar device with a multiloop geometry, which has a very low intrinsic noise. It is biassed with a DC current and an AC modulation flux, and its output signal is applied to another amplifier, the FET amplifier, through a cooled LC resonant circuit. After the proper amplifications, the signal is sent to the data acquisition system, which is connected to the international network and can be operated remotely.

The detector also holds several experimental apparatus, which are used to check the correct functioning of the machine. The most important components include an accelerometer and a magnetic-field sensor, both located on the cryostat, which are used to monitor the environment of the laboratory. They can be used to indicate when an experiment has been perturbed, and thus lead to signal rejection. On the other hand, the detector is also equipped with a cosmic-ray detection system, consisting of layers of streamer tubes placed above and below the cryostat.

IV. FUTURE PROSPECTS

Gazing into the future of gravitational wave astronomy, one finds the Einstein Telescope (ET), a European project, and its American counterpart, the Cosmic Explorer. These will constitute the next generation of gravitational wave detectors. Both are expected to start construction in the late 2020s and make their first observations by the 2030s. This paper will focus on the Einstein Telescope.

ET will be formed by an equilateral triangular tunnel of 10 km sides (allowing for a much larger interferometer than any previous gravitational-wave detectors) and will feature two interferometer designs. One interferometer will be low-frequency cryogenic, which will cool its mirrors down to temperatures to the order of 10 K, whereas the other will be a high-frequency detector, operating at room temperature.



Figure 3: Artist's view of the ET, where one of the vertices of the underground infrastructure is shown in detail. Seismic isolation vacuum towers are shown in red and blue for the cryogenic ET-LF and ET-HF respectively. See Ref. [11]

One ET-LF and ET-HF detector (the required laser, input and output optics) will be placed at each corner, adding to a total of six interferometers with 10 *km* long Fabry-Perot cavities.

The main issues ET will face when making low-frequency observations will be seismic, newtonian and thermal noise. In order to be able to make accurate measurements these must be reduced as much as possible.

To reduce the impact of seismic noise, the detector will operate several hundred metres below ground level (underground placement is a strategy that has already been used in other detectors, such as KAGRA) and improved vibration isolation technology will be used.

Newtonian noise will be reduced by two orders of magnitude by using seismometer arrays and thermal noise, using low mechanical loss materials at cryogenic temperatures.

ET will have better sensitivity when compared to second-generation GW detectors (KAGRA, Advanced Virgo and Advanced LIGO), opening up the 2-10 *Hz* band.

Altogether, several research institutes are currently working on the necessary technological developments, which will help to enhance our scope of knowledge about this fairly recent topic.

V. CONCLUSIONS

Detecting gravitational waves is a complex and challenging task. Nonetheless, their detection has been an important breakthrough in contemporary physics, and has led to further confirmation of Einstein's general theory of relativity.

The main issue worth tackling is the elimination or reduction of the noise generated when attempting to detect gravitational waves, which was first achieved in 2015, when the first successful detection took place. In order to pursue this, several techniques have been surging, such as the use of cryogenic wave detectors, which attempt to reduce the Brownian noise, generated due to the chaotic motion of atoms, by means of reducing the temperature of the resonant body.

One of the main focuses of current effort in gravitational wave research is to make the observations more precise and reliable. In that regard, there are several international collaboration projects under development. Some of these projects include facilities such as the Einstein Telescope, which are expected to be functional in the upcoming decades. This improvement in detection technology will allow this field of research to evolve. Thus, better understanding about the nature and behaviour of gravitational waves and other further discoveries in this field are to be expected, and will lay the groundwork for other fields too, such as quantum gravity.

The main goal throughout this paper has been to provide some insight into the gravitational wave detection world and the authors hope it has been fulfilled.

