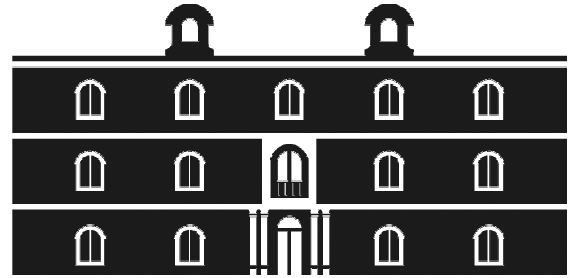




Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

DISEÑO DE UN MODELO
INFORMÁTICO PARA LA
ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA
GENERADA EN EL VEHÍCULO SOLAR
ANÍBAL

Titulación: Ingeniería Técnica Industrial
Especialidad Electricidad

Alumno/a: Miguel Ángel Ramírez Basalo

Director/a/s: Francisco de Asís Ruz Vila

Cartagena, 14 de Septiembre de 2012



ÍNDICE

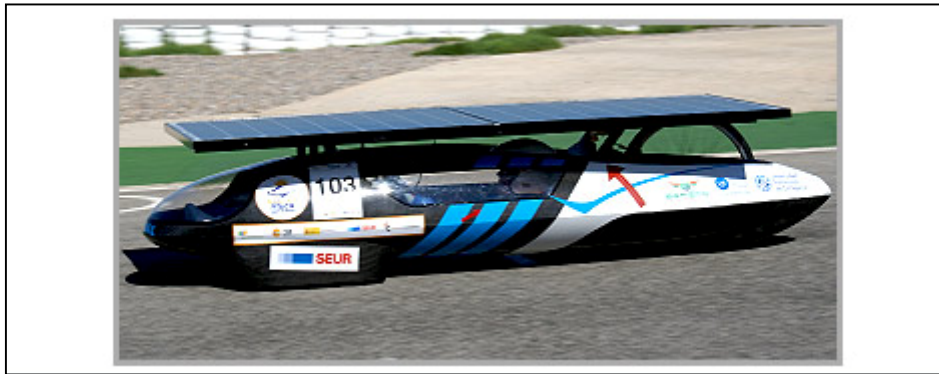
1. Antecedentes.....	6
1.1. Modelo existente	7
2. Objetivo del proyecto	12
3. Tecnología solar	15
3.1. Panel solar	15
3.2. Batería	18
3.3. Regulador de carga	20
3.4. Dispositivo de control del motor	23
3.5. Motor DC.....	24
4. Modelo del panel solar	28
4.1. Modelo de Duffie & Beckman	28
4.2. Modelo en Simulink	29
4.3. Graficas y resultados del modelo	33
4.4. Comportamiento del panel frente a variaciones de irradiancia	36
4.5. Comportamiento del panel frente a variaciones de temperatura	37
5. Modelo de radiación solar incidente.....	39
5.1. Ecuaciones de la radiación solar incidente	39
5.2. Creación del modelo en Simulink	49
6. Modelo de un circuito cualquiera	56

7. Circuito aleatorio de prueba	63
7.1. Creación del modelo	63
7.2. Resultados del modelo	66
8. Modelo de energía generada	70
8.1. Creación del modelo	70
9. Circuito de Cartagena	73
9.1. 1ª Caracterización	74
9.1.1. Resultados	80
9.2. 2ª Caracterización	85
9.2.1. Resultados	90
9.3. Conclusiones	94
10. Mejoras y futuros estudios	97
11. Conclusiones	99
12. Bibliografía	102
Anexo	104

Antecedentes

1. Antecedentes

Este proyecto se ve motivado por la incursión de la tecnología solar en los vehículos. Hoy en día la tecnología solar tiene avances prácticamente diarios, y se está implementando esta tecnología para usarla en el transporte. En la Universidad Politécnica de Cartagena se ha desarrollado un prototipo de coche solar, Aníbal, representado en la figura bajo estas líneas.



Coche Aníbal de la Universidad Politécnica de Cartagena

El prototipo está realizado físicamente y ha sido probado numerosas veces, incluso participando en la Solar Race de Murcia celebrada en el circuito de Cartagena, y en otras carreras solares de ámbito nacional. También ha sido exhibido en varias ocasiones, tanto individualmente como en exhibiciones donde hay varios prototipos de vehículos solares.

Con motivo de la colaboración con el departamento de ingeniería eléctrica de la UPCT en una beca de formación promocionada por la universidad, se realizará cualquier tipo de tarea relacionada con el coche solar, sobre todo en el ámbito de la simulación y desarrollo de un modelo informático para comprobar su funcionamiento e intentar mejorar su rendimiento.

Los coches solares son un tipo de vehículo propulsado a base de motores eléctricos alimentados por energía solar obtenida a través de paneles con células fotovoltaicas en su interior. Se suele utilizar baterías de almacenaje y apoyo, destinadas al almacenaje de energía eléctrica cuando la energía producida es excedente o para servir de fuente de energía extra para el motor eléctrico cuando necesita más energía.

Los coches solares normalmente no están diseñados para tener una buena apariencia y además no están pensados para muchas personas, siendo normalmente su capacidad como mucho para dos personas y con posiciones poco cómodas en habitáculos muy pequeños. Los habitáculos para el piloto tienen algunos de los elementos comunes a cualquier automóvil, como frenos, acelerador, intermitentes, espejos traseros (o cámara), ventilación, y a veces control de velocidad. También se cuenta con una radio para comunicarse con el equipo. Por lo tanto, no son un vehículo en sí, sino más bien prototipos de vehículos donde ir probando y estudiando la tecnología solar para que en el día de mañana se vaya implantando en el transporte diario de personas, utilizando las energías renovables con sus numerosos beneficios. A diferencia de los vehículos de carga solar, los automóviles solares no son actualmente una forma de transporte práctica.

Los automóviles solares compiten en carreras como la *World Solar Challenge* y la *American Solar Challenge*. Estos eventos son a menudo apoyados por agencias gubernamentales, como el Departamento de Energía de Estados Unidos, que se ocupa de promover el desarrollo de métodos de propulsión alternativa. En estas competiciones participan a menudo universidades para mejorar las habilidades de sus estudiantes, aunque también han participado muchos equipos profesionales, incluyendo equipos de General Motors y Honda. En este proyecto se tendrá en cuenta principalmente la Solar Race de la Región de Murcia promocionada por la Argem.

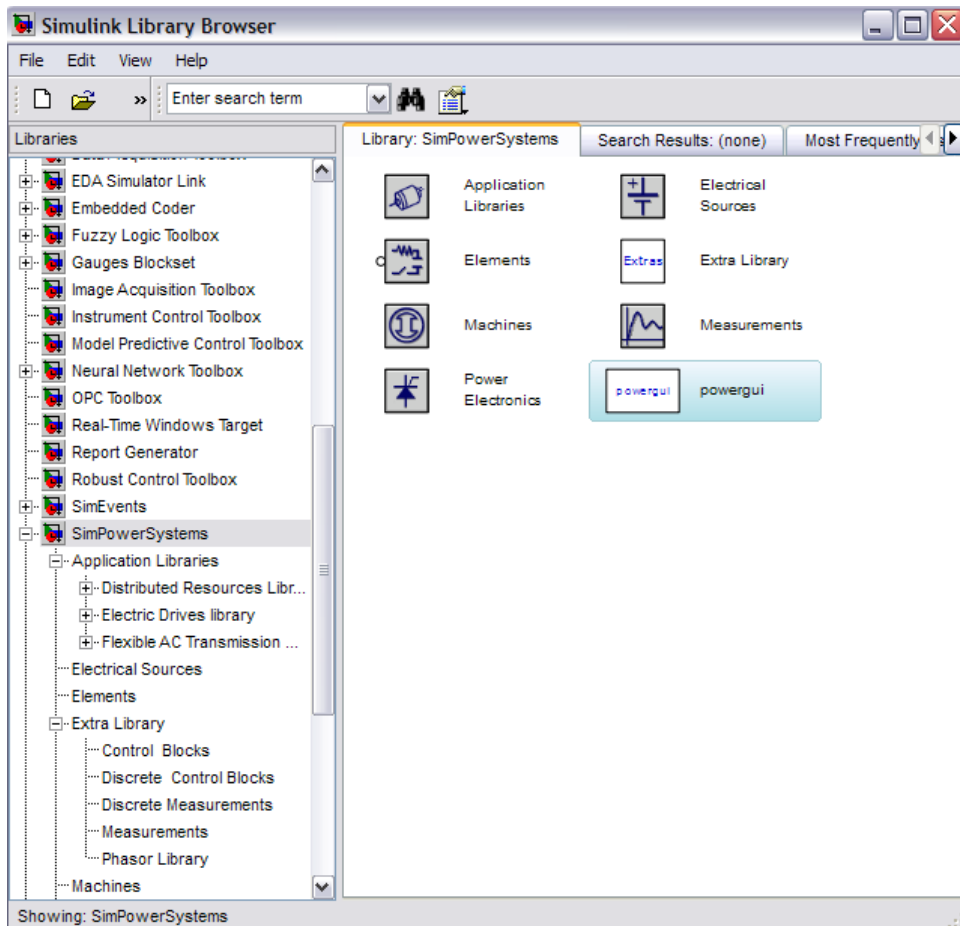
1.1. Modelo existente

El trabajo correspondiente a realizar un modelo informático que proporcione estimaciones suficientemente correctas para su uso se lleva haciendo desde el inicio de la idea de crear un vehículo solar. Otros compañeros/as de universidad empezaron a realizar un modelo que describiera el comportamiento del vehículo solar a grandes rasgos.

El programa utilizado para la creación del modelo y su posterior simulación es Simulink.

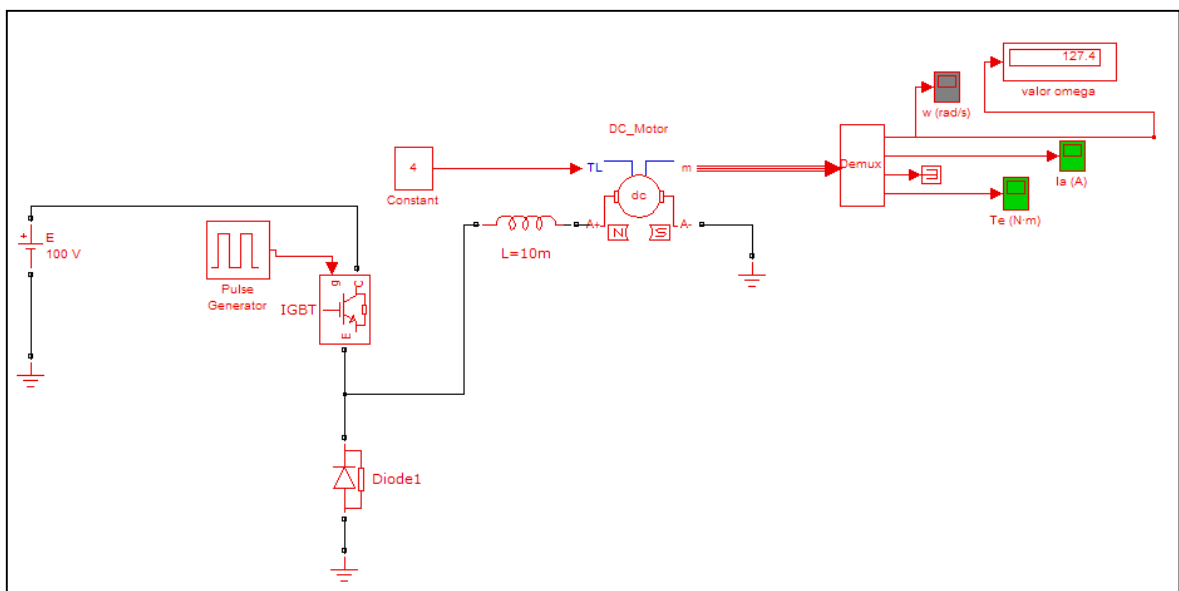
Simulink es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab. Genera archivos con extensión .mdl (de "model"). Simulink viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace hincapié en el análisis de sucesos, a través de la concepción de sistemas (cajas negras que realizan alguna operación), por tanto, se puede incluso ignorar el tipo de sistema siempre que tengamos los datos necesarios para su caracterización.

El modelo existente correspondiente al coche solar se compone de una caracterización inicial del coche, sin entrar a fondo en ninguno de los componentes. Se han utilizado bloques ya caracterizados de Simulink, en concreto, de la librería SimPowerSystems. Esta librería está compuesta de diferentes tipos de componentes relacionados con la electricidad y la electrónica.



Librería SimPowerSystems en Simulink

La estructura del sistema en Simulink tiene la forma de la imagen mostrada.



Modelo existente de simulación de vehículo solar (Ver en Anexo)

Se puede ver en este esquema como se ha colocado una fuente de tensión de corriente continua de 100 V simulando el sistema formado por los paneles fotovoltaicos y las baterías que darán apoyo al motor o absorberán la energía excedente creada por los paneles fotovoltaicos. Serán la fuente de energía para el motor. No es una aproximación del todo correcta porque tanto los paneles solares como las baterías van cambiando constantemente la tensión de alimentación.

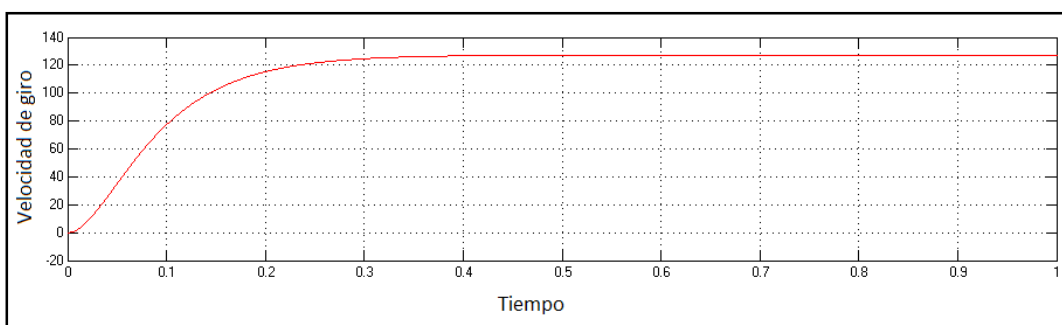
El IGBT junto con el diodo y la inductancia L forman un sistema conversor de tensión reductor para adaptarla al motor, este conjunto simula la función del regulador de carga que ira controlando la potencia y tensión que se le entrega a la carga, en este caso, el motor. Se reduce la tensión de la fuente de alimentación para adaptarla justo a las tensiones necesarias para el motor.

El motor es una máquina de corriente continua sin escobillas de imanes permanentes. Es un bloque ya definido de Simulink (Discrete DC Machine) que contiene todos los parámetros que lo pueden caracterizar correctamente y las medidas que puedan ser necesarias. En el modelo además de la alimentación del motor, se incluye una entrada para modelar el par resistente (TL), que en este caso se ha considerado constante para las primeras estimaciones de funcionamiento del motor aunque realmente no será así ya que ira variando con los trayectos del coche, y otra salida con los datos de medida. Esta salida contiene varios datos distintos, por lo que para su correcta lectura habrá que pasarla por un demultiplexor que las separe para posteriormente introducir las en los osciloscopios que proporcionaran las graficas de los datos que queremos visualizar.

Se han colocado tres osciloscopios en el modelo para la lectura de la velocidad de giro, la intensidad absorbida por el motor y el par generado por el motor. También se ha colocado un display para visualizar la velocidad de giro una vez haya llegado el motor al régimen permanente.

A continuación se muestran las graficas que proporcionan los osciloscopios con los datos indicados en el modelo.

