



# **ANEXO A**

## **BASES TEÓRICAS DEL SISTEMA SPA**

---

Versión 1.0  
28/04/2024

### **INFORMACIÓN DEL PROYECTO**

<b>Autores</b>			
<b>Nombre completo</b>	Capozzelli, Lucas Santiago	Camargo, Julián	Tedesco, Facundo
<b>Legajo</b>	42894	42741	42742
<b>e-mail</b>	lucascapozzelli@gmail.com	julicmrgo@gmail.com	Facu.Tedesco96@gmail.com

Tutor	Ing. Néstor Manzur
Director	Ing. Carlos Taffernaberry
Jurado	Ing. Carlos Taffernaberry
Año Académico	2024
Responsable de la cátedra	Ing. Antonio Álvarez Abril

Empresa / Cliente / Laboratorio	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)
Patrocinador (Sponsor)	Bodega Experimental del INTA



## **1- FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA SOLAR**

La energía solar fotovoltaica, fundamental para el Sistema SPA, se deriva de la radiación electromagnética emitida por el sol. Este proceso inicia en el núcleo solar, donde ocurren reacciones nucleares, liberando cantidades masivas de energía en forma de luz y calor. Este flujo radiante consiste en distintos tipos de radiación, como la luz visible, infrarroja y ultravioleta, que se propaga a través del espacio hasta llegar a la Tierra.

La radiación solar, al alcanzar la atmósfera terrestre, atraviesa procesos de reflexión, absorción y transmisión, siendo parte absorbida por la superficie terrestre. La energía solar absorbida se manifiesta como calor y luz, sustentando la vida y siendo esencial para procesos naturales como la fotosíntesis. En el ámbito de la generación eléctrica, la tecnología fotovoltaica aprovecha la propiedad de materiales semiconductores, como el Silicio o el Arseniuro de Galio, para generar una corriente eléctrica al ser expuestos a la luz solar mediante el efecto fotoeléctrico.

El efecto fotovoltaico es un fenómeno esencial que subyace en la generación de electricidad solar y constituye la base de funcionamiento de los paneles solares fotovoltaicos. En términos sencillos, el efecto fotovoltaico ocurre cuando la luz solar incide sobre un material semiconductor, liberando electrones en el proceso. Este flujo de electrones crea una corriente eléctrica que puede ser aprovechada para generar energía. Los paneles solares fotovoltaicos consisten en celdas solares compuestas por capas de materiales semiconductores, como el silicio, que facilitan este proceso.

La explicación del efecto fotovoltaico implica considerar la estructura de la celda solar, donde los fotones de la luz solar golpean los electrones en los átomos del material semiconductor, proporcionándoles suficiente energía para liberarse de sus átomos asociados. Esta liberación de electrones genera una diferencia de potencial eléctrico que resulta en una corriente eléctrica cuando se conecta un circuito eléctrico a la celda.

En el ámbito de la generación de energía solar fotovoltaica, los semiconductores emergen como elementos esenciales que facilitan la conversión de la radiación solar en corriente eléctrica. El silicio, en sus diversas formas cristalinas, se erige como el protagonista principal en la manufactura de células solares. La estructura cristalina del silicio cristalino exhibe una disposición atómica ordenada, permitiendo la emisión controlada de electrones cuando son impactados por fotones de la luz solar. Además de esta variedad, el silicio amorfo y policristalino se emplean estratégicamente, ofreciendo alternativas con distintas características de costo y eficiencia.

## **2- EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ET)**

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo.

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la



vegetación mojada. Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación.

Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en la superficie evaporante son otros factores que afectan el proceso de la evaporación. Lluvias frecuentes, el riego y el ascenso capilar en un suelo con manto freático poco profundo, mantienen mojada la superficie del suelo. En zonas en las que el suelo es capaz de proveer agua con velocidad suficiente para satisfacer la demanda de la evaporación del suelo, este proceso está determinado solamente por las condiciones meteorológicas. Sin embargo, en casos en que el intervalo entre la lluvia y el riego es grande y la capacidad del suelo de conducir la humedad cerca de la superficie es reducida, el contenido en agua en los horizontes superiores disminuye y la superficie del suelo se seca. Bajo estas circunstancias, la disponibilidad limitada del agua ejerce un control sobre la evaporación del suelo. En ausencia de cualquier fuente de reabastecimiento de agua a la superficie del suelo, la evaporación disminuye rápidamente y puede cesar casi totalmente en un corto lapso de tiempo.

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera. El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo. Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino



también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración.

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal.

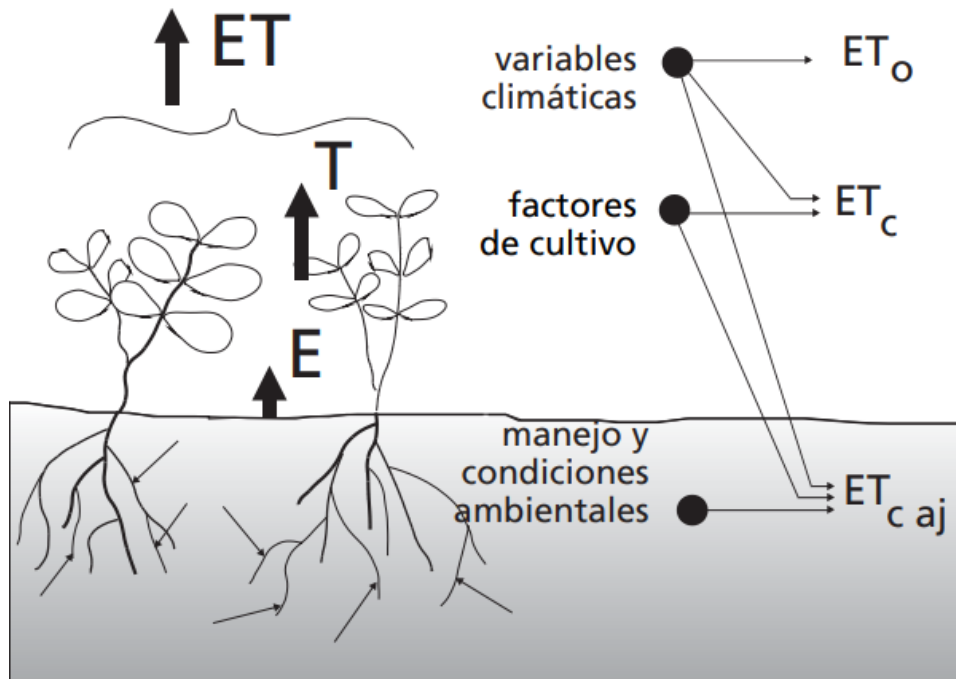
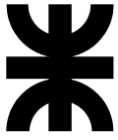
La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un completo período de cultivo o un año. Como una hectárea tiene una superficie de 10 000 m<sup>2</sup> y 1 milímetro es igual a 0,001 m, una pérdida de 1 mm de agua corresponde a una pérdida de 10 m<sup>3</sup> de agua por hectárea.