VI. **References**

- [1] <u>Special Issue "Present and Future of Gravitational</u> <u>Wave Astronomy"</u>
- [2] <u>Why Don't Gravitational Waves Get Weaker Like The</u> <u>Gravitational Force Does?</u>
- [3] Gravitational wave Wikipedia
- [4] LIGO Caltech
- [5] Detection of Gravitational Waves by Interferometry
- [6] <u>Gravitational wave detection using laser interferometry</u> <u>beyond the standard quantum limit | Philosophical</u> <u>Transactions of the Royal Society A: Mathematical</u>, <u>Physical and Engineering Sciences</u>
- [7] Phys. Rev. D 104, 062001 (2021) Cryogenic vacuum considerations for future gravitational wave detectors
- [8] <u>A cryogenic silicon interferometer for</u> gravitational-wave detection - IOPscience
- [9] Eugenio Coccia. "Cryogenic gravitational wave detectors". 280 (2000).
- [10] R. X. Adhikari et al. "A Cryogenic Silicon Interferometer for Gravitational-wave Detection" (2020)
- [11] <u>Research Facilities for Europe's Next Generation</u> <u>Gravitational-Wave Detector Einstein Telescope</u>
- [12] <u>Einstein Telescope Project Website</u>

Generation and storage of energy through piezoelectric systems

Jaime Estarellas, Jaume Gómez, Enrique Donada, María Martí, Elena Ruiz de la Cuesta Instrumentació. Grau en Enginyeria Física. Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Nord, 08034 Barcelona

Energy consumption has been and it is nowadays a subject of matter and concern due to the lack of renewable energy sources. Piezoelectricity can open opportunities to a greener future and it can become a very reliable form of energy with many advantages in applications and industries. Piezoelectric sensors are used in sectors such as healthcare, aerospace, consumer electronics, and nuclear instrumentation among others. In this article it is explained their composition and how they work.

Keywords: Piezoelectricity, Piezoelectric effect, Energy harvesters

I. INTRODUCTION

Piezoelectricity is the electric charge that aggregates in specific solid materials-like crystals, certain ceramics, and organic matter like bone, DNA, and different proteins in light of applied mechanical pressure. The piezoelectric effect is a reversible process, meaning that materials with piezoelectric like nature can either generate energy deforming the material or suffer a deformation due to an electric charge current. The piezoelectric effect was discovered by French physicists Jacques and Pierre Curie in 1880. However, they did not predict the reversive piezoelectric nature, mathematically deduced by Gabriel Lippmann in 1881. The ability of these materials to convert reversibly mechanical energy into electrical energy, has drawn in vast interest in this property in worldwide research activities. Not only the resulting generation of energy or deformation is interesting but also, the microscopical reason behind the physical phenomenon has helped the understanding of ceramic and crystalline materials with no inversion symmetry. Moreover, there are many applications of piezoelectricity such as, actuators in industrial sectors, sensors in the medical sector, piezoelectric motors, scanning probe microscopes, etc. In the following study, we will detail a physical and mathematical explanation as well as plausible applications of the reversible effects of piezoelectricity.

II. MATERIALS' PIEZOELECTRIC NATURE

In thermodynamic equilibrium, the molecules will be arranged in such a way that the charges cancel out in the whole system. However, the deformation of the material due to mechanical pressure, will change the molecules' position. This will align the molecules into a dipolar state which will change the global charge, polarizing the material. Not every material has the capacity to generate energy with the appliance of mechanical pressure. This property is characteristic of crystalline and ceramic materials only. The fundamental reason is the special arrangement of the materials' atoms in a hexagonal configuration. We must analyze the center of the positive and negative charges to understand this phenomenon. [8]





On the one hand, the tension of the material will cause the two positive charges on top of the hexagonal shaped molecule to move horizontally, moving the positive charge's center to move upward.

On the other hand, the negative charges will move downward, separating significantly the positive and negative charge's centers.

The same happens with compression. The shifting of the average position of the charges in different directions generates aggregations of positive charges on one face of the material and of negative charges in the other. Moreover, these induced dipoles can be converted into energy by connecting the different charged sides, which will generate a current of electrons from the negatively charged face towards the positively charged one.

III. PIEZOELECTRIC EFFECTIVENESS: ENERGY HARVESTING

In this day and age, piezoelectric materials as energy harvesters are not efficient enough to rely on this effect. The most effective piezoelectric being made are the ones with crystal form due to the large electrostrain value (>1%) which are expensive and hard to manufacture. Nevertheless, the increasing interest in green energy and ecological energy harvesting is pushing scientists to study how to increase these materials' performance.