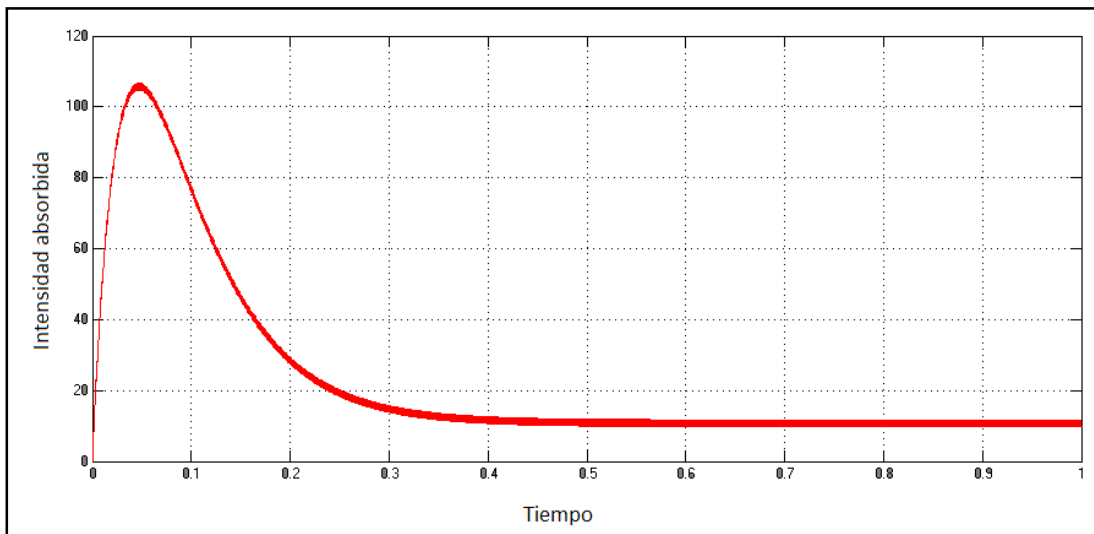
- Velocidad de giro (rad/s)



Velocidad de giro del motor en rad/s con respecto al tiempo

En esta grafica se observa como la velocidad va aumentando de 0 hasta una velocidad permanente, cuando el motor puede proporcionar suficiente fuerza para vencer el par resistente.

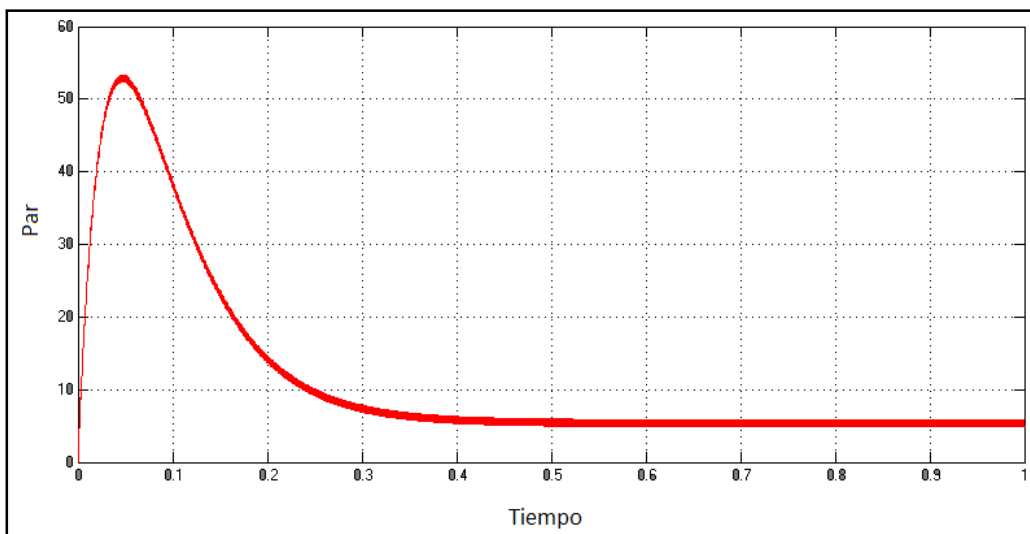
- Intensidad absorbida por el motor (A)



Intensidad absorbida por el motor en A con respecto al tiempo

La intensidad absorbida por el motor corresponde con la curva típica de intensidad en el arranque de un motor, de ahí que se observe el pico de intensidad generado en el arranque del motor.

- Par motor desarrollado por la maquina



Par desarrollado por el motor en función del tiempo

Se puede ver como el par de arranque del motor presenta un pico de par para producir el arranque hasta estabilizarse en el punto de funcionamiento. Se estabiliza en el momento que el par motor desarrollado coincide aproximadamente con el par resistente.

Dado que los datos obtenidos en las graficas son los lógicos para el arranque de un motor, se puede afirmar que el modelo en principio consigue su cometido que es el de conseguir una primera aproximación, sin ser totalmente exacta, del funcionamiento del motor en el coche solar.

Objetivo del proyecto

2. Objetivo del proyecto

A partir del modelo ya existente de Matlab, compuesto por una fuente de tensión continua, un bloque de simulación del regulador y un motor de corriente continua sin escobillas (brushless DC motor), se quiere desarrollar cualquier tipo de simulación que pueda ayudar en el diseño y simulación del coche solar haciendo ver las partes donde se puede mejorar o cualquier aplicación que pueda ayudar en la configuración del coche dependiendo de las condiciones solares. Después de pensar en distintas posibilidades, desde caracterización de baterías hasta estudiar la inclusión de supercondensadores en lugar de baterías para un mejor método de uso de la energía; se presenta la idea de modelizar los paneles solares del coche y la energía eléctrica generada por estos dependiendo de la posición que adopte el panel, la hora del día, el día del año, etc...

Esta última idea será el propósito del presente proyecto y con una correcta simulación final que se aproxime a datos reales se verá cumplido el objetivo. Se realizará también una simulación de todo el trayecto realizado por el coche solar en el circuito de Cartagena, para así poder contabilizar la energía generada por el coche en una vuelta o en las vueltas que se precisen, en un día determinado del año, pudiendo de esta manera simular las condiciones del día y de esta manera estimar la energía que generaremos en el circuito en esas condiciones. Esta herramienta puede ser de gran utilidad en el futuro puesto que antes de poner en marcha el coche solar podemos obtener una estimación de la energía que será generada y ver si nos conviene participar en la carrera Solar Race, ya que una de las condiciones es un balance de energía positivo, es decir, generar más energía de la que se consume, y si las estimaciones nos indican que la producción va a ser menor se puede valorar la opción de realizar cambios o cambiar el momento de uso del coche.

Esta simulación se hará con Matlab, en concreto Simulink, ya que es la herramienta que se ha utilizado en el modelo existente y así se podría crear una interconexión más adelante de los dos modelos existentes, adaptando el modelo del panel solar con la energía generada en el circuito al modelo existente compuesto por el conjunto del regulador y el motor de corriente continua, por lo que así se podría observar la variación real de energía aportada al motor a través de los paneles solares, y la variación de par motor del motor del coche solar, aunque esto se debería realizar cuando el regulador de carga este correctamente modelizado, que posiblemente sea una de las tareas más difíciles de realizar y que se dejara para posteriores trabajos.

En Simulink se crearán diferentes diagramas de bloques en los que se podrán ir introduciendo las ecuaciones que caracterizan los comportamientos del panel solar y de la radiación solar. En este caso simplemente se utilizarán los bloques básicos para ir componiendo ecuaciones y creando tablas de datos que se adapten a el modelo deseado. De esta manera se conseguirá de una manera manual, es decir, sin bloques directos de Simulink, modelizar el panel solar a partir de sus ecuaciones características y modelizar la radiación solar así como los circuitos, en especial, el circuito de velocidad de Cartagena, donde se realiza la Solar Race de Murcia cada año.

Por lo tanto, se ha marcado como objetivo del proyecto crear un modelo en el que quede perfectamente caracterizado un panel solar, al que más tarde otorgaremos las características específicas del panel colocado en el coche solar, y caracterizar la radiación solar incidente en el panel dependiendo de las condiciones de instalación del panel y del movimiento de éste por el circuito, ya que el coche solar no es un sistema fijo sino que va variando conforme al movimiento del coche por el circuito, de ahí la complejidad de este modelo, en el que irá variando la radiación solar en cortos periodos de tiempo.

Tecnología solar

3. Tecnología solar

En este apartado se describirán los componentes de un coche solar desde el punto de vista tecnológico, explicando brevemente cada uno de los componentes y todo su funcionamiento.

La instalación solar correspondiente a un coche se compone principalmente de los paneles solares, las baterías, el regulador de carga y el motor de corriente continua, así como el dispositivo de control de tracción del motor, encargado de ir variando la velocidad según decida el piloto.

Este tipo de instalación solar es análoga a las típicas instalaciones solares aisladas en las que se utiliza la energía solar para abastecer una pequeña vivienda; en este tipo de instalaciones el excedente de energía una vez las baterías están cargadas no se aprovecha, en contra de las instalaciones de conexión a red en la que se aprovecha totalmente todo ya que se inyecta a la red.

3.1. Panel solar

Un panel solar es un conjunto de células fotovoltaicas que pueden generar electricidad al estar expuestas a la radiación solar. Estas células convierten la radiación solar en electricidad a partir del efecto fotovoltaico que genera cargas en dos semiconductores próximos de diferente tipo.

El principio de funcionamiento, de forma simplificada, se puede explicar de la siguiente forma: el impacto de los fotones que provienen de la radiación solar es absorbido por el material semiconductor, y los electrones son golpeados por el fotón obteniendo la energía necesaria para salir de su banda correspondiente y circular libremente produciendo electricidad.

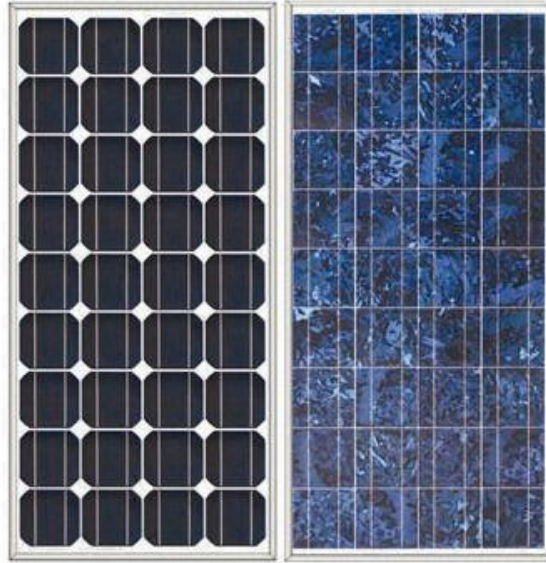
Al mismo tiempo se van creando huecos (cargas positivas virtuales), que van fluyendo en el sentido contrario a los electrones.

De esta manera al final se consigue un voltaje constante entre los bornes del panel solar.

La célula solar más usual está fabricada en silicio y configurada como una gran área de unión p-n. Una simplificación de este tipo de placas puede considerarse como una capa de silicio de tipo n directamente en contacto con una capa de silicio de tipo p. En la práctica, las uniones p-n de las células solares se elaboran por difusión de un tipo de dopante en una de las caras de una oblea de tipo p, o viceversa.

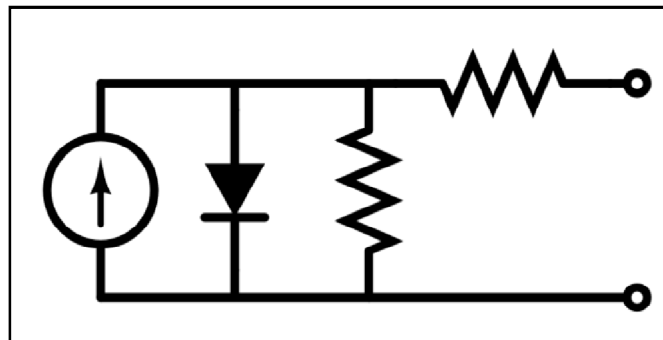
Se clasifican por su potencia pico, que se corresponde con la potencia máxima que el panel puede entregar bajo condiciones estándar de 1000 W/m² de radiación y 25 °C de temperatura. Los paneles pueden ser monocristalinos, policristalinos o amorfos.

Su efectividad es mayor cuanto mayores son los cristales, pero también su peso, grosor y coste. El rendimiento de las primeras puede alcanzar el 20% mientras que el de las últimas puede no llegar al 10%, sin embargo su coste y peso es muy inferior.



Paneles solares

El esquema resultante equivalente de un panel fotovoltaico es el representado a continuación.

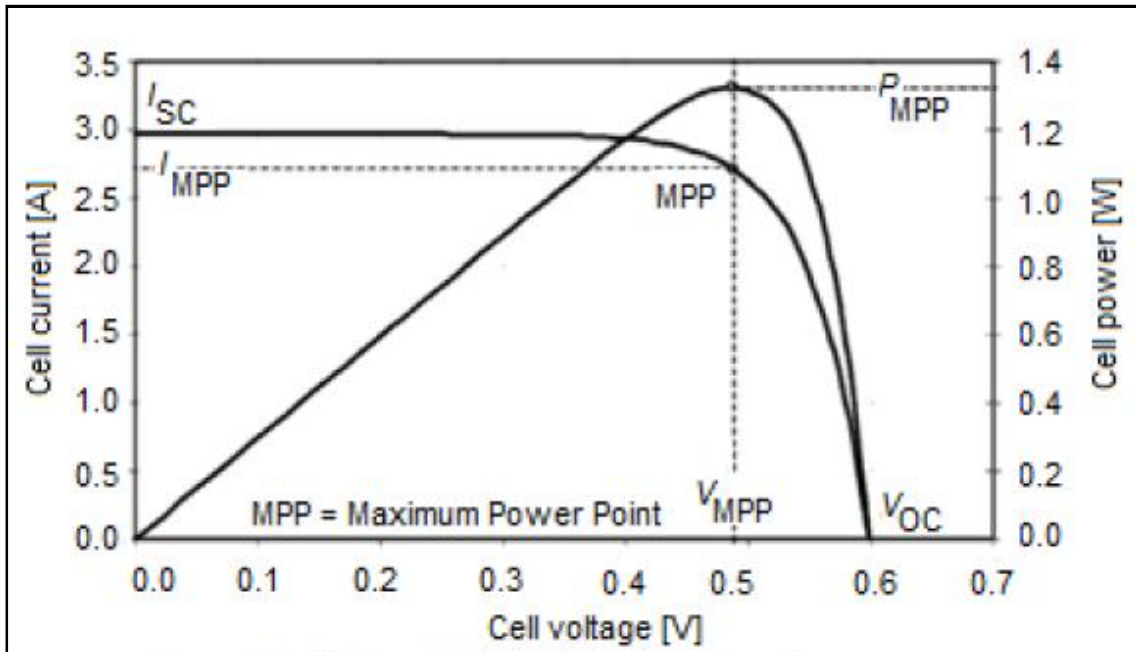


Esquema equivalente de un panel fotovoltaico

Se compone de una fuente de intensidad que proporciona corriente al circuito a través de una resistencia en paralelo que hace que todo el voltaje se concentre en los bornes de la placa. También existe una resistencia serie que representa las pequeñas pérdidas que se producen en la generación. Normalmente la resistencia serie es muy pequeña y la resistencia en paralelo de muy alto valor.

Este tipo de paneles producen electricidad en corriente continua y aunque su efectividad depende tanto de su orientación hacia el sol como de su inclinación con respecto a la horizontal, se suelen montar instalaciones de paneles con orientación e inclinación fija, por ahorros en mantenimiento. Tanto la inclinación como la orientación, al sur, se fija dependiendo de la latitud y tratando de optimizarla al máximo usando las recomendaciones de la norma ISO correspondiente. Aunque en este caso el panel está fijo al coche, pero el coche está en constante movimiento por lo que habrá que caracterizar el panel como una instalación con movimiento.

Los paneles solares se modelizan a través de sus curvas características de tensión-potencia y tensión-corriente, existiendo muchos valores posibles de tensión que proporcionan distintas intensidades y potencias.



Curvas características de un panel solar

En la grafica se muestran las dos curvas y se puede ver marcado como MPP, el punto de máxima potencia.

Hay distintos parámetros para definir la eficiencia de un panel solar. Dos de los más importantes son la eficiencia en la conversión de la energía y el factor de llenado o de forma.

La eficiencia en la conversión de la energía es la relación directa entre la potencia máxima que puede ofrecer el panel solar, y la potencia máxima que en realidad recibe el panel solar en esas condiciones, siendo esta la irradiancia recibida (W/m^2) por el área total del panel (m^2).

$$\eta = \frac{P_m}{E \times A_c}$$

El factor de llenado o factor de forma es la relación entre la potencia máxima que puede ofrecer el panel, y la potencia que ofrecería si con la tensión de circuito abierto aportara la corriente de cortocircuito. Esta relación indica como de parecida a un rectángulo es la curva característica del panel.