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración.

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros.

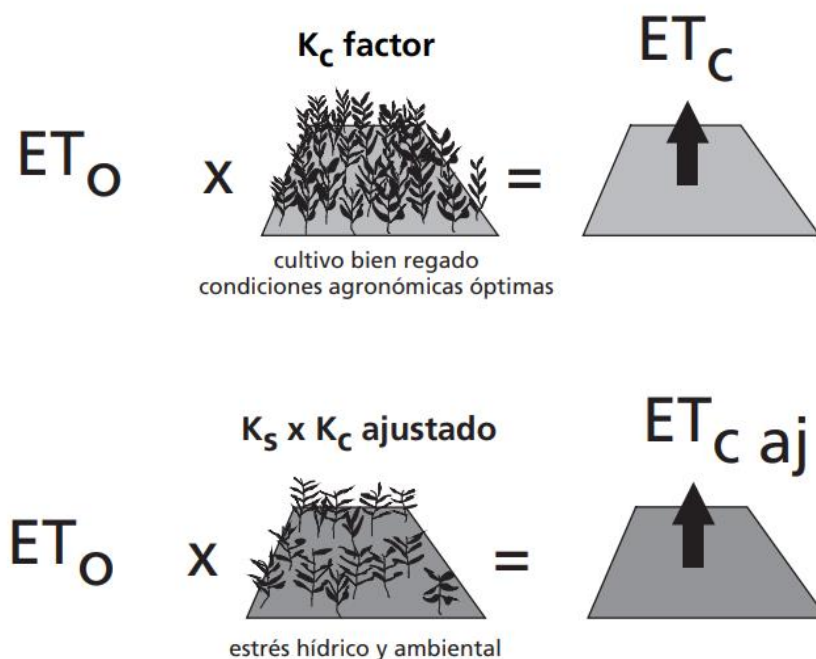
El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos, aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas.

Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la ET son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo. El efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración.



El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ ), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ( $ET_{c\ aj}$ ).  $ET_o$  es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera.  $ET_c$  se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas.  $ET_c$  requiere generalmente una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo.





**Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_0$ ):** La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina  $ET_0$ . La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre  $ET$ . El relacionar la  $ET$  a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la  $ET$  de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de  $ET$  para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de  $ET_0$  en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a  $ET$  bajo la misma superficie de referencia. Los únicos factores que afectan  $ET_0$  son los parámetros climáticos. Por lo tanto,  $ET_0$  es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos.  $ET_0$  expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo.

**Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ):** La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina  $ET_c$ , y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes. La cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo se define como necesidades de agua del cultivo. A pesar



de que los valores de la evapotranspiración del cultivo y de las necesidades de agua del cultivo son idénticos, sus definiciones conceptuales son diferentes. Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración. La necesidad de riego básicamente representa la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva.

**Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj):** La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj) se refiere a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes de las condiciones estándar. Bajo condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse de ETc debido a condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua. Esto puede resultar en un reducido crecimiento de las plantas, menor densidad de plantas y así reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de ETc.

La implementación de un lisímetro de pesada no solo proporciona una valiosa herramienta para la calibración local del coeficiente de cultivo (Kc) y para comprender las demandas hídricas específicas del cultivo en diversas condiciones, sino que también posibilita la calibración de métodos indirectos destinados a estimar la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj). Al utilizar un lisímetro de pesada, que mide con precisión las variaciones en el peso del suelo y la planta, se obtiene información detallada sobre la cantidad real de agua que el cultivo está consumiendo en un área específica. Esta información es fundamental para ajustar el Kc, que es un factor crítico en los cálculos de la ETc. Además, al comparar los resultados del lisímetro con las estimaciones indirectas de la ETc aj, se puede perfeccionar la precisión de métodos alternativos, como los basados en mediciones meteorológicas o índices de vegetación.

### 3- COMUNICACIÓN LORA

Cualquier comprensión de LoRa® y LoRaWAN® debe comenzar con una comprensión del internet de las cosas (IoT). La idea de que objetos físicos puedan estar conectados a internet se ha vuelto en gran medida común. Sin embargo, no siempre se comprende completamente el alcance masivo del IoT. El IoT consta de objetos conectados en red que recopilan datos del mundo que nos rodea y comparten esos datos a través de internet, para que puedan procesarse y utilizarse con diversos fines. La mayoría de esos objetos se conectan a internet mediante señales inalámbricas. Las soluciones de IoT pueden incluir desde aplicaciones personales, como monitorear la cantidad de pasos que una persona da en un día, hasta soluciones municipales, como gestionar el encendido y apagado de luces, entre otras cosas.