In addition, even though piezoelectric materials hold great promise as sensors and as energy harvesters, their adequacy diminishes with an increase in temperature, which restricts the environments where they could be useful. Piezoelectric materials' performance starts to decay significantly when temperatures approximate 120 C, to the point where above 200 C (392 F) their performance is negligible.



Furthermore, there are certain parameters which are related with the piezoelectric's performance and could mean a great change in the energy harvesting and sensor effectiveness or a decrease in manufacturing costs.

Firstly, the shape of the created structure and its geometry takes on a vital role on the electric output the piezoelectric can provide. Secondly, the amount of stress applied on the piezoelectric is directly proportional to the current produced. Therefore, a greater pressure and deformation of the material will mean a higher energy production. Thirdly, research shows that multilayered piezoelectric structures also affect the electrical output the material produces. Lastly, Power Conditioning devices are of most extreme significance as less electric output is delivered depending on the power conditioning item.

It is obvious that piezoelectric components energized through natural modes get lesser output than those with external forced excitation techniques. Large scale fabrication of piezoelectrics as energy harvesters is less common due to its low effectiveness and its use is limited to powering smallscale self-powered sensors. Besides, the energy produced by the harvesters will require storage and the conversion of the current significant role. Researchers' attention has been concentrated just on individual parametric and no novel high proficient piezoelectric device has been developed. Although, it is evident that improving the efficiency of these materials will mean in the future green and efficient power generation. [1]

IV. WIND AND SOLAR ENERGY COMPARISON

Nowadays the energy industry is really demanding. Lots of resources are devoted to the research of optimizing energy harvesting. It is interesting to know whether piezoelectric materials are competent in the framework of this industry or not.

The easiest way to get an idea of this is comparing them with other kinds of energy harvesting. It would be a little too optimistic to take coal or petroleum as references so we will take renewable energy resources such as wind and solar energy.

All of them need specific conditions to get the optimal power density. These conditions are for solar energy, not only the weather, as it is for wind energy, but also the latitude of the harvesting point. For the piezoelectric materials the output is conditioned by the frequency of the voltage or force. We will compare the power density in their optimal conditions respectively.

Our sun delivers to the earth a constant supply of the order of $1000W/m^2$ but can only collect this amount of energy at the equator, at 40 degrees north or south the power density diminishes to the half approximately.

Based on a study carried out in India, the wind can supply a few hundreds of watts per square meter, significantly below solar power density.

Lastly for piezoelectric energy harvesting it doesn't get better. Latest devices can only provide around the order of decades of watts per square meter. So in terms of the amount of extractable energy piezoelectric materials can't face solar or wind energy. Their potential compared to these kind of energies are both the conditions they need to work efficiently, not dependent on location or weather, and their applications.

V. PIEZOELECTRIC AS A SENSOR

Piezoelectric sensors work on the principle of the piezoelectric effect. Crystals are squeezed to make and produce an electric voltage. Accordingly, piezoelectric sensors work by applying mechanical energy to a crystal following certain steps.

Firstly, between two metal plates in perfect balance a piezoelectric crystal is placed and does not conduct an electric current. Then the plates apply a mechanical force or stress to the material causing an unbalance of the electric charges within the crystal and an excessiveness of negative and positive charges appear on opposite sides of the crystal face. Lastly, the metal plates collect these charges producing a voltage that sends an electrical current through a circuit. This is transformed into piezoelectricity.

There are mainly three types of piezoelectric sensors. Are called unimorph sensors, those which only have a piezoelectric layer attached to the substrate. It consists of one active layer made of piezoelectric polymers (PVDF), and another layer but passive, known as elastic layer, made of steel, aluminium, brass or different polymers, which are materials without piezoelectric properties. Then there are the devices which have two active piezoelectric layers attached, and these are known as biomorph. In this type of sensor, the two layers are directly bonded together or separated by a



passive layer. When a force is applied up on the piezoelectric, an electric field is generated along the bimorph layer. The third type of sensor is the multimorph. This structure is considered when more than two piezoelectric layers exist. [4]

VI. PIEZOELECTRIC EFFECTS

A piezoelectric generator produces an electrical signal when it is deformed. If the force that produces these shape changes vibrates with it, the electrical signals will be constantly generated, therefore the generator will produce an alternating voltage. This voltage, which can power an external circuit, is the result of the conversion of mechanical (vibratory) energy into electrical energy. [7]

This piezoelectric generator has quite diverse properties; they vary according to the material. The most common piezoelectric effects are: the longitudinal which is represented by one-directional polar bonds; the transverse in which the polar bonds are oriented in the plane; and the shear piezoelectric effect characterized by the spatial distribution of the polar bonds.