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{\eta \times A_c \times E}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

Los paneles solares tienen distintas aplicaciones, entre las que se pueden enunciar:

- Centrales conectadas a red con subvención a la producción.
- Estaciones repetidoras de microondas y de radio.
- Electrificación de pueblos en áreas remotas (Electrificación rural).
- Instalaciones médicas en áreas rurales.
- Corriente eléctrica para casas de campo.
- Sistemas de comunicaciones de emergencia.
- Sistemas de vigilancia de datos ambientales y de calidad del agua.
- Faros, boyas y balizas de navegación marítima.
- Bombeo para sistemas de riego, agua potable en áreas rurales y abrevaderos para el ganado.
- Balizamiento para protección aeronáutica.
- Sistemas de protección catódica.
- Sistemas de desalinización.
- Vehículos de recreo.
- Señalización ferroviaria.
- Sistemas para cargar los acumuladores de barcos.
- Fuente de energía para naves espaciales.
- Postes SOS (Teléfonos de emergencia de carretera).
- Parquímetros.
- Recarga de Scooters Eléctricos

Los datos reales de los paneles fotovoltaicos instalados en el coche solar Aníbal se presentan más adelante, cuando sean necesarios en el apartado de modelado del panel solar.

3.2. Batería

Las baterías son dispositivos capaces de almacenar energía eléctrica mediante procesos electroquímicos. La energía eléctrica en su interior está disponible para su uso y cuando esta se ha gastado, hay que volver a recargarla si se quiere volver a usar mediante lo que se llama proceso de carga. Es un generador eléctrico secundario ya que debe ser previamente cargado para poder funcionar. Hay que diferenciar entre los términos pila y batería, ya que en la pila normalmente el proceso es irreversible mientras que la batería tiene un ciclo de vida de muchos procesos de carga y descarga.

El principio de funcionamiento, fundamentalmente químico, se basa en el proceso reversible de reducción-oxidación (reacciones redox). Uno de los componentes se oxida mientras el otro se reduce, de esta manera los componentes no se consumen ni se pierden solamente van cambiando su estado de oxidación, pudiendo revertir el proceso durante un elevado número de veces. Normalmente las celdas constan de dos electrodos bañados en un electrolito. Se van configurando las celdas en serie y en paralelo para obtener los distintos tipos de baterías deseadas, obteniendo distintos valores de tensión y capacidad de la batería.



Batería

Hay distintos tipos de baterías como pueden ser:

- Baterías de plomo-ácido
- Pila alcalina
- Baterías de níquel-hierro (Ni-Fe)
- Baterías alcalinas de manganeso
- Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd)
- Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH)
- Baterías de iones de litio (Li-ion)
- Baterías de polímero de litio (LiPo)

Y aunque no sean exactamente acumuladores, también se pueden considerar en este grupo las pilas de combustible y los condensadores de alta capacidad (supercondensadores).

Los parámetros que definen a una batería o acumulador son:

- Tensión: es la tensión nominal en bornes del acumulador, se mide en voltios y viene determinado por el tipo de par redox utilizado en la fabricación de las celdas internas de la batería y de la cantidad existente de ellas.
- Capacidad del acumulador: se mide en amperios hora e indica la cantidad de corriente que puede suministrar en una hora, por lo tanto, sabiendo la intensidad que necesita una aplicación y la capacidad del acumulador se puede predecir el tiempo que durara la batería.
- Energía: es el producto de la capacidad del acumulador por la tensión en bornes, se expresa en Wh, y nos indica la energía disponible en el acumulador.
- Energía específica: es la relación de la energía de la batería con respecto a su peso total. Se expresa en Wh/kg y lo ideal es que sea lo más alto posible para que la batería tenga mucha energía por cada unidad de peso que tenga.
- Otras como pueden ser la existencia de efecto memoria, resistencia interna, etc...

Las baterías utilizadas en el coche solar Aníbal son baterías de litio (LiFePO₄). Se utilizan unas baterías que simulan a las baterías de plomo-acido, que eran las anteriormente instaladas, porque el regulador de carga estaba preparado para este tipo de baterías. Estas baterías han sido probadas, obteniendo un funcionamiento óptimo. Las baterías son de 12 V de tensión y de 12 Ah de capacidad, es decir, 144 Wh. Su peso es de 1,568 Kg. En el coche solar normalmente se instalarán 3 de estas baterías en serie para obtener una tensión de 36 V y una capacidad de 12 Ah.

3.3. Regulador de carga

El regulador de carga es el dispositivo encargado de proteger a la batería frente a sobrecargas y sobredescargas profundas. El regulador controla el estado de carga de las baterías, así como la intensidad que se encarga de cargarlas. De esta manera se puede alargar la vida útil de las baterías al no someterlas a una excesiva carga o descarga.

Hoy en día, los reguladores están compuestos de microcontroladores que proporcionan una correcta gestión del sistema fotovoltaico en que este instalado el controlador, de esta manera el regulador actúa de forma automática según la situación de cada momento. Aunque los reguladores sean automáticos siempre poseen una serie de parámetros que pueden modificarse manualmente si fuera necesario. Los reguladores también memorizan datos para realizar históricos con los diferentes datos recogidos a través del tiempo.

Existen dos tipos de reguladores de carga, los lineales y los conmutados.

A continuación se explica cómo trabajan los reguladores de carga generalmente.

- Regulación De La Intensidad De Carga De Las Baterías: igualación, carga profunda, flotación.

IGUALACIÓN

Esta respuesta del regulador permite la realización automática de cargas de igualación de los acumuladores tras un período de tiempo en el que el estado de carga ha sido bajo, reduciendo al máximo el gaseo en caso contrario.

CARGA PROFUNDA

Tras la igualación, el sistema de regulación permite la entrada de corriente de carga a los acumuladores sin interrupción hasta alcanzar el punto de tensión final de carga. Alcanzado dicho punto el sistema de regulación interrumpe la carga y el sistema de control pasa a la segunda fase, la flotación.

Cuando se alcanza la tensión final de carga, la batería ha alcanzado un nivel de carga próximo al 90% de su capacidad, en la siguiente fase se completará la carga.

CARGA FINAL Y FLOTACIÓN

La carga final del acumulador se realiza estableciendo una zona de actuación del sistema de regulación dentro de lo que denominamos "Banda de Flotación Dinámica". La BFD es un rango de tensión cuyos valores máximo y mínimo se fijan entre la tensión final de carga y la tensión nominal + 10% aproximadamente.

Una vez alcanzado el valor de voltaje de plena carga de la batería, el regulador inyecta una corriente pequeña para mantenerla a plena carga, esto es, inyecta la corriente de flotación. Esta corriente se encarga por tanto de mantener la batería a plena carga y cuando no se consume energía se emplea en compensar la autodescarga de las baterías.

-Indicadores De Estado: Desconexión Del Consumo Por Baja Tensión De Baterías, Alarmas De Señalización

DESCONEXIÓN DEL CONSUMO POR BAJA TENSIÓN DE BATERÍA

La desconexión de la salida de consumo por baja tensión de batería indica una situación de descarga del acumulador próxima al 70% de su capacidad nominal.

Si la tensión de la batería disminuye por debajo del valor de tensión de maniobra de desconexión de consumo durante más de un tiempo establecido, se desconecta el consumo. Esto es para evitar que una sobrecarga puntual de corta duración desactive el consumo. Tensión de desconexión del consumo: tensión de la batería a partir de la cual se desconectan las cargas de consumo.

ALARMA POR BAJA TENSIÓN DE BATERÍA

La alarma por baja tensión de batería indica una situación de descarga considerable. A partir de este nivel de descarga las condiciones del acumulador comienzan a ser comprometidas desde el punto de vista de la descarga y del mantenimiento de la tensión de salida frente a intensidades elevadas.

Esta alarma está en función del valor de la tensión de desconexión de consumo (siempre se encontrará 0,05 volt/elem. por encima).

En el regulador DSD, Si la tensión de la batería disminuye por debajo del valor de la alarma durante más de 10 segundos aprox. se desconecta el consumo. El regulador entra entonces en la fase de igualación y el consumo no se restaurará hasta que la batería no alcance media carga. Además, incluye una señal acústica para señalar la batería baja

PROTECCIONES TÍPICAS

Contra sobrecarga temporizada en consumo
Contra sobretensiones en paneles, baterías y consumo.
Contra desconexión de batería.

INDICADORES DE ESTADO/ SEÑALIZADORES HABITUALES

Indicadores de tensión en batería.
Indicadores de fase de carga.
Indicadores de sobrecarga/ cortocircuito.

PARÁMETROS A CALCULAR, DIMENSIONAMIENTO

Tensión nominal: la del sistema (12, 24, 48)
Intensidad del regulador: la intensidad nominal de un regulador ha de ser mayor que la recibida en total del campo de paneles FV.

-Parámetros importantes que determinan su operación

- Intensidad Máxima de Carga o de generación: Máxima intensidad de corriente procedente del campo de paneles que el regulador es capaz de admitir.
- Intensidad máxima de consumo: Máxima corriente que puede pasar del sistema de regulación y control al consumo.
- Voltaje final de carga: Voltaje de la batería por encima del cual se interrumpe la conexión entre el generador fotovoltaico y la batería, o reduce gradualmente la corriente media entregada por el generador fotovoltaico (I flotación). Vale aproximadamente 14.1 para una batería de plomo ácido de tensión nominal 12V.

El regulador utilizado en el coche Anibal, es el modelo MX 60 de Out Back, Power Systems. Este regulador permite rastrear el MPP, máximo punto de potencia, el cual habilita al sistema a alcanzar la máxima eficiencia posible, haciendo poner el sistema en el voltaje adecuado para la máxima obtención de potencia. Tiene un rango de hasta 60A de CD, puede acoplarse a sistemas de baterías desde 12 hasta 60V CD, con voltajes a circuito abierto de hasta 120V DC. Dispone de una pantalla de cuarzo líquido para fácil uso y comprensión, muestra cuatro líneas de 80 caracteres, con iluminación ajustable, la cual es también utilizada para programación y monitoreo del sistema.



Regulador de carga del coche solar

3.4. Dispositivo de control del motor

El motor del coche solar no irá directamente conectado al regulador de carga del sistema ya que se quiere ir regulando la velocidad de giro del motor para coger más velocidad o menos.

Este dispositivo controlador obtendrá la señal de un puño que ira controlando el piloto del coche solar para indicar la velocidad deseada. El controlador traducirá esta señal mandando posteriormente la indicación correspondiente al motor, en forma de potencia eléctrica necesaria para circular a esa velocidad. El puño es simplemente un potenciómetro que irá cambiando el valor de resistencia, y por consiguiente el valor de intensidad, recibiendo el controlador esta señal.

El modelo utilizado para el coche solar Aníbal es el Maxon motor control ADS 50/10 servoamplificador 4-Q-DC. Este controlador se encuentra protegido contra sobrecorrientes, exceso de temperatura y cortocircuitos en el bobinado del motor.

Este controlador dispone de cuatro modos de funcionamiento: control de velocidad por tacodinamo, control de velocidad por encoder, control de velocidad por compensación I_xR y control de velocidad de par o corriente.

El modo de funcionamiento utilizado es el de compensación I_xR , que consiste en regular con la siguiente expresión:

$$IG + V = Kn + IR$$

Variando G se cambia el aporte de tensión a los bornes del motor, variando así la velocidad.



Controlador del motor

3.5. Motor DC

El motor de corriente continua es una máquina que convierte la energía eléctrica continua en mecánica, provocando un movimiento rotatorio.

Esta máquina de corriente continua es una de las más versátiles en la industria. Su fácil control de posición, paro y velocidad la han convertido en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos. Pero con la llegada de la electrónica su uso ha disminuido en gran medida, pues los motores de corriente alterna, del tipo asíncrono, pueden ser controlados de igual forma a precios más accesibles para el consumidor medio de la industria. A pesar de esto los motores de corriente continua se siguen utilizando en muchas aplicaciones de potencia (trenes y tranvías) o de precisión (máquinas, micro motores, etc.)

La principal característica del motor de corriente continua es la posibilidad de regular la velocidad desde vacío a plena carga.

Su principal inconveniente, el mantenimiento, muy caro y laborioso.

Una máquina de corriente continua (generador o motor) se compone principalmente de dos partes, un estator que da soporte mecánico al aparato y tiene un hueco en el centro generalmente de forma cilíndrica. En el estator además se encuentran los polos, que pueden ser de imanes permanentes o devanados con hilo de cobre sobre núcleo de hierro. El rotor es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, al que llega la corriente mediante dos escobillas.

También se construyen motores de CC con el rotor de imanes permanentes para aplicaciones especiales.

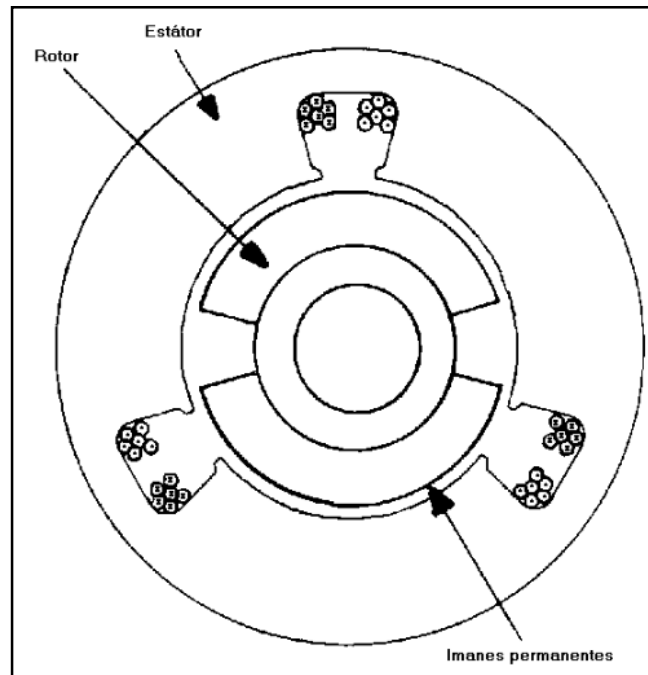
Los motores eléctricos solían tener un colector de delgas o un par de anillos rozantes. Estos sistemas, que producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, desprenden calor y ruido, requieren mucho mantenimiento y pueden producir partículas de carbón que manchan el motor de un polvo que, además, puede ser conductor. En este caso, el motor de corriente continua es un motor sin escobillas de imanes permanentes.

Los primeros motores sin escobillas fueron los motores de corriente alterna asíncronos. Hoy en día, gracias a la electrónica, se muestran muy ventajosos, ya que son más baratos de fabricar, pesan menos y requieren menos mantenimiento, pero su control era mucho más complejo. Esta complejidad prácticamente se ha eliminado con los controles electrónicos.

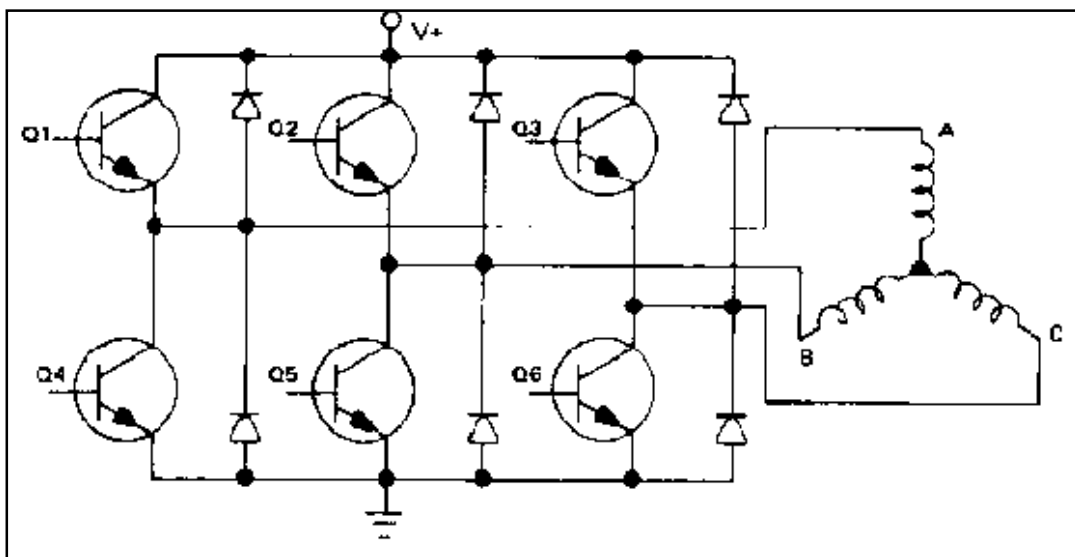
El inversor debe convertir la corriente alterna en corriente continua, y otra vez en alterna de otra frecuencia. Otras veces se puede alimentar directamente con corriente continua, eliminando el primer paso. Por este motivo, estos motores de corriente alterna se pueden usar en aplicaciones de corriente continua, con un rendimiento mucho mayor que un motor de corriente continua con escobillas. Algunas aplicaciones serían los coches y aviones con radiocontrol, que funcionan con pilas.