El Internet de las cosas se ha vuelto importante en la forma en que gestionamos el mundo que nos rodea. Las soluciones de IoT inalámbricas de corto alcance, como la conexión de un teléfono inteligente con un automóvil, generalmente dependen de una conexión Bluetooth. Otras soluciones, como los dispositivos para el hogar inteligente que pueden



gestionar un termostato, alarma y sistemas de entretenimiento, pueden depender de Wi-Fi. Soluciones de mayor alcance, como el seguimiento de activos o la monitorización del uso de servicios públicos, a menudo se basan en redes de área amplia de baja potencia, como LoRaWAN.

En todos estos casos, para que los dispositivos funcionen, necesitan poder intercambiar datos a través de la nube. Sin embargo, hay muchos desafíos cuando se trata de enviar y recibir datos desde la nube. La conectividad es un desafío: ¿qué hacer si los dispositivos están ubicados en un lugar que no tiene cobertura celular o Wi-Fi? Otro desafío es el consumo de energía. Hay que considerar qué tipo de datos se deben enviar y recibir. Las soluciones celulares y de Wi-Fi permiten intercambiar paquetes de datos bastante grandes rápidamente, pero también requieren una cantidad considerable de energía, lo que lleva a una vida útil de la batería más corta. Cuando se trata de soluciones de IoT industriales y agrícolas, puede resultar muy costoso instalar y mantener hardware de Wi-Fi en el lugar, y los gastos operativos mensuales recurrentes de las soluciones celulares también son bastante altos.

Como es ampliamente conocido, el término "inalámbrico" se refiere a una variedad de dispositivos que van desde teléfonos inteligentes hasta computadoras portátiles, tabletas, relojes y computadoras, hasta rastreadores de actividad física. Inalámbrico también se refiere a un espectro de tecnologías, como Bluetooth, celular, Wi-Fi, LoRaWAN, Zigbee, NB-IoT y otras.

Por su propia naturaleza, los datos tienen valor en el ámbito empresarial. A menudo, tienen valor más allá del propósito original para el cual se recopilaban, especialmente cuando se combinan con otros datos. En el mundo del consumidor, estamos familiarizados con el hecho de que los comerciantes recopilan datos de contacto de sus clientes para cumplir con los pedidos. También sabemos que esas empresas pueden compartir o vender sus datos de clientes, como direcciones de correo electrónico y números de teléfono, a otros que deseen realizar ventas dentro de ese mismo grupo de clientes. Otro ejemplo es el seguimiento de las condiciones ambientales locales, como temperatura, humedad, precipitaciones, horas de sol, etc. Se puede optar por recopilar este tipo de datos para fines propios. Además, es probable que estos datos tengan valor para otros también. Es posible tomar la decisión de vender datos recopilados en una región agrícola a los agricultores, para ayudarles a decidir si sus campos necesitan ser irrigados. Esos mismos agricultores también podrían estar interesados en datos históricos para ayudarles a determinar las razones de bajos rendimientos de cultivos. Ahora que tenemos una comprensión general del Internet de las cosas, profundizaremos en LoRa®.

### **3.1 Conceptos básicos de LoRa**

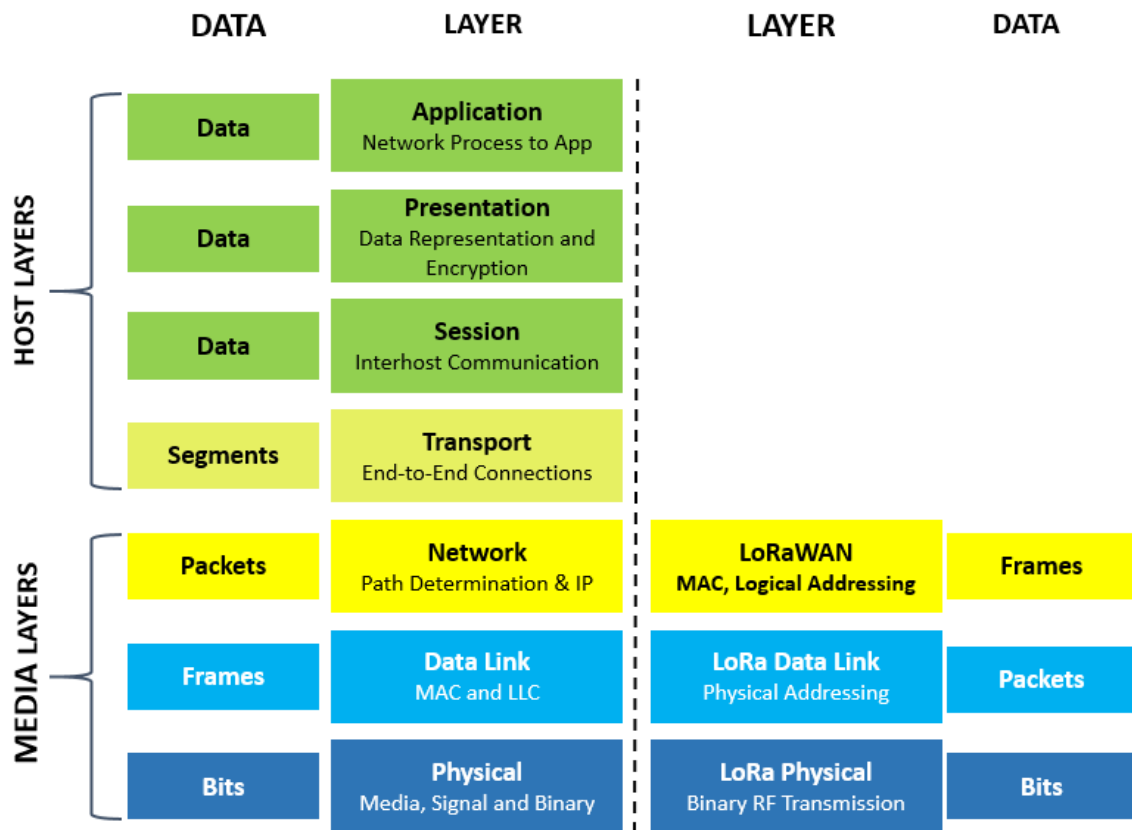
LoRa es una tecnología de modulación de radiofrecuencia para redes de área extensa de baja potencia (LPWAN). El nombre, LoRa, hace referencia a las conexiones de datos de largo alcance que esta tecnología permite. Creada por Semtech para estandarizar las LPWAN, LoRa proporciona comunicaciones de largo alcance: hasta tres millas (cinco kilómetros) en áreas urbanas, y hasta 10 millas (15 kilómetros) o más en áreas rurales





(línea de visión). Una característica clave de las soluciones basadas en LoRa es el requisito de energía ultra baja, lo que permite la creación de dispositivos alimentados por batería que pueden durar mucho tiempo.