The longitudinal piezoelectric effect occurs when a longitudinal mechanical stress is applied to a solid. Under this action, the material lengthens by a value Δl creating an electrical moment, which is the mechanically induced electrical polarization P. In any case, the polarization dependence on the stress is linear: P=d·X where d is the piezoelectric modulus. The inverse piezoelectric effect mentioned above would be: X=d·E.

On the other hand, the transverse piezoelectric effect can be explained with an hexagon forming a planar noncentrosymmetric structure with positive and negative ions. It arises from applying a stress along the horizontal axis, which produces the electrical polarization, not in the same direction, but perpendicularly to it.

Another very important effect is the shear, which can be both longitudinal and transverse. A stress perpendicular to the x-axis can be applied to produce the electrical polarization as shown in the figure. [6]



VII. CIRCUIT MODEL

Piezoelectric sensors have different models with slight variations. The following picture shows, beside the general circuit representation, a simple model that can be easy to interpret.

We have two capacitors, one in series with a coil and one in parallel with a resistance. [2]

Taking into consideration what we know about capacitors we need an oscillating voltage source or force to induce a deformation or a current A constant voltage, meaning the frequency of the oscillations is zero, should not provide any

output, just as a frequency tending to infinity. If we check on this model we see that it meets these conditions. Ideally with zero frequency the capacitor is just an open circuit and with a frequency tending to infinity the same happens to the coil. [3]



VIII. APLICATIONS

The piezoelectric sensors have wide frequency bandwidth, good linearity and constant sensitivity in a wide temperature range (especially crystals), simple structure and light weight. These characteristics make piezoelectric sensors very useful for:

- Vibration reduction: Using piezoelectrics for vibration control of flexible structures was one of its first applications. There are three types of vibration control: passive, active and hybrid. The first one is the cheapest and simplest but lacks flexibility in control. The second one has more flexibility in control and adaptability to the environment and is a research hotspot in vibration engineering.
- Deformation control of structures: it has a great application for the control of space stations and

vehicles. Using piezoelectrics to adjust the shape of a structure.

• Monitoring structural damage: using piezoelectrics to perceive changes of structural properties or by analysing the vibration waves propagating through the structure. [5]

IX. CONCLUSION

In this project it has been analyzed the piezoelectric effect. Studying which materials are the most efficient and how the piezoelectric effect, given its reversibility, can be used both as an energy harvester and as a sensor, covering functioning and applications. Based on these investigations, the following conclusions are derived:

- The most efficient materials are crystals and ceramics.
- Nowadays, piezoelectric for energy harvesting has very low efficiency, compared to other methods of
- P. Kumar Sharma, P. V. Baredar, Analysis on piezoelectric energy harvesting small scale device (2017)
- [2] A. Fernandez, *Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza* (2018)
- [**3**] O. J. Borda, L. C. Mendoza, *Modelo Matemático de un Generador Piezoeléctrico* (2019)
- [4] <u>https://onscale.com/piezoelectricity/what-is-piezoelectricity/</u>
- [5] <u>https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity</u>
- [6] Y. Poplavko, Y. Yakymenko, Piezoelectricity (2020)
- [7] <u>https://www.watelectrical.com/piezoelectric-generator-</u> circuit-explanation-working-types-and-applications/
- [8] https://ingenieriabasica.es/efecto-piezoelectrico/

obtaining energy such as solar or wind energy. However its architectural simplicity ,scalability and low cost make a promising future for piezoelectric energy harvesting.

• Similarly, the applications of piezoelectric as a sensor are of great interest: monitoring structural damages of buildings, control of deformations of structures and vibration control of flexible structures. But are also to be perfected, finding materials that do not vary its effect with the temperature for example.

All in all, improving piezoelectrics performance will become a great engineering challenge due to its practicality and amount of applications, especially in making big cities greener and sustainable.