Las ideas fundamentales para el motor eléctrico de corriente continua sin escobillas son:

- En el estator se situarán las bobinas, siendo el rotor los imanes. Por tanto, colector y escobillas se eliminan.
- El regulador electrónico excitará, a partir de la corriente continua de las baterías, las bobinas del estator de forma secuencial, produciendo un campo magnético giratorio que arrastrará el rotor.
- La regulación de velocidad se realizará variando la frecuencia de excitación de las bobinas.



Interior del motor de corriente continua



Control de bobinados del motor

El motor del vehículo solar es un motor de 200 W acoplado a una rueda (in Wheel motor). El vehículo tendrá dos ruedas mas pero absolutamente libres

Modelo del panel solar

4. Modelo del panel solar

En la creación del modelo de panel solar se utilizarán las ecuaciones características de los paneles para crear bloques que representen el funcionamiento de este.

Para crear el modelo se utilizará el modelo aproximado de Duffie & Beckman.

4.1. Modelo de Duffie & Beckman

En este modelo se comienza a partir de la siguiente ecuación que caracteriza el circuito equivalente del panel solar.

$$I = I_L - I_o \left[e^{\frac{V+I*Rs}{Vt}} - 1 \right] - \frac{V + I * Rs}{Rp}$$

Sobre esta ecuación se harán diferentes consideraciones que la simplificarán y resultará una ecuación más simple pero una buena aproximación del comportamiento del panel.

Las consideraciones son que el término exponencial es mucho mayor que 1, por lo que el último se anula; la resistencia en paralelo es muy grande por lo tanto el último término de la ecuación tiende a cero y desaparece.

Además en circuito abierto se cumple que $I_o = I_L * e^{\frac{-Voc}{Vt}}$; y en cortocircuito se cumple que $I_L = I_{sc}$.

Con todas estas simplificaciones la ecuación de la intensidad queda como

$$I = I_{sc} * \left(1 - e^{\frac{V-Voc+I_{sc}*Rs}{Vt}} \right)$$

Esta es la ecuación que muestra el comportamiento del panel solar, pero a una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Para considerar cambios de temperatura y de irradiancia se tendrán en cuenta dos variaciones, correspondientes a la intensidad de cortocircuito con la irradiancia, y a la tensión de circuito abierto con la temperatura que vienen determinadas por las siguientes expresiones.

$$I_{sc} = G * \frac{I_{sc, stc}}{G_{stc}}$$

$$Voc = Voc, stc - 0,0023(T - 25)$$

Introduciendo estas variaciones en la ecuación principal quedará la ecuación como:

$$I = G * \frac{I_{sc, stc}}{G_{stc}} * \left(1 - e^{\frac{V - (Voc, stc - 0,0023(T-25)) + G * \frac{I_{sc, stc}}{G_{stc}} * Rs}{Vt}} \right)$$

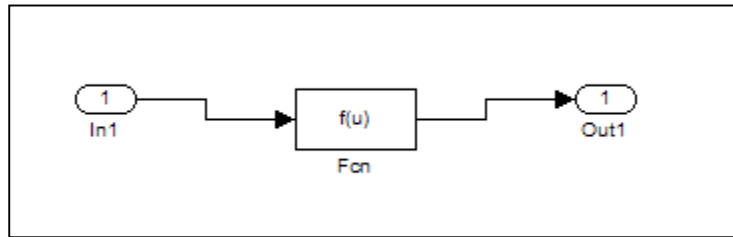
Esta ecuación es la que se introducirá en el programa Simulink para simular el comportamiento del panel solar. Ahora se explica lo que significa cada término:

- G: irradiancia solar incidente
- G_{stc}: irradiancia solar estándar, con la cual se han determinado los valores de tensión de circuito abierto e intensidad de cortocircuito.
- I_{sc, stc}: intensidad de cortocircuito en condiciones estándar, es el dato extraído de la hoja de características del panel solar.
- V: tensión en bornes del panel solar.
- V_{oc, stc}: tensión de circuito abierto en condiciones estándar, es el dato extraído de la hoja de características del panel solar.
- T: temperatura del panel solar.
- R_s: resistencia en serie del panel solar, se considerara de un pequeño valor de 0,001 ohmios.
- V_t: tensión umbral de los diodos que forman el panel. Esta tensión umbral se puede extraer para un diodo como $V_t = \frac{nKt}{q}$, siendo n el factor de idealidad del diodo (se considerara 1), K la constante de Boltzmann que vale $1,38 \cdot 10^{-23}$, t la temperatura (25°C) y q la carga del electrón, que tiene un valor de $1,6 \cdot 10^{-19}$. Con estos datos obtenemos una V_t=0,02568. Esta tensión umbral tendrá que ser multiplicada por el número de células en serie que tenga el panel solar, en principio no se tienen datos de este tipo, por lo que se utilizara un valor de 36, típico en la fabricación de paneles solares. El valor total de V_t será de 0,92448.

4.2. Modelo en Simulink

Se procede a crear el modelo en Simulink. Para esto lo primero que se debe hacer es introducir las formulas en un bloque que nos permita su reproducción. La formula principal que nos caracteriza la curva intensidad-tensión del panel fotovoltaico es una ecuación que nos relaciona una intensidad con una tensión, dependiendo también de radiación y temperatura, pero que se modelizara en el siguiente apartado. Por tanto, en este apartado se considerara solamente la intensidad dependiente de la tensión, aunque la radiación y la temperatura se pondrán como variables que podemos cambiar en la máscara del bloque de función.

Se introduce la formula en un bloque de función, poniendo como variable dependiente la tensión e indicándolo como 'u'. La formula anteriormente definida introducida en el bloque de función queda como: $G \cdot (I_{sc} / G_{stc}) \cdot (1 - \exp((u - V_{oc} + 0.0023 \cdot (T - T_{amb}) + G \cdot (I_{sc} / G_{stc}) \cdot R_s) / V_t))$ y en el programa se incluirá en un subsistema que será el panel solar, quedando el interior del subsistema como indica la figura.

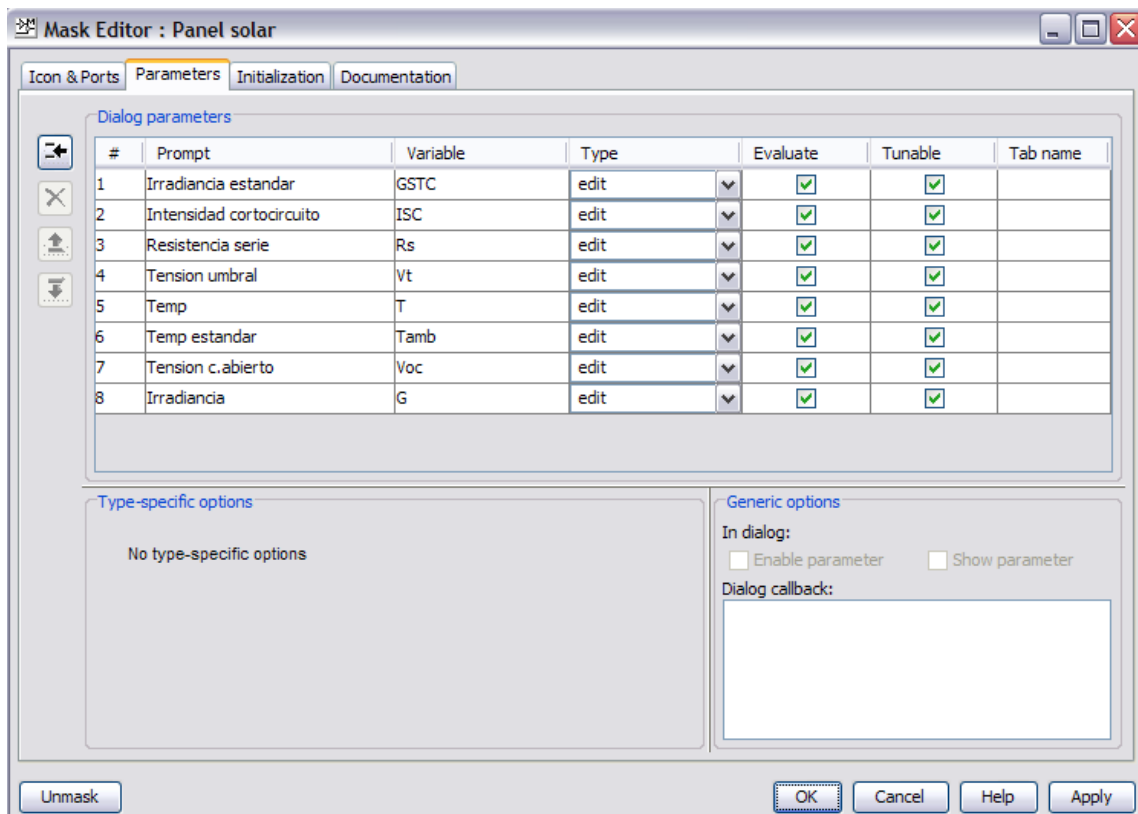


Bloque de función del subsistema Panel Solar

La lista de variables indicada en la formula se indica en la tabla.

Variable	Símbolo
Irradiancia estándar	<i>GSTC</i>
Intensidad cortocircuito	<i>ISC</i>
Resistencia serie	<i>Rs</i>
Tensión umbral	<i>Vt</i>
Temperatura	<i>T</i>
Temperatura estándar	<i>Tamb</i>
Tensión circuito abierto	<i>Voc</i>
Irradiancia	<i>G</i>

Pinchando con el botón derecho del ratón en el subsistema se entra a 'Edit Mask' para editar las variables que se tienen en el subsistema y crear una interfaz donde poder ponerle un valor a cada una. El valor de las variables se introduce en la ventana de manera que todas queden correctamente definidas, las variables son las indicadas anteriormente en la tabla.



Ventana 'Edit Mask' del subsistema Panel Solar

Al realizar este paso lo que se hace es definir los parámetros del bloque de función que se mostraran en la ventana al pinchar sobre el icono de subsistema colocado en el modelo.

La ventana que se abre muestra los parámetros y podemos modificarlos libremente.

Function Block Parameters: Panel solar

Subsystem (mask)

Parameters

Irradiancia estandar
1000

Intensidad cortocircuito
8.475

Resistencia serie
0.001

Tension umbral
0.92448

Temp
30

Temp estandar
25

Tension c.abierto
19.633

Irradiancia
1000

OK Cancel Help Apply

Ventana de parámetros de Panel Solar

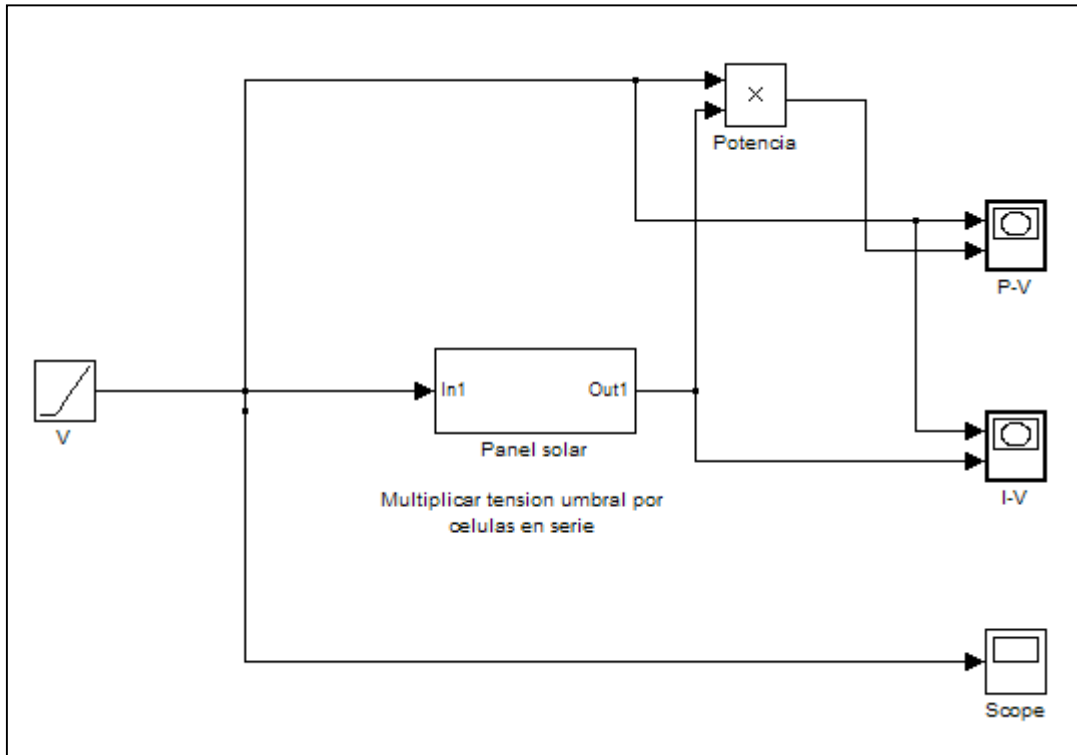
En esta ventana se introducen los datos característicos de la placa, que vienen definidos en la siguiente tabla para una irradiancia estándar de 1000 W/m² y una temperatura de 25° C.

Customer		
MODULE		HF 130
Module code		246-11
Date		15-nov-11
Isc	8,475	(A)
Voc	19,633	(V)
Pmax	131,23	(Wp)
Vpmax	16,472	(V)
Ipmax	7,966	(A)
Tf	25	(°C)

Tabla de características del panel solar del vehículo

De esta manera se ha realizado un modelo en el cual podemos poner datos de cada tipo de panel solar, ya que se da la posibilidad de cambiar todos los datos. A la hora de simular podremos ir cambiando valores de irradiancia y temperatura para observar el comportamiento del panel solar.

El modelo completo del panel solar es el de la figura.



Modelo completo de panel solar

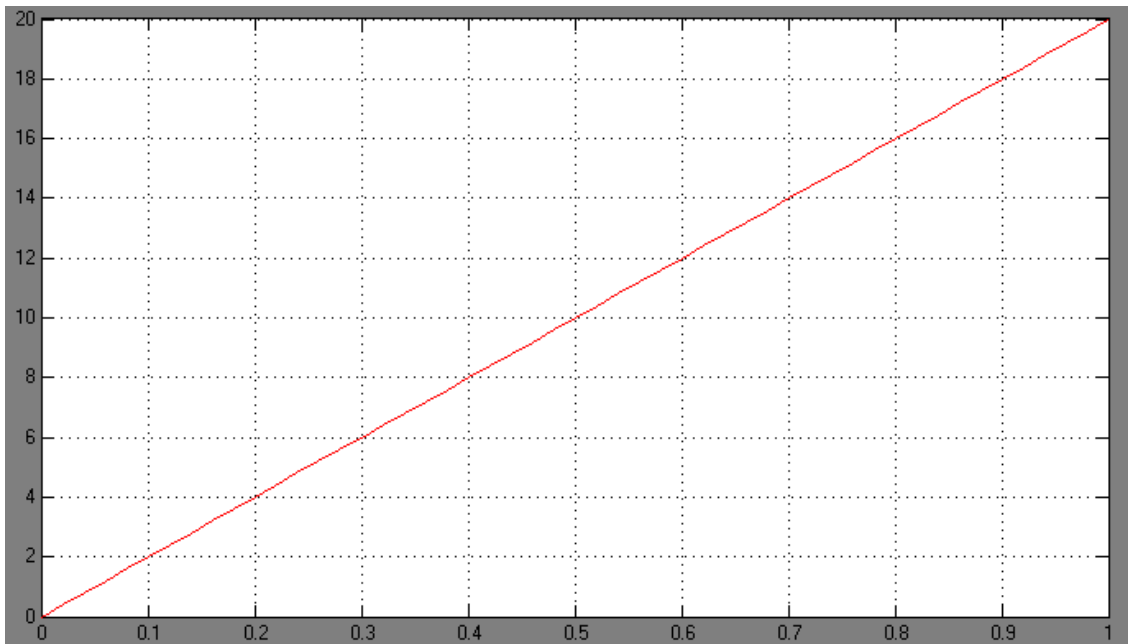
En este modelo la entrada al subsistema está compuesta por una rampa de datos que corresponderán a los datos de la tensión. Esta rampa se configurara con una pendiente de un valor un poco mayor al de la tensión en circuito abierto, en concreto 20, para que de esta manera haciendo una simulación de un segundo en Simulink, nos abarque todos los datos de tensión posibles y se puedan observar las graficas completas con todos los valores, de esta manera se representara la grafica de tensión-corriente.