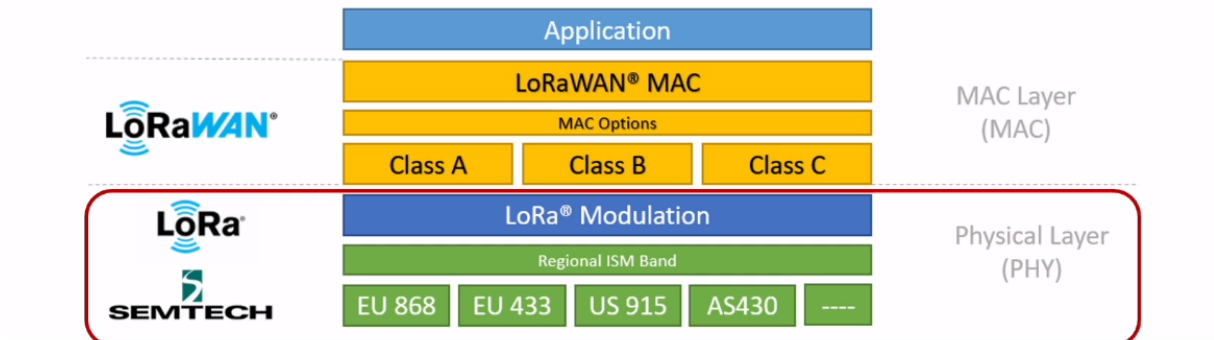
LoRa es puramente una implementación de la capa física (PHY), según lo define el modelo de red de siete capas de OSI, representado en la siguiente figura. En lugar de cables, el aire se utiliza como medio para transportar las ondas de radio LoRa desde un transmisor de RF en un dispositivo IoT hasta un receptor de RF, y viceversa.



Cuando queremos comunicarnos de manera inalámbrica, necesitamos encontrar una forma de transmitir los datos. Los datos consisten en unos y ceros que llamamos bits. Los bits que deseamos enviar deben modularse en algún tipo de fenómeno físico. Estos son patrones de energía también conocidos como ondas electromagnéticas.



Podemos manipular estas ondas cambiando la amplitud, frecuencia o fase mediante un dispositivo de radiofrecuencia. Este dispositivo representa la capa física, es el componente que incluye el algoritmo que modula bits en ondas.



LoRa es una tecnología de modulación de espectro ensanchado por chirp, este tipo de modulación se ha utilizado en comunicaciones militares y espaciales durante décadas y es conocida por su comunicación de largo alcance que se puede lograr, así como por su robustez ante interferencias.

Los primeros chips LoRa de bajo costo para uso comercial fueron lanzados en enero de 2015. La velocidad a la que es posible enviar datos a través de LoRa es baja, entre 300 bits por segundo y 11 kilobits por segundo. El tamaño máximo del paquete varía según la región del mundo, en función de las regulaciones locales del espectro y la velocidad de datos que se esté utilizando.

Una de las mayores ventajas de LoRaWAN es que utiliza bandas ISM no licenciadas en todo el mundo. Este espectro radioeléctrico está reservado regionalmente para dispositivos industriales, científicos y médicos (ISM), y los dispositivos LoRaWAN hacen uso de este espectro. Esto significa que los usuarios no necesitan comprar licencias costosas para operar sus dispositivos ni pagar a un operador de red por el uso de su banda con licencia. Cualquier persona puede operar un dispositivo o red LoRaWAN en cualquier parte del mundo, siempre y cuando cumpla con los requisitos regulatorios de esa región o territorio.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) gestiona el uso común del espectro para las Naciones Unidas (ONU), pero la autoridad final para la asignación de frecuencias es otorgada por los gobiernos de cada país o región, y hay más de 200 de estas entidades. Sin embargo, muchos países pequeños y en desarrollo carecen de una autoridad para la asignación de frecuencias.

Los tipos de parámetros definidos por los requisitos regulatorios incluyen:

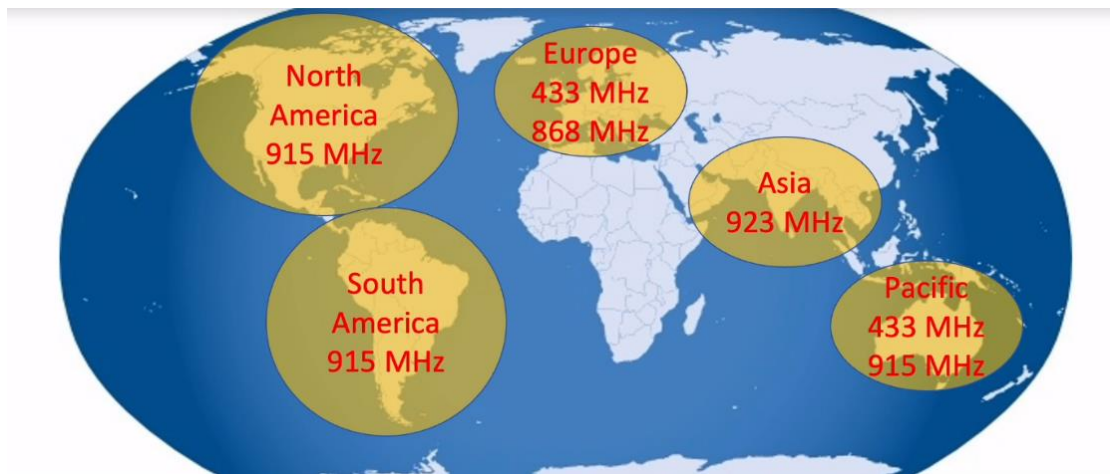
- Frecuencia a utilizar.
- Potencia máxima de transmisión y configuración de potencia.
- Requisitos de salto de frecuencia.
- Restricciones de ciclo de trabajo o tiempo de permanencia.
- Si es necesario realizar una escucha antes de hablar (LBT, por sus siglas en inglés).