También se incluye en el modulo una grafica de tensión-potencia para así poder observar gráficamente el punto de máxima potencia (MPPT), la potencia la obtendremos simplemente multiplicando la tensión y la intensidad de corriente, ya que es corriente continua, mediante un bloque de multiplicación de Simulink.

4.3. Graficas y resultados del modelo

Ahora se muestran las graficas resultantes de la simulación del modelo completo creado anteriormente. Se presentaran los resultados y se comentaran las observaciones que sean necesarias para su correcta comprensión.

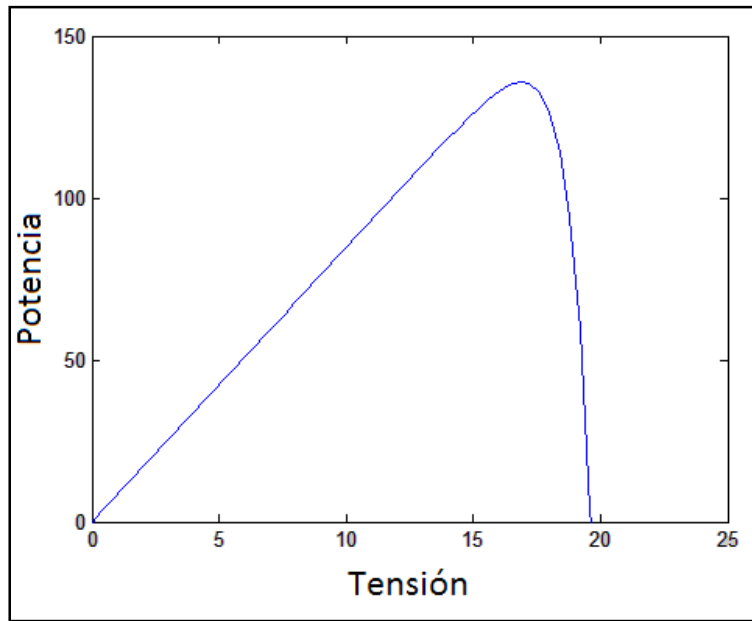
Scope



Rampa de tensión para simulación de curvas características del panel solar

Se observa la rampa de tensión que se utiliza para realizar una correcta simulación y que se crea para una pendiente de 20 que es el entero mayor por encima de la tensión de circuito abierto de la placa, obtenido ese valor de la hoja de características del panel, así se asegura sobrepasar ese punto y obtener la curva del panel completa.

P-V

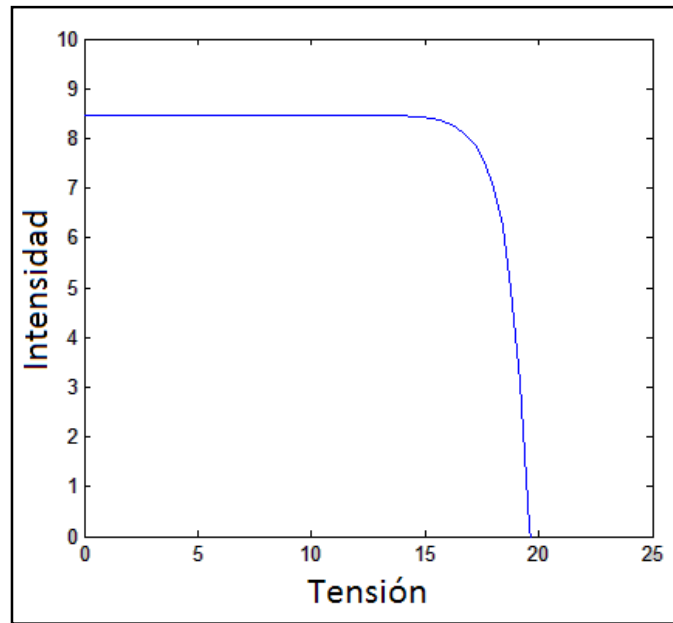


Curva Tensión-Potencia del panel solar

Grafica correspondiente a la potencia dependiendo de la tensión proporcionada por la placa.

En esta grafica se observa claramente cómo va aumentando de 0 hasta un máximo para volver a 0 después. El punto más alto de la curva corresponde al punto de máxima potencia (MPPT), que es el punto deseado de funcionamiento para así aprovechar al completo las características del panel, la tensión correspondiente a este punto se obtiene con una línea vertical hasta el eje de tensiones desde el MPPT, se obtendrá aproximadamente el mismo valor que nos da la hoja de características. El funcionamiento continuo en ese punto no será así ya que iremos variando de tensión e irá cambiando la potencia, pero la aplicación del panel se moverá en lugares cercanos del MPPT.

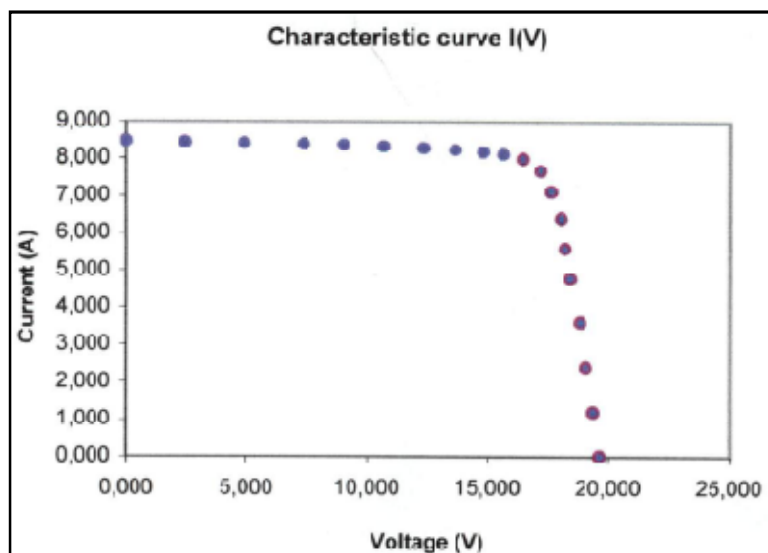
I-V



Curva Tensión-Intensidad del panel solar

Es la curva característica más típica para representar el comportamiento de un panel, en el se representa como ira evolucionando la corriente según la tensión en bornes del panel. Los dos datos característicos de esta grafica son la intensidad de cortocircuito que aparece cuando la tensión es nula, y la tensión de circuito abierto que es la tensión existente en bornes del generador fotovoltaico cuando sus extremos están abiertos y no circula corriente ninguna.

A continuación se observa esta misma curva característica del panel fotovoltaico extraída de la hoja de características del panel.

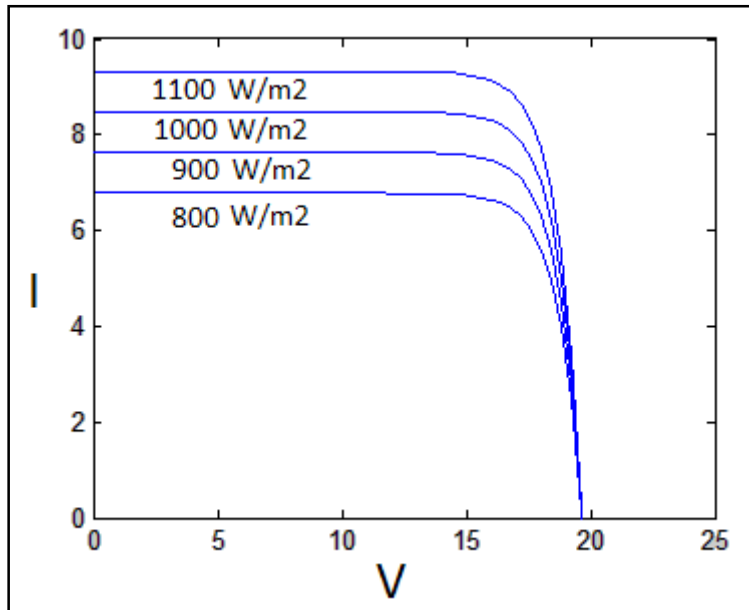


Curva característica del panel solar obtenida del fabricante

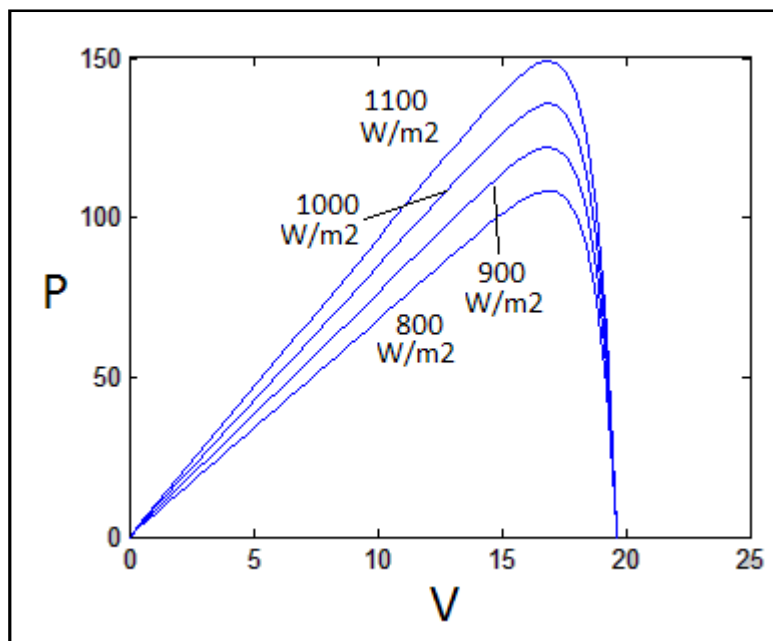
Se observa como básicamente es de la misma forma que la curva obtenida con la simulación en Simulink, y que los valores de tensión en circuito abierto y corriente de cortocircuito son valores que coinciden con lo de la curva simulada y con los valores que proporciona la hoja técnica.

4.4. Comportamiento del panel frente a variaciones de irradiancia

Se mostrarán las gráficas I-V y P-V obtenidas para distintos valores de irradiancia introducida en el apartado de parámetros del bloque.



Curva Tensión-Intensidad para diferentes valores de irradiancia

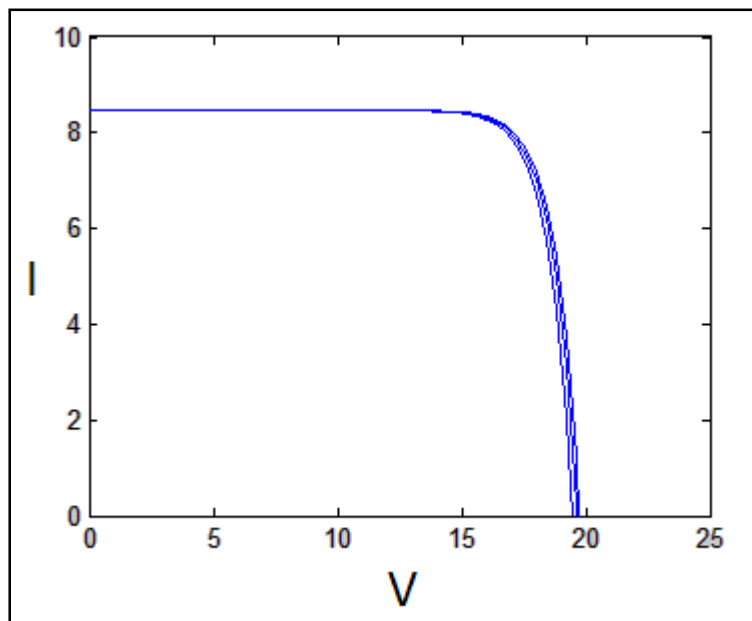


Curva Tensión-Potencia para diferentes valores de irradiancia

Se observa como los aumentos de irradiancia se traducen en un aumento de la intensidad de cortocircuito del panel haciendo más alta la curva intensidad-tensión del panel solar y como consecuencia de esta crecida de la curva, también crece la curva de potencia-tensión proporcionando más potencia el panel a la misma tensión que en otras ocasiones. Si disminuimos la irradiancia se observa el mismo efecto de reducción de intensidad de cortocircuito y de reducción de potencia.

4.5. Comportamiento del panel frente a variaciones de temperatura

Se muestra a continuación las graficas correspondientes a la variación de temperatura del panel solar.



Curva Tensión-Intensidad a diferentes temperaturas

Se puede observar como prácticamente no hay variación de la tensión de circuito abierto por lo que aunque es un dato que podemos ir modificando, con tener un valor aproximado es suficiente ya que la variación va a ser mínima. La curva correspondiente a la potencia dependiendo de la tensión no se representara ya que le ocurrirá algo parecido a esta y es que la variación es tan pequeña en los rangos de trabajo del panel que se puede considerar despreciable.

Modelo de radiación solar

5. Modelo de radiación solar incidente.

La radiación solar incidente sobre el panel es un parámetro que depende de muchas variables, tanto temporales como de posición, por tanto, su modelización es algo más compleja que el modelo del panel.

Para modelizar la radiación solar incidente se tendrá que caracterizar a partir de las ecuaciones que rigen el comportamiento de la radiación en una superficie inclinada. Hay muchos tipos de modelos para caracterizar el comportamiento de la radiación, se indicara en cada caso el modelo utilizado.

5.1. Ecuaciones de la radiación solar incidente

Las ecuaciones que hacen falta para realizar el modelo son las siguientes:

- Excentricidad

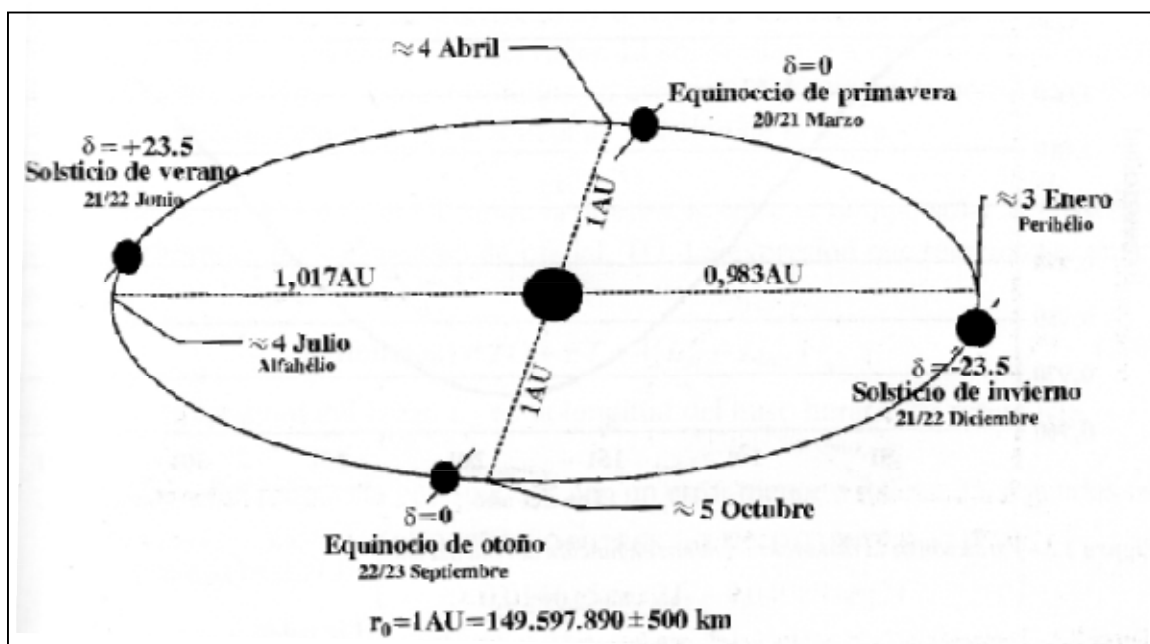
$$\varepsilon_o = 1 + 0,033 \cos \frac{360 dn}{365}$$

Donde dn es el día del año, entre 1 y 365.

- Declinación solar

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + dn}{365} \right)$$

La siguiente imagen muestra los valores que va tomando la declinación y el radio sol-tierra en distintos puntos clave de la órbita terrestre de traslación alrededor del Sol.