Si bien LoRaWAN fue concebido y diseñado para operar en la banda de frecuencias no licenciada para aplicaciones industriales, científicas y médicas conocida como ISM, que



abarca el rango de 902 MHz a 928 MHz en América y está definida por la UIT, en Argentina se ha asignado un segmento específico dentro de la banda ISM que va desde los 905 MHz hasta los 915 MHz para SCMA. Esta asignación difiere del espectro internacionalmente definido, como se detalla en el [informe](#) de consulta pública de espectro emitido por la Secretaría de modernización de Argentina. A este servicio de comunicaciones móviles avanzadas se le asignó un segmento de la banda ISM, lo que implica que en Argentina se utiliza la banda de frecuencias conocida como AU915 en lugar de la banda US915 prevista inicialmente para Estados Unidos. La banda AU915, definida para Australia, también se utiliza en otros países de América Latina.

Sub-GHz ISM bands:



LoRa ofrece un equilibrio entre sensibilidad y velocidad de datos, operando en un canal de ancho de banda fijo de 125 KHz o 500 KHz (para canales ascendentes) y 500 KHz (para canales descendentes). Además, LoRa utiliza factores de expansión ortogonales. Esto permite que la red conserve la vida útil de la batería de los nodos finales conectados mediante optimizaciones adaptativas de los niveles de potencia y tasas de datos de un nodo final individual. Por ejemplo, un dispositivo final ubicado cerca de una puerta de enlace debería transmitir datos con un bajo factor de expansión, ya que se necesita muy poco presupuesto de enlace. Sin embargo, un dispositivo final ubicado a varias millas de una puerta de enlace deberá transmitir con un factor de expansión mucho más alto. Este mayor factor de expansión proporciona una ganancia de procesamiento mayor y una mayor sensibilidad de recepción, aunque la velocidad de datos será, necesariamente, más baja.

En un sistema tradicional o de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS, por sus siglas en inglés), la fase de la portadora de la señal del transmisor cambia según una secuencia de códigos. Al multiplicar la señal de datos con un patrón de bits predefinido a una velocidad mucho mayor, también conocida como código de expansión (o secuencia de chips), se crea una señal "más rápida" que tiene componentes de frecuencia más altos



que la señal de datos original. Esto significa que el ancho de banda de la señal se expande más allá del ancho de banda de la señal original. En la terminología de RF, a los bits de la secuencia de códigos se les llama chips (para distinguir entre los bits más largos y no codificados de la señal de datos original). Cuando la señal transmitida llega al receptor de RF, se multiplica con una copia idéntica del código de expansión utilizado en el transmisor de RF, dando como resultado una réplica de la señal de datos original.

Pasar por esta multiplicación de secuencia de códigos brinda un mayor presupuesto de enlace de RF, lo que permite transmitir a una distancia más larga. La relación  $\log_{10}$  entre la velocidad de chips de la secuencia de códigos y la velocidad de bits de la señal de datos se llama ganancia de procesamiento ( $G_p$ ). Esta ganancia es lo que permite al receptor recuperar la señal de datos original, incluso si el canal tiene una relación señal-ruido (SNR) negativa. LoRa tiene una  $G_p$  superior en comparación con la modulación de cambio de frecuencia (FSK, por sus siglas en inglés), lo que permite reducir el nivel de potencia de salida del transmisor mientras se mantiene la misma tasa de datos de señal y un presupuesto de enlace similar.

Una de las desventajas de un sistema DSSS es el hecho de que requiere un reloj de referencia altamente preciso (y costoso). La tecnología de espectro ensanchado por chirp (CSS, por sus siglas en inglés) de Semtech, utilizada en LoRa, ofrece una alternativa DSSS de bajo costo y bajo consumo de energía, pero robusta, que no requiere un reloj de referencia altamente preciso. En la modulación LoRa, la expansión del espectro de la señal se logra generando una señal de chirp que varía continuamente en frecuencia. Una ventaja de este método es que los desfases de tiempo y frecuencia entre el transmisor y el receptor son equivalentes, lo que reduce en gran medida la complejidad del diseño del receptor. El ancho de banda de frecuencia de este chirp es equivalente al ancho de banda espectral de la señal. La modulación LoRa también incluye un esquema variable de corrección de errores que mejora la robustez de la señal transmitida. Por cada cuatro bits de información enviados, se envía un quinto bit de información de paridad.

Como se señaló anteriormente, la ganancia de procesamiento de LoRa se introduce en el canal de RF al multiplicar la señal de datos con un código de expansión o secuencia de chips. Al aumentar la tasa de chips, se aumentan los componentes de frecuencia del espectro total de la señal. En otras palabras, la energía de la señal total ahora se distribuye sobre un rango más amplio de frecuencias, lo que permite al receptor discernir una señal con una relación señal-ruido (SNR) más baja (es decir, peor).

En términos de LoRa, la cantidad de código de expansión aplicado a la señal de datos original se llama factor de expansión (SF). La modulación LoRa tiene un total de seis factores de expansión (SF7 a SF12). Cuanto mayor sea el factor de expansión utilizado, mayor será la distancia que la señal podrá recorrer y aun así ser recibida sin errores por el receptor de RF.