Órbita terrestre

- Angulo horario

$$\Gamma = \frac{2\pi(dn - 1)}{365}$$

$$ET(\text{minutos}) = 229,18(0,000075 + 0,001868 \cos\Gamma - 0,632077 \text{sen}2\Gamma - 0,014615 \cos2\Gamma - 0,04089 \text{sen}2\Gamma)$$

$$\omega(\text{minutos}) = TO + ET + 4(Lsc - Lloc)$$

Donde TO es el tiempo oficial que marca el reloj, y Lsc es la longitud del huso horario y Lloc la longitud del lugar donde estamos ubicados.

Debido a la complejidad que supone el cálculo de esta manera, y que tampoco importa la exactitud total de este dato, se realizara el cálculo de este ángulo horario de otra forma, considerando que cada hora aporta 15° al ángulo horario, siendo las 12 la hora correspondiente a 0°, y siendo positivo el ángulo antes de las 12 y negativo al pasar las 12.

Por tanto, la ecuación utilizada en el modelo será:

$$\omega = (12 - \text{Hora}) * 15$$

- *Cos θ_{zs}*

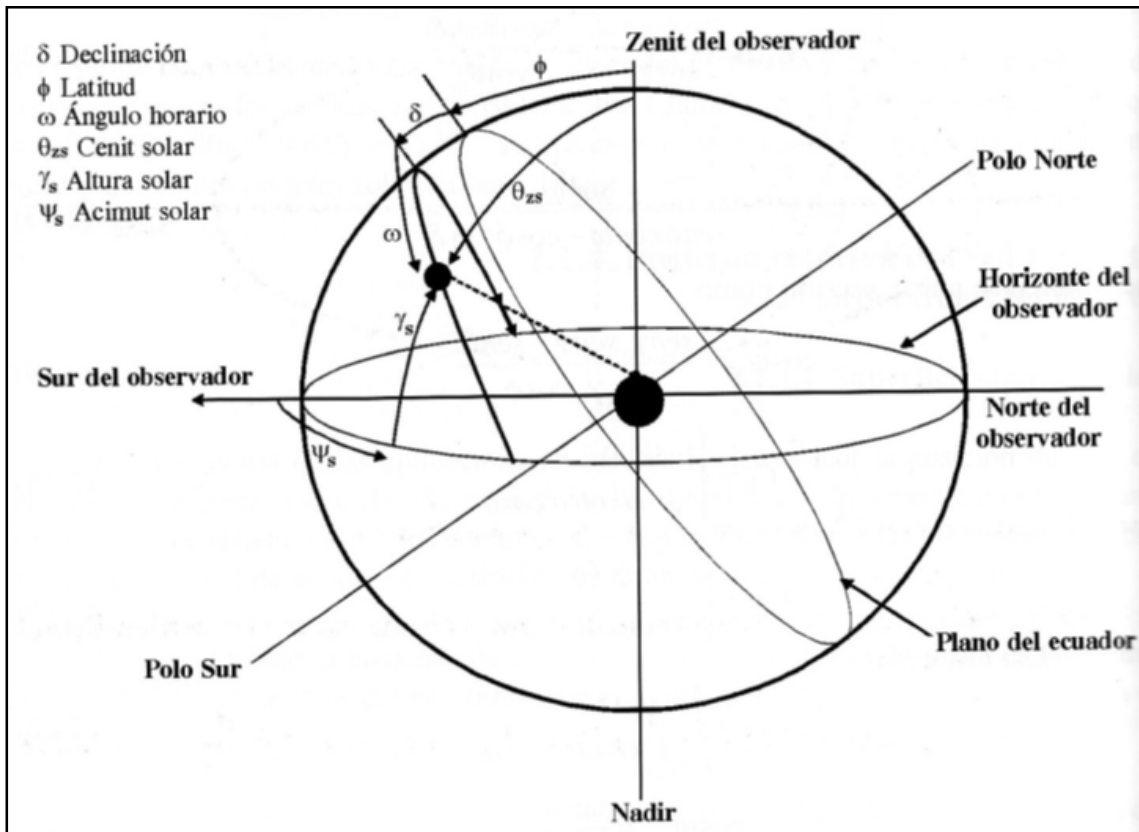
El ángulo θ_{zs} es el angulo cenital, también llamado distancia cenital. Su coseno se usa en distintas ecuaciones que se tendrán que crear en el modelo de Simulink.

La fórmula utilizada para determinar el coseno del ángulo cenital es:

$$\cos \theta_{zs} = \text{sen}\delta \text{sen}\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega$$

Donde δ y ω son los angulos indicados anteriormente correspondientes a la declinación solar y al angulo horario, y ϕ es la latitud del lugar donde se encuentra el panel solar.

En la siguiente imagen se muestran los distintos tipos de ángulos calculados para una correcta comprensión del significado de cada uno de ellos.



Ángulos utilizados en el calcula de la radiación solar

- $\text{Cos } \theta_s$

El ángulo θ_s se corresponde con el ángulo de incidencia para los rayos de sol en una superficie arbitrariamente orientada e inclinada, es decir, el ángulo entre la normal a la superficie y el vector sol-tierra. Este ángulo se hace necesario para el cálculo de la radiación en los casos de superficies con movimiento arbitrario, como en este caso la placa colocada en lo alto del coche solar.

La fórmula para su cálculo es la indicada a continuación.

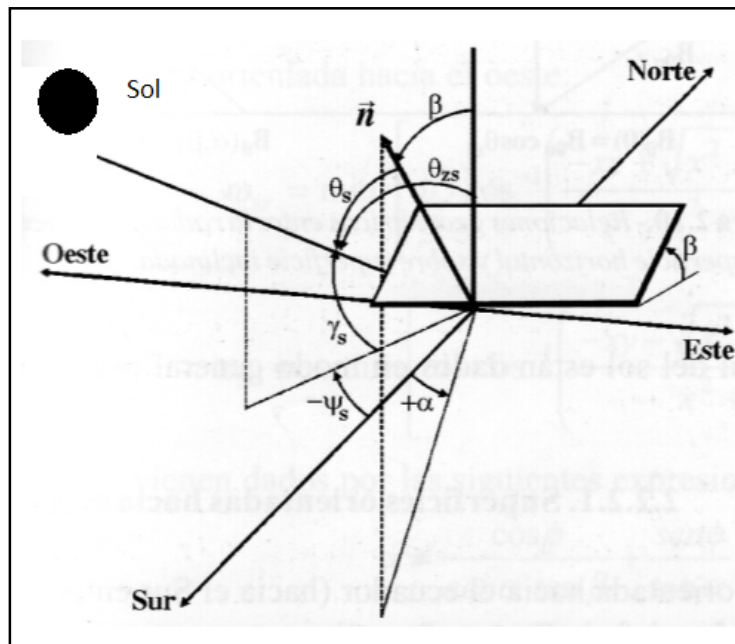
$$\begin{aligned} \cos \theta_s = & \text{sen } \delta \text{ sen } \phi \cos \beta - \text{sen } \delta \cos \phi \text{ sen } \beta \cos \alpha \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \text{ sen } \phi \text{ sen } \beta \cos \alpha \cos \omega + \cos \delta \text{ sen } \alpha \text{ sen } \omega \text{ sen } \beta \end{aligned}$$

Donde la mayoría de términos se han definido anteriormente, excepto α y β que son ángulos que definen la orientación e inclinación del panel solar respectivamente, mas adelante se definirán con detalle estos dos ángulos.

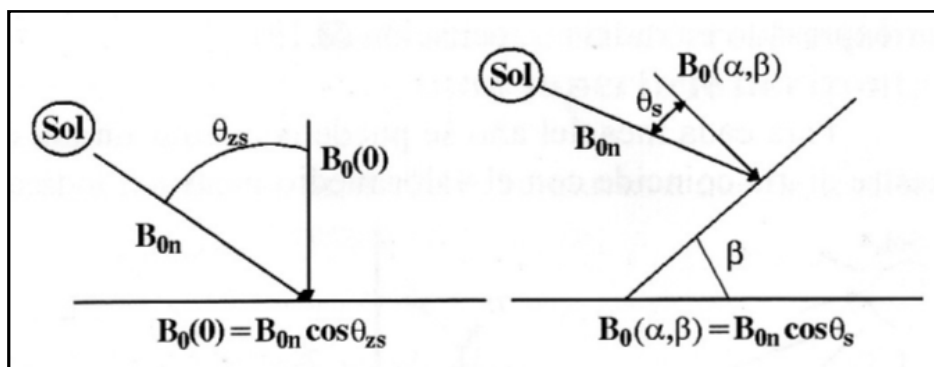
Teniendo en cuenta la definición de ángulo cenital y su expresión, la expresión anterior se puede reducir y quedar como:

$$\cos \theta_s = \cos \beta \cos \theta_{zs} - \text{sen } \delta \cos \phi \text{ sen } \beta \cos \alpha + \cos \delta \text{ sen } \phi \text{ sen } \beta \cos \alpha \cos \omega + \cos \delta \text{ sen } \alpha \text{ sen } \omega \text{ sen } \beta$$

A continuación se muestran imágenes en las que se diferencia entre este ángulo y el ángulo cenital explicado anteriormente.



Ángulos de un panel solar arbitrariamente orientado e inclinado



Diferencia entre $\text{Cos } \theta_s$ y $\text{Cos } \theta_{zs}$

- Irradiancia extraterrestre sobre superficie horizontal

La irradiancia extraterrestre es la cantidad de irradiancia que recibiría una superficie horizontal si fueran condiciones perfectas. Esta irradiancia se debe calcular porque es necesaria para determinar posteriormente las irradiancias global, directa y difusa reales que existirán sobre una superficie horizontal. Esta irradiancia extraterrestre se calcula como:

$$Bo(0) = Bo \varepsilon_o \cos \theta_{zs}$$

Donde ε_o es la excentricidad solar, $\cos \theta_{zs}$ es el angulo cenital y Bo es una constante solar que representa la irradiancia que alcanza la tierra y tiene un valor de 1367 W/m^2 .

- Índices de claridad

Los índices de claridad muestran relaciones entre distintos valores de irradiancia. Sirven para cuantificar como de ideal es la difusión de la irradiancia en la atmosfera terrestre. Se trabajara con el índice de claridad total, que relaciona la irradiancia global sobre una superficie horizontal y la irradiancia extraterrestre sobre una superficie horizontal; y también se trabaja con el índice de claridad difusa que representa la porción de irradiancia global que corresponde a la irradiancia difusa. La irradiancia difusa es la producida por la difusión de la radiación solar en la atmosfera, debido a presencia de nubes y diferentes alteraciones que provocan el desvío de radiación en la atmosfera.

Índice de claridad total

Este índice tiene la siguiente expresión:

$$Kt = \frac{G(0)}{Bo(0)}$$

La irradiancia extraterrestre sobre superficie horizontal se ha calculado anteriormente, y el dato que precisamente queremos extraer de este índice es la irradiancia global, pero en ese caso se trabajaría con dos incógnitas y no se podría conseguir ningún valor. Para ello en este paso de estudio del modelo lo que haremos será obtener información de la radiación global a partir de diferentes páginas web que proporcionan la irradiancia global en diferentes días del año y en las zonas que se indiquen. De esta manera tendremos una aproximación del valor de irradiancia global y podremos estimar un valor de índice de claridad. Aunque este valor no vaya a ser exacto porque todos los años la irradiancia de sol va cambiando, se considera aceptable para el modelo. Con el índice de claridad estimado se introducirá en el modelo y se calculara el valor de irradiancia global, que coincidirá aproximadamente con el valor tomado de datos de páginas web.

A continuación se creara una tabla con índices de claridad para cada mes a través de datos obtenidos de páginas web. El valor de la irradiancia extraterrestre se obtendrá del modelo que se creara más adelante para modelizar la radiación solar, en ese modelo se introducirá la formula correspondiente a la irradiancia extraterrestre.

Para conseguir los datos de irradiancia extraterrestre de cada mes, se deben introducir datos de día del año, hora del día y latitud del lugar en el cual está situado el panel solar. Se utilizara

el día 15 de cada mes como día significativo, y siempre a las 12 del mediodía para el cálculo de la irradiancia extraterrestre. La latitud del lugar debe corresponder a la latitud de Cartagena, por tanto, se aproximara a un ángulo de latitud de $37,6^\circ$.

La irradiancia global se obtiene a través de la página web de la aplicación PVGIS (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>), en esta página se muestra un mapa de Europa donde se puede pinchar en cualquier lugar para tomar datos de él. La aplicación da la posibilidad de obtener una estimación de la generación de un panel fotovoltaico, la irradiación mensual del lugar y la irradiancia diaria media de un mes. En este caso se utilizara la última opción para obtener la irradiancia diaria media de cada mes a las 12 de la mañana. En la página también da la opción de introducir algunos de inclinación y orientación del panel solar, pero como para el índice de claridad lo que hace falta es la irradiancia global sobre superficie horizontal, esos parámetros se pondrán a cero.

En la siguiente imagen se muestra la página web configurada para la obtención de los datos necesarios.

The screenshot displays the PVGIS web application interface. On the left, a map of Europe and North Africa is shown with a search bar and a 'Calculate' button. The 'Daily radiation' tab is selected, and the 'Average Daily Solar Irradiance' section is visible. The 'Radiation database' is set to 'Classic PVGIS', and the 'Select month' is set to 'January'. The 'Irradiance on a fixed plane' section has 'Inclination [0;90] 0 deg. (horizontal=0)' and 'Orientation [-180;180] 0 deg. (east=-90, south=0)'. The 'Irradiance on a 2-axis tracking plane' section has 'Average global irradiance, 2-axis tracking' and 'Clear-sky global irradiance, 2-axis tracking' both unchecked. The 'Output options' section has 'Show graphs' checked, 'Web page' selected, and 'Show horizon' unchecked. The 'Calculate' button is highlighted.

Página web con la aplicación PVGIS

En el apartado 'Select Month' se irán cambiando para todos los meses del año y se irá pulsando el botón 'Calculate', proporcionándonos una lista como la siguiente para cada mes.

Average Daily Solar Irradiance

PVGIS Estimates of average daily profiles

Results for: January

Solar radiation database used: PVGIS-classic

Inclination of plane: 0 deg.

Orientation (azimuth) of plane: 0 deg.

Time	G	G _d	G _c
07:37	68	48	64
07:52	96	60	103
08:07	126	70	144
08:22	156	80	188
08:37	185	89	231
08:52	212	97	273
09:07	239	104	314
09:22	263	110	352
09:37	286	115	388
09:52	307	120	422
10:07	326	124	452
10:22	342	127	479
10:37	357	130	503
10:52	369	132	522
11:07	378	134	538
11:22	386	135	551
11:37	390	136	559
11:52	393	136	563
12:07	393	136	563

12:22	390	136	559
12:37	386	135	551
12:52	378	134	538
13:07	369	132	522
13:22	357	130	503
13:37	342	127	479
13:52	326	124	452
14:07	307	120	422
14:22	286	115	388
14:37	263	110	352
14:52	239	104	314
15:07	212	97	273
15:22	185	89	231
15:37	156	80	188
15:52	126	70	144
16:07	96	60	103
16:22	68	48	64
16:37	42	34	33

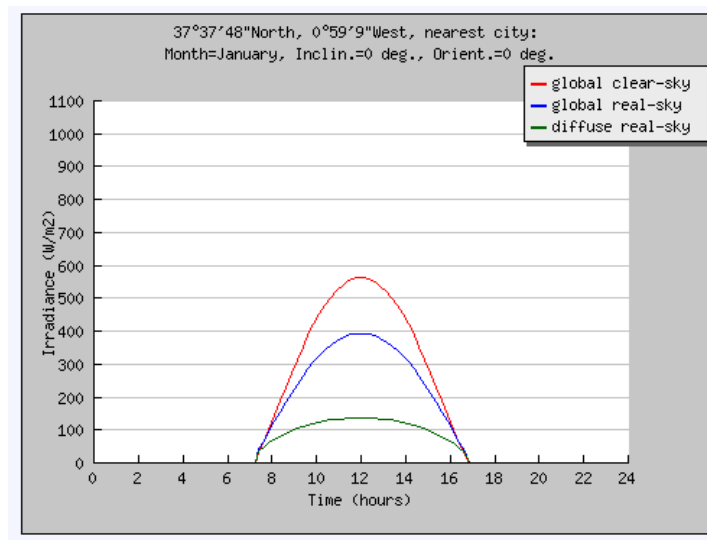
The time shown is local solar time. To find GMT time, add 0.07 hours

G: Global irradiance on a fixed plane (W/m²)

G_d: Diffuse irradiance on a fixed plane (W/m²)

G_c: Global clear-sky irradiance on a fixed plane (W/m²)

Lista de radiaciones durante el día proporcionada por PVGIS



Grafica obtenida con PVGIS de las distintas radiaciones

Se observan en la lista tres tipos de irradiancias, la primera es la irradiancia global real en el plano indicado, esta será la utilizada para los índices de claridad global, se cogerá el valor de las 12:07; la segunda es la irradiancia difusa correspondiente a la irradiancia global indicada; y la tercera es la irradiancia que habría si el cielo estuviera totalmente despejado, por tanto, este es un dato ideal pero no es el caso real. La aplicación web también proporciona en una gráfica estos datos.