La tabla muestra los cuatro factores de expansión diferentes [SF7...SF10] que se pueden usar para mensajes ascendentes (UL) en un canal de 125 KHz. Muestra la tasa de bits equivalente, así como el rango estimado (esto depende del terreno; se lograrán distancias más largas en un entorno rural que en un entorno urbano). También muestra los valores



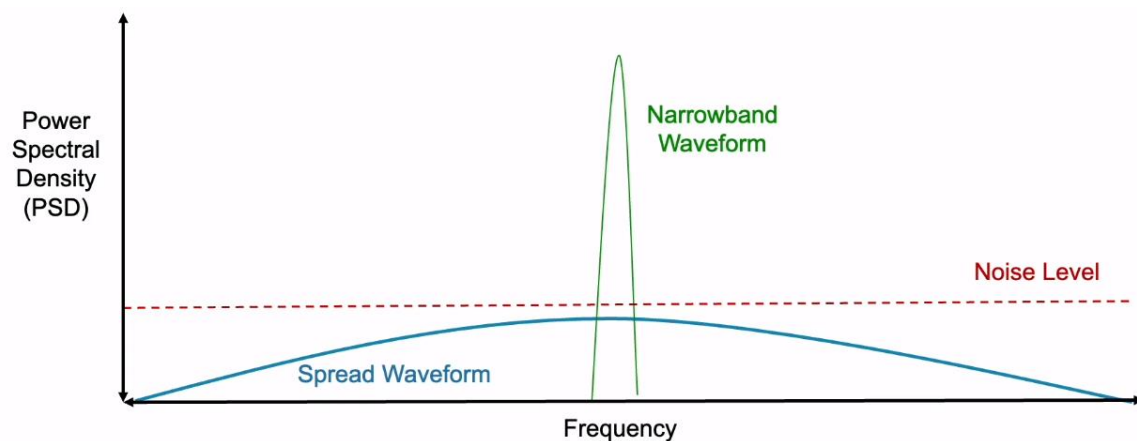
de tiempo de permanencia, o tiempo en el aire (TOA), para una carga útil de 11 bytes para cada uno de los cuatro factores de expansión.

Spreading Factor (For UL at 125 KHz)	Bit Rate	Range (Depends on Terrain)	Time on Air for an 11-byte payload
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

Es importante destacar que los factores de expansión de la modulación LoRa son inherentemente ortogonales. Esto significa que las señales moduladas con diferentes factores de expansión y transmitidas en el mismo canal de frecuencia al mismo tiempo no interfieren entre sí. En cambio, las señales con diferentes factores de expansión simplemente aparecen como ruido entre sí. Las señales LoRa son robustas y muy resistentes tanto a los mecanismos de interferencia dentro de la banda como fuera de la banda.

### Modulación

La modulación LoRa es una técnica de modulación de espectro ensanchado propietaria basada en el espectro ensanchado por chirp. Por ahora, es suficiente saber que las técnicas de modulación de espectro ensanchado son una clase de técnicas que envían datos a diversas frecuencias. El resultado es que el transmisor utiliza más ancho de banda en el espectro del estrictamente necesario. De hecho, utiliza un mayor número de frecuencias y un conjunto más amplio de frecuencias al enviar datos. La ventaja de este enfoque es que hace que las señales sean más robustas ante interferencias y aumenta el alcance que pueden tener las señales.

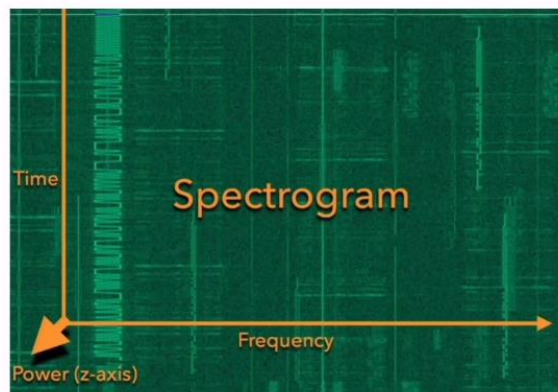




En este diagrama, se puede ver la diferencia entre un transmisor de banda estrecha y un transmisor de espectro ensanchado. Ambos envían la misma cantidad de energía, pero el transmisor de banda estrecha envía sus datos dentro de una banda de frecuencia muy estrecha, mientras que el transmisor de espectro ensanchado los envía sobre un rango mucho más amplio de frecuencias. Es por eso que estas señales son más robustas para superar las interferencias.

Para aumentar el alcance de un transmisor de radio, tenemos dos opciones. Podemos aumentar la potencia o reducir la velocidad de modulación. Dadas las limitaciones legales sobre cuánta potencia podemos usar para aumentar la distancia que podemos cubrir, necesitaremos reducir la velocidad de modulación. LoRa utiliza factores de expansión ortogonales que permiten a la red preservar la vida útil de la batería de los dispositivos finales conectados al optimizar los niveles de potencia y las tasas de datos del transmisor de esos dispositivos finales. Los factores de expansión que utiliza LoRa son SF7 a SF12. Esto nos da seis tasas de datos diferentes. Usando estas tasas de datos, también podemos cubrir una variedad de distancias desde la puerta de enlace hasta el dispositivo final del nodo.

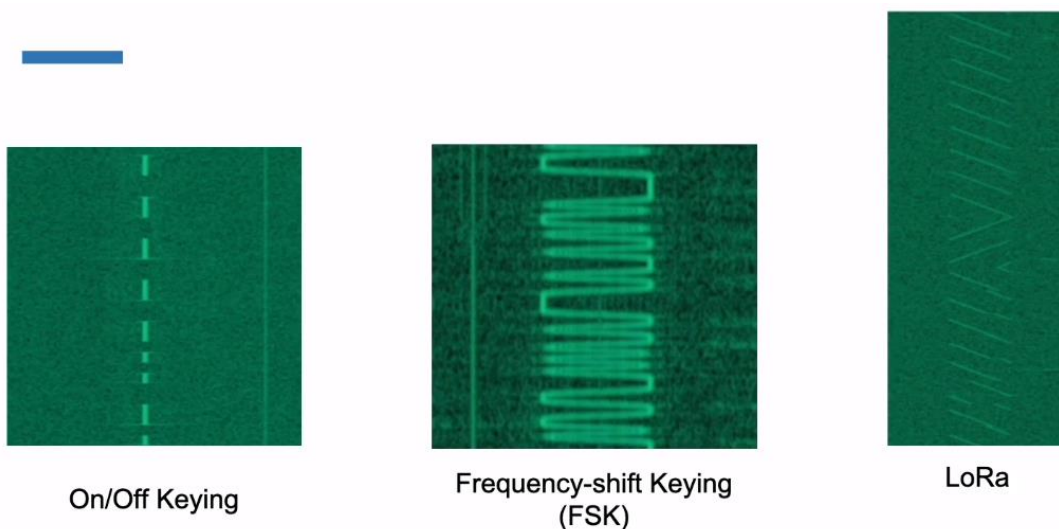
Este espectrograma muestra diferentes modulaciones de radio en acción. El eje horizontal representa la frecuencia y el eje vertical representa el tiempo. Imaginemos que está desplazándose verticalmente y que podemos ver las formas de onda de las ondas de radio cargadas a lo largo del tiempo. Vemos que varias transmisiones toman cierta cantidad de tiempo y que hay diferentes formas de onda.



Analicemos más de cerca las tres formas de onda. La imagen a la izquierda muestra la forma más simple de modulación de radio, llamada On/Off keying. Con este enfoque, cuando deseas transmitir un uno, habilitas el transmisor. Cuando deseas enviar un cero, deshabilitas el transmisor. Es algo así como el código Morse, pero más rápido. La modulación On/Off keying funciona muy bien, pero no es muy eficiente ni robusta en presencia de ruido e interferencias, por lo que no se usa muy a menudo. La imagen del medio ilustra la modulación por desplazamiento de frecuencia, en resumen, FSK. Con este enfoque comúnmente utilizado, los unos y ceros se codifican, es decir, se modulan, mediante el cambio de la frecuencia de transmisión. Como podemos ver en la imagen, las transmisiones se envían a una frecuencia más baja, mostrada a la izquierda, y a una frecuencia más alta, mostrada a la derecha. Al enviar un cero, transmitimos a la frecuencia

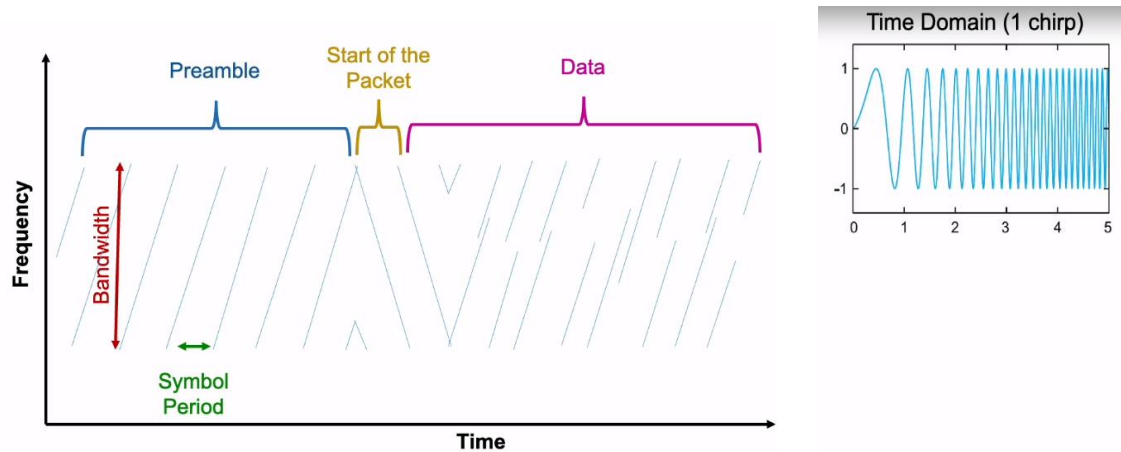


más baja, y al enviar un uno, transmitimos a la frecuencia más alta. FSK se utiliza a menudo para aplicaciones como mostrar información de identificación de llamadas, activar abridores de puertas de garaje e incluso por algunas formas de Bluetooth. Finalmente, la imagen a la derecha muestra una forma de onda real de LoRa. En algunos aspectos, es similar a FSK. Por ejemplo, también tiene límites de frecuencia con límites superior e inferior. Sin embargo, en lugar de saltar entre estos dos, hay un chirp continuo. Utilizando esta forma de onda de chirp, el transmisor modula continuamente la frecuencia desde la frecuencia más baja hasta la frecuencia más alta. Cuando la transmisión alcanza la frecuencia más alta, vuelve a cambiar a la frecuencia más baja. Al principio, veremos algunos chirps iguales. En algún momento posterior en la transmisión, veremos que los chirps comienzan a cambiar. Así es como se codifica la información en LoRa.