Estos pasos se realizarán para cada mes, en la tabla se irán anotando los datos de irradiancia extraterrestre calculados con el modelo de radiación solar, que se explicará su creación más adelante, para el día 15 de cada mes a las 12 del mediodía, y los datos de irradiancia global sobre superficie horizontal de cada mes obtenidos de la aplicación web. El índice de claridad estimado se calculará con su fórmula correspondiente anteriormente indicada.

La tabla completa es la que se muestra líneas abajo.

Mes	Irradiancia extraterrestre	Irradiancia global	Índice de claridad
Enero	741,9	393	0,52972099
Febrero	887,8	474	0,53390403
Marzo	1060	592	0,55849057
Abril	1202	652	0,54242928
Mayo	1269	733	0,57762017
Junio	1286	776	0,60342146
Julio	1275	801	0,62823529
Agosto	1226	741	0,60440457
Septiembre	1113	661	0,59389039
Octubre	946,8	536	0,56611745
Noviembre	779,1	387	0,49672699
Diciembre	698	356	0,51002865

A la hora de realizar la simulación se tendrá en cuenta el mes del año en que se sitúan los datos de la simulación, y se extraerá el índice de claridad correspondiente de esta tabla.

Índice de claridad difusa

Este índice tiene la siguiente expresión:

$$Kd = \frac{D(0)}{G(0)}$$

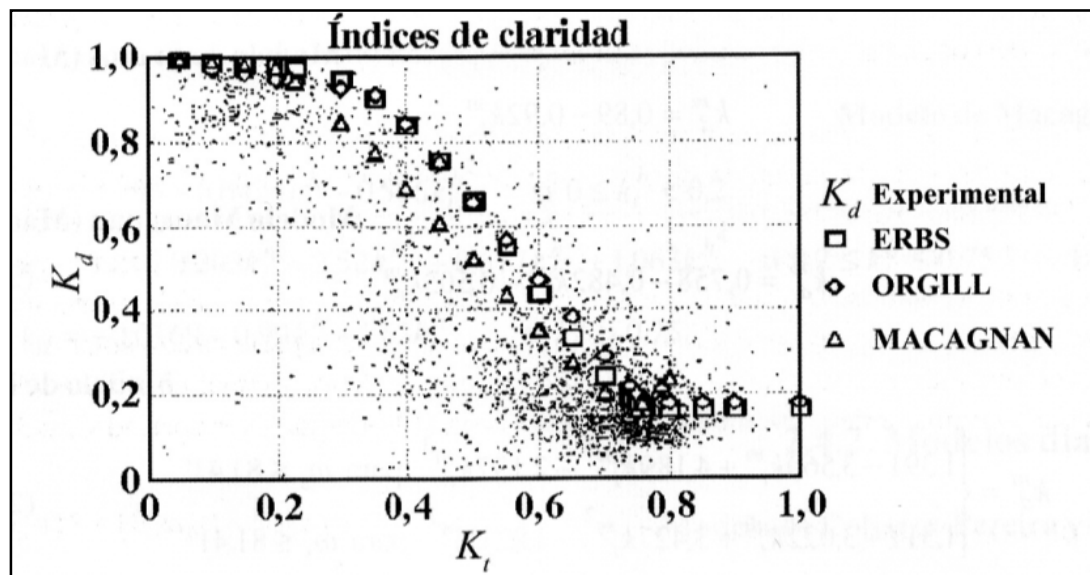
Con este índice se pretende obtener el valor de irradiancia difusa sobre superficie horizontal, que será necesaria más adelante para obtener la irradiancia difusa sobre superficie arbitrariamente inclinada y orientada mediante el modelo de Hay.

Este índice lo obtendremos mediante una expresión matemática obtenida de un modelo creado para obtener medias mensuales, es adecuado ya que en el anterior índice de claridad obtenido por datos de páginas web también se trabaja con datos mensuales de irradiancia global. Se obtendrá este índice a través del modelo de Page, cuya expresión es la siguiente:

$$K_d = 1 - 1,13 K_t$$

Se puede observar como el valor límite de índice de claridad total es 0.885, que es el valor que hace cero el índice de claridad difusa; un valor mayor de índice de claridad global arroja valores negativos de índice de claridad difusa, dato imposible ya que no puede existir una irradiancia negativa. De todos modos se comprobó como el valor de índice de claridad total nunca supera esos valores, por lo tanto, el modelo es válido.

A continuación se muestra una imagen en la que se puede observar una gráfica que relaciona los dos índices de claridad definidos.



Índices de claridad difusa y global

Esta gráfica se ha obtenido mediante datos experimentales, es decir, reales, y nos sirve para validar los modelos utilizados en la obtención de índices de claridad. Se observan también datos de diferentes modelos (Erbs, Orgill y Macagnan), y se puede comprobar cómo aproximadamente modelizan la nube de dispersión formada por una gran cantidad de datos experimentales. Se observa una mayor concentración de datos en los valores aproximados de índice de claridad total desde 0.6 a 0.8, los cuales corresponden con un índice de claridad difusa que abarca desde 0.15 a 0.25 aproximadamente.

- Irradiancia directa sobre superficie horizontal

Con los datos obtenidos, a partir de los índices de claridad, de irradiancia global y difusa sobre superficie horizontal, podemos obtener el dato correspondiente a la irradiancia directa, sabiendo que está más la difusa son las que componen la irradiancia global.

Por lo tanto, se puede obtener la irradiancia directa como:

$$B(0) = G(0) - D(0)$$

- Irradiancias correspondientes a superficies arbitrariamente orientadas e inclinadas.

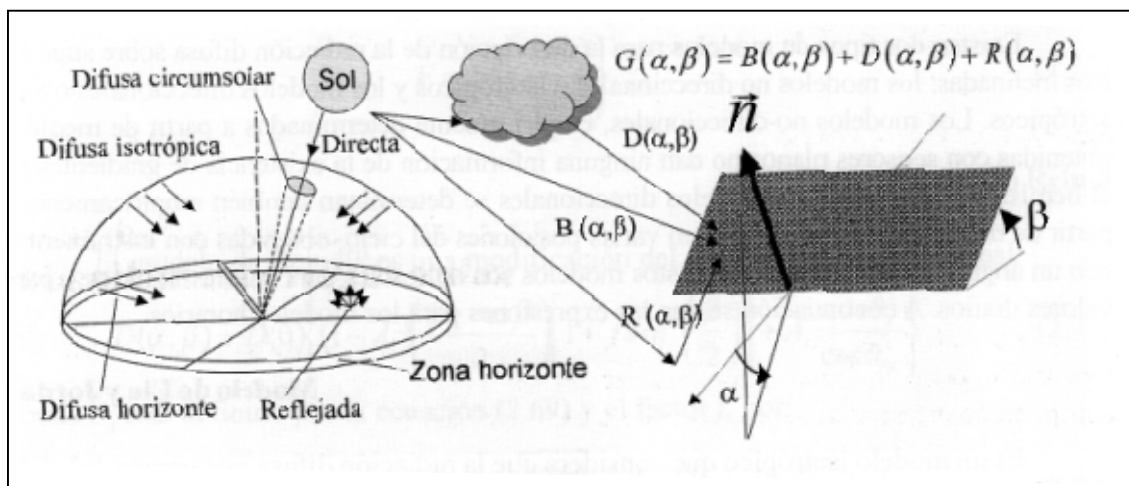
Para la definición de estas irradiancias hace falta definir correctamente dos ángulos, que serán los que nos indican la orientación e inclinación del panel solar.

Primeramente se tiene el ángulo α que corresponde al ángulo de acimut de la superficie o ángulo de orientación, es el ángulo que forma la proyección horizontal de la normal de la superficie y el Sur, por tanto, este ángulo tendrá un valor de 0 si la superficie está orientada al Sur, y se considerara positivo al este.

El otro ángulo a considerar es el ángulo β que corresponde al ángulo de inclinación de la superficie, este ángulo es el formado por la superficie del panel y la superficie horizontal a nivel. En este caso, al ser un circuito en el que existen cuestas, estas formaran el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal aunque con respecto al suelo por el que circula el coche solar no esté inclinado, este aspecto se desarrollara en el apartado correspondiente cuando se caracterice el circuito.

La irradiancia global sobre una superficie arbitrariamente orientada e inclinada estará compuesta por la irradiancia directa, difusa y reflejada o de albedo.

$$G(\alpha, \beta) = B(\alpha, \beta) + D(\alpha, \beta) + R(\alpha, \beta)$$



Irradiancias correspondientes a una superficie arbitrariamente orientada e inclinada

La irradiancia directa se calcula a partir de la irradiancia directa para una superficie horizontal y de distintos términos geométricos que se definieron anteriormente, serán los términos $\cos \theta_s$ y $\cos \theta_{zs}$. La expresión para su cálculo se indica a continuación.

$$B(\alpha, \beta) = B(0) \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_{zs}}$$

La irradiancia reflejada depende del ángulo de inclinación del panel solar y de un coeficiente de reflectividad. La expresión que determina esta irradiancia es:

$$R(\alpha, \beta) = G(0)\rho\left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)$$

Para esta aplicación se despreciara el aporte a la irradiancia global de la irradiancia reflejada, esta consideración es factible ya que aunque se tengan valores del ángulo β que arrojen un valor de irradiancia reflejada, este angulo no es real para el calculo que se realiza en este caso, ya que el angulo de inclinación con respecto al terreno que rodea al coche solar es nulo, y se anularía la irradiancia reflejada. Además de que los valores de ángulo β son muy pequeños y el aporte de la irradiancia reflejada al total seria infimo con respecto a la aportación de la irradiancia directa y difusa.

Por último, se debe calcular la irradiancia difusa en el plano arbitrariamente orientado e inclinado, para ello se utilizara el modelo anisotrópico de Hay, en este modelo la irradiancia difusa está compuesta por dos componentes, la parte isotrópica (D_i) y la parte circunsolar (D_c). Esta irradiancia se calculara a partir de datos geométricos calculados anteriormente y del valor de la irradiancia difusa sobre superficie horizontal obtenida a partir de los índices de claridad difusa.

$$D(\alpha, \beta) = D_i(\alpha, \beta) + D_c(\alpha, \beta)$$

$$D(\alpha, \beta) = D(0)\left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right)(1 - A_i) + D(0)A_i \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_{zs}}$$

Donde A_i es un índice de anisotropía o índice de transmisión de la irradiancia directa que se calcula de la siguiente forma:

$$A_i = \frac{B(0)}{B_o(0)}$$

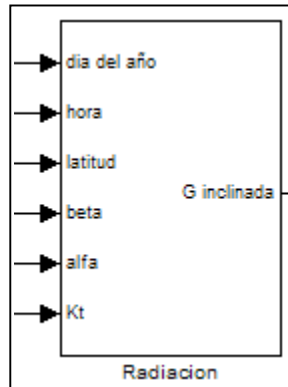
Con todos estos cálculos realizados, se aplica la formula indicada al comienzo de este apartado, considerando que se desprecia la irradiancia reflejada, de esta manera se obtendrá el valor de la irradiancia global sobre una superficie arbitrariamente orientada e inclinada.

$$G(\alpha, \beta) = B(\alpha, \beta) + D(\alpha, \beta)$$

5.2. Creación del modelo en Simulink

Una vez determinadas todas las formulas necesarias, es hora de recrearlas en Simulink. Para ello crearemos un subsistema y dentro crearemos tantas entradas como variables nos vaya a hacer falta introducir, y una salida correspondiente a la radiación total con las características indicadas.

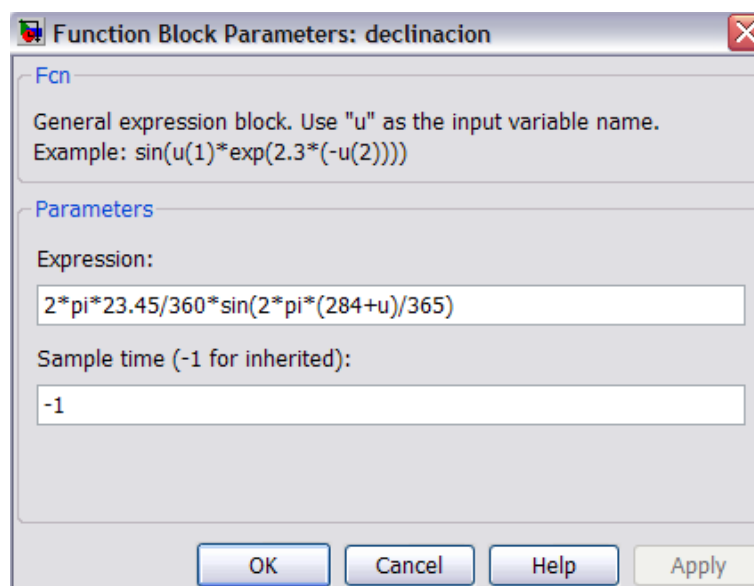
Las entradas serán las correspondientes al día del año, la hora del día a la que se quiere determinar la radiación, la latitud del lugar donde está situado el panel (siendo positiva al norte), el ángulo de inclinación del panel con respecto a la horizontal, y el ángulo de orientación del panel con respecto al sur (siendo positivo al este y negativo al oeste).



Subsistema para el cálculo de la irradiancia

Con las entradas determinadas, ahora se debe empezar a insertar en bloques de función las ecuaciones que irán caracterizando la radiación.

Los parámetros de los bloques de función tienen la forma que se observa en la siguiente imagen, en el apartado expresión se tiene que introducir la función matemática que se quiere modelizar, siendo 'u' el término de la variable de entrada. Si la expresión matemática contiene muchas variables de las que haya que dar sus datos de entrada, debemos combinar las variables mediante un multiplexor y se formara un vector de variables, en el que cada variable se utilizara mediante u(n) siendo n la posición que ocupa en el multiplexor.



Parámetros del bloque de función

La primera ecuación que se creara en un bloque de función, es la correspondiente a la declinación solar, se introducirá en el bloque de función con la expresión $2\pi \cdot 23.45/360 \cdot \sin(2\pi \cdot (284+u)/365)$. En la expresión 'u' representa la variable de la fórmula siendo en este caso el día del año, un número natural de 1 a 365. Tenemos que multiplicar por $2\pi/360$ para pasar el ángulo a radianes, ya que en Simulink los operadores matemáticos que trabajan con ángulos lo hacen en radianes.

Para modelizar la excentricidad se procederá de igual forma, introduciendo la ecuación en un bloque de función, la expresión se introducirá como $1+0.033 \cdot \cos(2\pi \cdot u/365)$ siendo 'u' el día del año.

El ángulo horario se calculará en un bloque de función introduciendo la expresión $(12-u) \cdot 15 \cdot 2\pi/360$ donde obtenemos el ángulo solar en radianes. En esta expresión 'u' es la hora del día, entre 0 y 24.

Para conseguir el $\cos \theta_{zs}$ se hará mediante un bloque de función, para realizar el modelo de esta ecuación se ha de tener en cuenta que la fórmula tiene 3 variables correspondientes a la latitud del lugar, la declinación solar y el ángulo horario. Para introducir esta ecuación en el bloque de función, al haber varias variables debemos colocar un multiplexor (Mux) antes de la entrada del bloque de función para juntar las 3 variables en una línea. La expresión a introducir en el bloque de función para el cálculo del coseno de este ángulo es $\sin(u(1)) \cdot \sin(u(3)) + \cos(u(1)) \cdot \cos(u(3)) \cdot \cos(u(2))$, donde las variables se corresponden como se indica en la tabla siguiente.

<i>u(1)</i>	<i>Declinación solar</i>
<i>u(2)</i>	<i>Angulo horario</i>
<i>u(3)</i>	<i>Latitud del lugar</i>

Para crear el bloque de función correspondiente al $\cos \theta_s$ se procederá análogamente al caso anterior. El multiplexor de entrada al bloque de función unificará las 6 variables que contiene la ecuación para el cálculo de este término geométrico. La expresión a introducir en el bloque de función es $\cos(u(5)) \cdot u(4) - \sin(u(1)) \cdot \cos(u(3)) \cdot \sin(u(5)) \cdot \cos(u(6)) + \cos(u(1)) \cdot \sin(u(3)) \cdot \sin(u(5)) \cdot \cos(u(6)) \cdot \cos(u(2)) + \cos(u(1)) \cdot \sin(u(6)) \cdot \sin(u(2)) \cdot \sin(u(5))$.