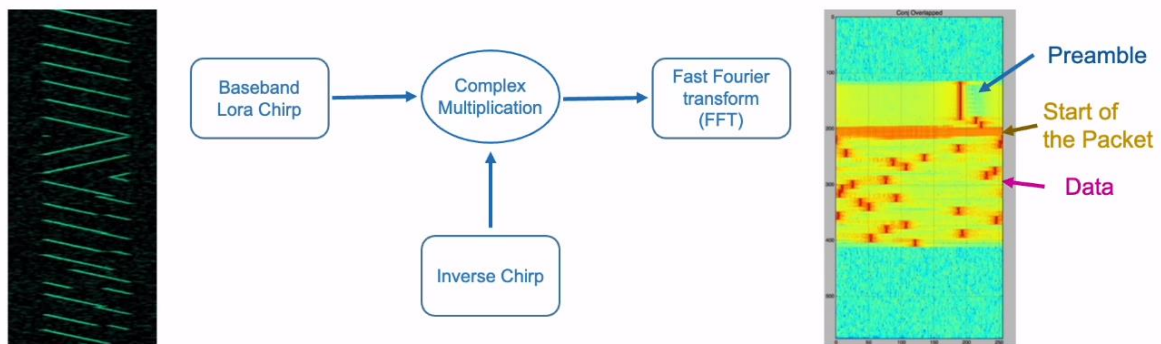


Con el siguiente diagrama, podemos observar más de cerca la señal de LoRa. El eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical representa la frecuencia de la transmisión. El ancho de banda es la cantidad de espacio entre el límite de frecuencia inferior y el límite de frecuencia superior. Los chirps están ilustrados por las líneas que van de bajo a alto. Una vez que es un chirp, lo llamamos un símbolo.

En esta ilustración, tenemos cuatro o cinco chirps, que forman una especie de preámbulo. Son el inicio del paquete. Luego vemos dos chirps descendiendo, por lo que comienzan en una frecuencia más alta y luego van a una frecuencia más baja. Esto indica el inicio del paquete. A continuación, tenemos la misma forma de onda, pero ahora hay saltos. Para cada período de símbolo, el cambio de fase del chirp se basa en los datos que queremos codificar. A veces, el salto es grande, a veces es pequeño. El tamaño de este salto nos dice el tipo de datos que se está transmitiendo. La imagen en la esquina superior derecha muestra la forma de onda real. Esto es el transmisor enviando una señal a 868 MHz. A una frecuencia más baja, oscila más lentamente y a una frecuencia más alta, oscila más rápido. Como podemos ver durante un solo período de símbolo, un "chirp", la frecuencia va aumentando.



Ahora observemos cómo se ve el diagrama como una señal real capturada mientras se transmite por el aire. Esta señal ha sido recibida por el chirp base de LoRa y luego multiplicada por el chirp inverso antes de ser demodulada con procesamiento de transformada rápida de Fourier (FFT). A la derecha, tenemos la imagen del espectrograma que resulta de esto. A continuación, vemos los dos chirps descendentes que se muestran como una línea sólida de valores. Debajo de eso, tenemos los símbolos decodificados. Aquí es donde están nuestros datos. Cuanto mayor sea el factor de expansión, más largos se vuelven estos símbolos y más tiempo hay para decodificarlos. Por lo tanto, podemos demodular señales más débiles.

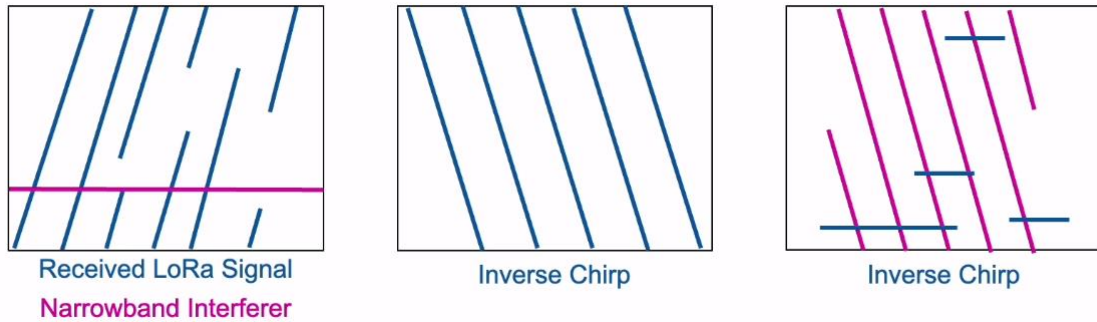


Entonces, ¿qué pasa si tenemos una interferencia? Aquí, es importante recordar que LoRa utiliza la banda ISM, que se comparte con muchos otros usuarios, la mayoría de los cuales utilizan modulaciones de radio diferentes para transmitir su información. Por ejemplo, alguien podría estar transmitiendo una señal desde un controlador de puertas de garaje. En este ejemplo, vemos la misma señal de LoRa nuevamente, pero ahora hay un interferente de banda estrecha de color rosa. Este interferente está transmitiendo a una frecuencia fija y está interfiriendo exactamente con nuestra señal de LoRa. Nuevamente, multiplicamos por los chirps inversos y ahora miramos la imagen que obtenemos a la derecha. Aquí, vemos nuestros símbolos de LoRa decodificados en azul, pero el interferente ahora se ha dispersado por todo el ancho de banda. Entonces, aunque era una sola frecuencia al principio, debido a la multiplicación por los chirps, ahora se dispersa por todo el ancho de banda. En este caso, si queremos ver en qué “bin” se encuentran nuestros datos y en qué valores de símbolo, debemos observar dónde hay más energía.





Dado que todos nuestros datos terminan en un solo “bin” y el interferente se dispersa por todos los “bins”, aún podemos decodificar nuestra propia señal. Así es como funciona LoRa en la banda ISM y cómo LoRa se vuelve robusto ante interferencias en la misma banda.



En esta simulación, podemos ver qué sucede cuando se agrega ruido a la señal LoRa. Comenzando en la parte superior, vemos la señal LoRa tal como fue transmitida por el transmisor. Nuevamente, vemos los chirps de preámbulo ascendentes, los dos chirps descendentes que señalan el inicio del paquete de datos, y luego los chirps modulados que componen los datos reales. La sección central muestra que se ha agregado un poco de ruido. Incluso con este ruido, aún podemos ver claramente la forma de onda de LoRa. La imagen en la parte inferior, sin embargo, es la más interesante. Se ha agregado tanto ruido que los chirps ya no son visibles a simple vista. Sin embargo, la computadora o el demodulador aún pueden leer la señal y extraer los datos correctos.