La tabla siguiente muestra cuál es el significado de cada variable.

<i>u(1)</i>	<i>Declinación solar</i>
<i>u(2)</i>	<i>Angulo horario</i>
<i>u(3)</i>	<i>Latitud del lugar</i>
<i>u(4)</i>	<i>Cos θ_{zs}</i>
<i>u(5)</i>	<i>Angulo β</i>
<i>u(6)</i>	<i>Angulo α</i>

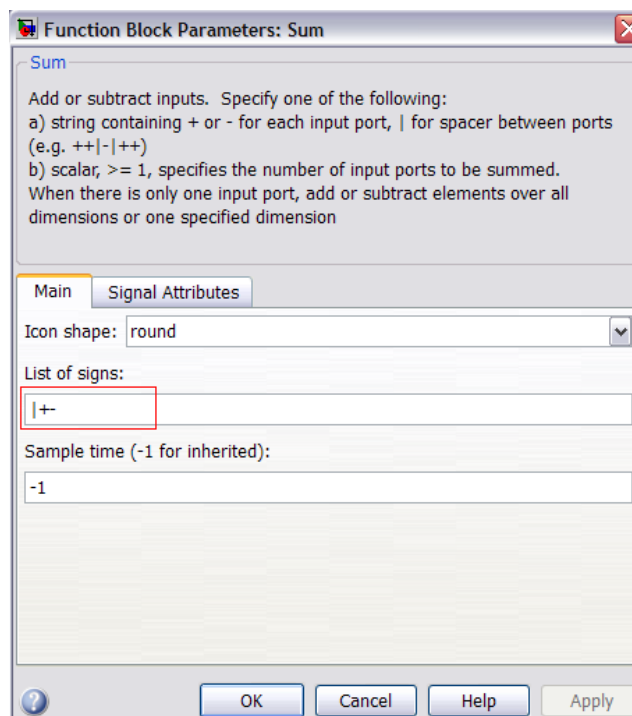
Para el cálculo de la irradiancia extraterrestre sobre superficie horizontal la expresión a introducir en el bloque de función es $1367 \cdot u(1) \cdot u(2)$ correspondiendo el número de la

expresión con la constante solar. Las dos variables que participan en la ecuación son la excentricidad solar ($u(1)$) y el $\cos \theta_{zs}$ ($u(2)$). Se introduzcan en el bloque a través de un Mux.

La fórmula para determinar el índice de claridad difusa a partir del índice de claridad global se introducirá en otro bloque de función con la expresión $1-1.13*u$ donde 'u' corresponde al índice de claridad global que obtendremos a partir de datos de páginas web.

$G(0)$ y $D(0)$ se obtendrán a partir de los valores de los índices de claridad. $G(0)$ se obtiene multiplicando el índice de claridad total con la irradiancia extraterrestre sobre superficie horizontal ($B_0(0)$); mientras que $D(0)$ se obtiene con la multiplicación de $G(0)$ y el índice de claridad difusa. Estos dos cálculos se realizarán en Simulink mediante bloques de multiplicación de dos entradas, que proporcionarán los valores deseados a la salida.

$B(0)$ se obtiene como la diferencia entre la irradiancia global y la irradiancia difusa, este cálculo se realiza con un bloque de suma (Sum) alterando los signos del bloque para que una entrada se reste a la otra dando como resultado la irradiancia directa.



Parámetros del bloque Suma

Tan solo queda obtener las irradiancias directa, difusa y global para un panel arbitrariamente orientado e inclinado. Para ello se crearán las fórmulas necesarias en los bloques de función. Para determinar la irradiancia difusa se necesita el coeficiente A_i , que se obtiene también de un bloque de función en el que se divide la irradiancia directa sobre superficie horizontal ($u(2)$) entre la irradiancia extraterrestre sobre superficie horizontal ($u(1)$), siendo la expresión introducida $u(2)/u(1)$.

La expresión introducida para la irradiancia difusa es $(u(4)*((1+\cos(u(5)))/2)*(1-u(1)))+u(4)*u(1)*u(3)/u(2)$ siendo la correspondencia entre las variables como se indica en la tabla siguiente.

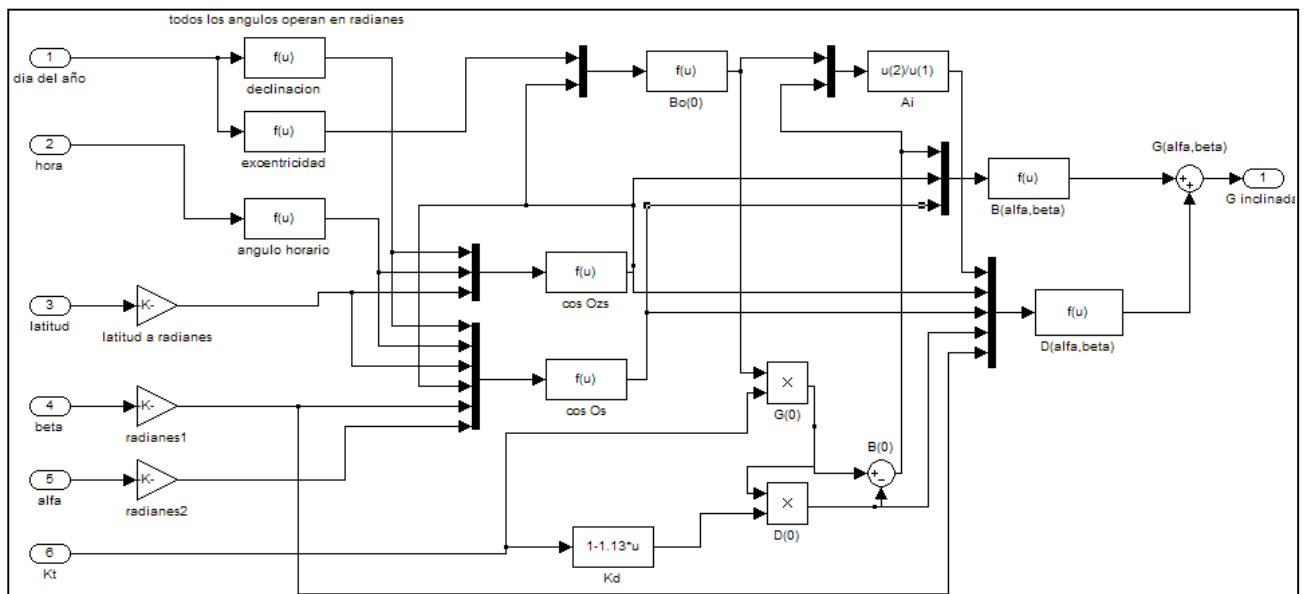
$u(1)$	Coficiente A_i
$u(2)$	$\text{Cos } \theta_{zs}$
$u(3)$	$\text{Cos } \theta_s$
$u(4)$	$D(0)$
$u(5)$	Angulo β

La expresión introducida para la irradiancia directa es $u(1) \cdot u(3) / u(2)$, siendo las variables:

$u(1)$	$B(0)$
$u(2)$	$\text{Cos } \theta_{zs}$
$u(3)$	$\text{Cos } \theta_s$

Finalmente se obtendrá el valor final de la irradiancia global como la suma de las dos componentes, difusa y directa, mediante un bloque Sum con los dos signos + en sus parámetros. Este valor se llevara a la salida del subsistema.

El subsistema completo se muestra en la siguiente imagen.



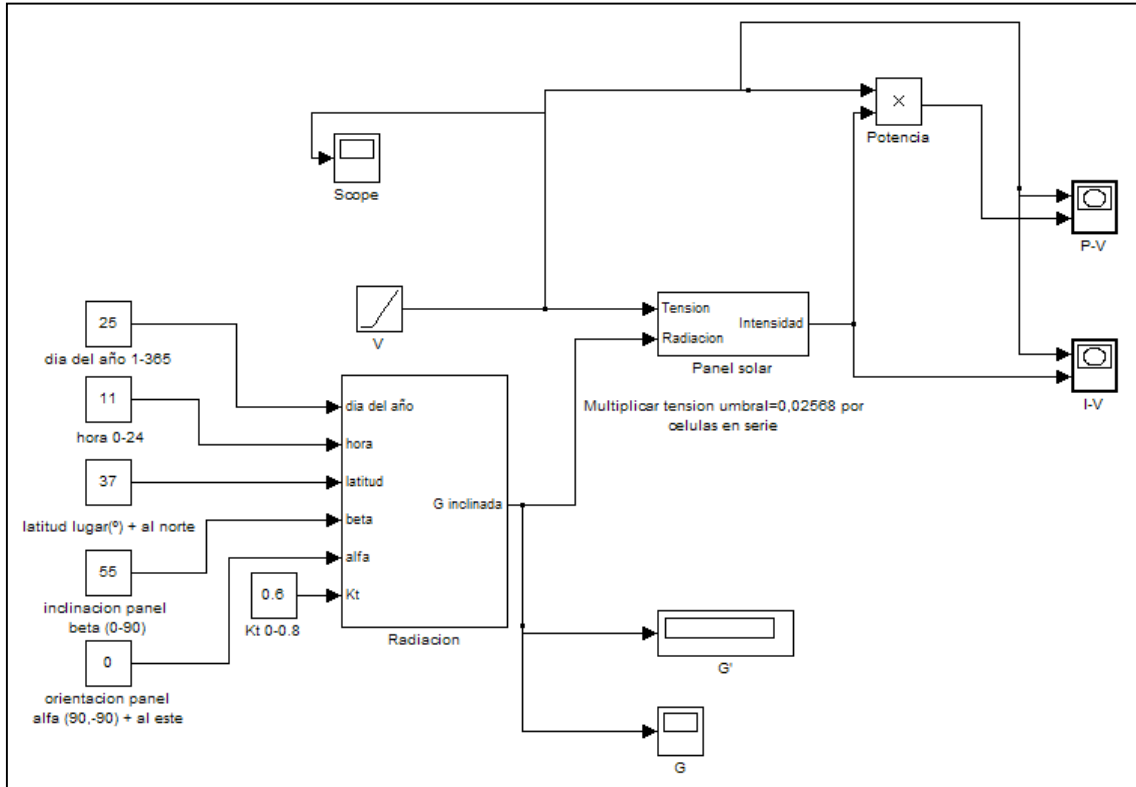
Subsistema completo del cálculo de irradiancia solar (Ver en Anexo)

Se observan en la imagen todos los bloques de función explicados, con los correspondientes multiplexores (Mux) y bloques de suma (Sum) y multiplicación (Product) cuando son necesarios. También se utilizan en las entradas de los ángulos correspondientes a la latitud, el ángulo α y el ángulo β , un bloque de ganancia (Gain) que multiplicara la entrada por $\frac{2\pi}{360}$ para pasar los ángulos de grados a radianes, ya que se introducirán los ángulos en grados mientras que el programa para trabajar con términos trigonométricos necesita que el argumento vaya en radianes.

Ahora la salida de este subsistema se integrara con el modelo de panel solar. En el modelo de panel solar realizado anteriormente la única entrada variable era la tensión, ahora se incluirá

una entrada para la radiación que se conectara con la salida del subsistema creado. Esta entrada se creara dentro del subsistema de panel solar y habrá que instalar un multiplexor en su interior para unificar las variables de tensión y radiación a la entrada del bloque de función de la ecuación característica del panel solar.

El modelo completo de la radiación conjuntamente con el panel solar se queda como muestra la siguiente imagen.



Modelo de panel solar con calculo de irradiancia solar incluida (Ver en Anexo)

Se han creado bloques de constantes para introducir todas las variables correspondientes al modelo de irradiancia en superficie arbitrariamente orientada e inclinada. Estos bloques se quedaran así siempre ya que en realidad el modelo es para el uso en un día concreto, a una hora y en un lugar indicados, no irá cambiando durante la simulación; mientras que el ángulo de inclinación y de orientación están puestos como constantes, pero más adelante estas entradas se eliminarán y se conectarán con otro sistema independiente que irá mostrando la variación de estos ángulos en el transcurso de un circuito.

Modelo de un circuito cualquiera

6. Modelo de un circuito cualquiera

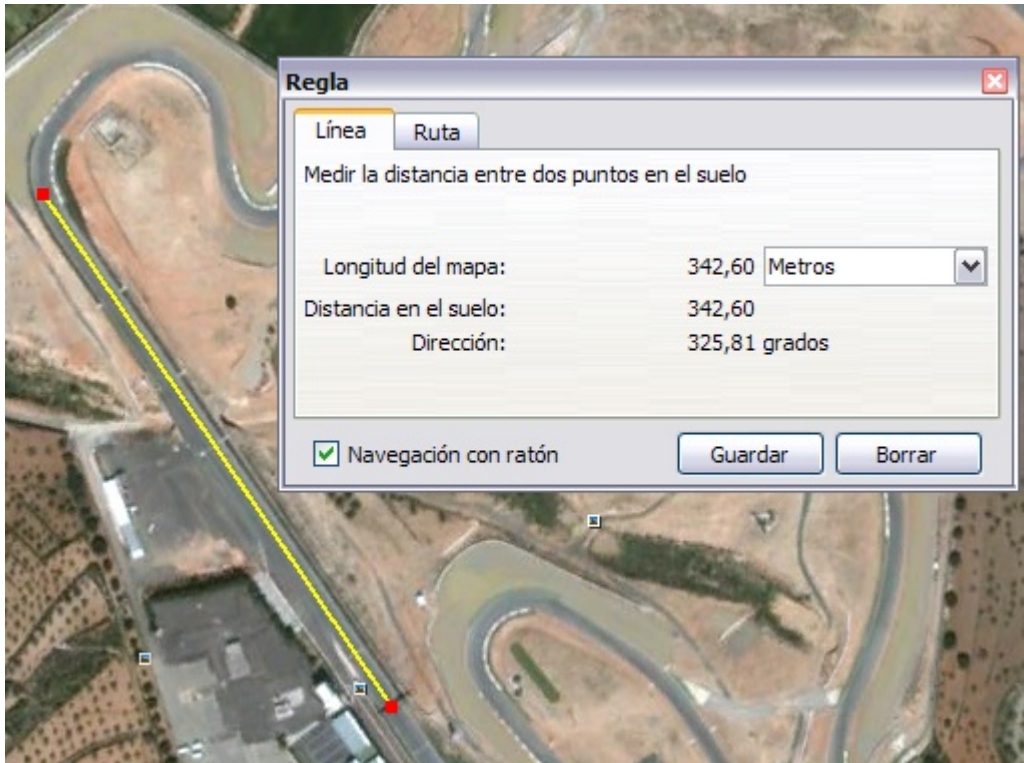
En este apartado se explicara cómo se consigue la simulación de un circuito y los pasos que habrá que llevar a cabo para ello. La simulación del circuito es una tarea más compleja ya que no se podrá realizar con un modelo fijo sino que dependerá de las características de cada circuito, por tanto en este documento se probará un circuito de prueba y el circuito de velocidad Cartagena, por ser el más importante para esta aplicación, ya que el coche solar participa todos los años en la Solar Race de Murcia. Para cada circuito diferente habrá que seguir los mismos pasos.

Primeramente para realizar el modelo hay que tener el plano del circuito debidamente orientado, para así ubicar el norte. Una vez que se tiene el plano se dividirá en tantos tramos como se quiera, intentando que sean los suficientes para que quede completamente definido el circuito.

Con los tramos realizados debemos caracterizar cada tramo obteniendo el ángulo de orientación con respecto al Sur, ángulo α , y obteniendo también su inclinación para determinar el ángulo β en cada tramo. Estos ángulos los obtendremos en este caso a través del software Google Earth, aunque se podría hacer mediante la obtención de datos topográficos reales conseguidos de cualquier otra forma.

En Google Earth dibujaremos los tramos mediante el comando Regla. Al usar el comando Regla este proporciona datos de longitud del tramo dibujado y del ángulo que forma la línea dibujada con respecto a una línea vertical y girando en sentido horario, se dibujaran los tramos del circuito en el sentido en que el coche va por él.

En la siguiente imagen se muestra el cuadro de dialogo que surge al dibujar un tramo, de este cuadro obtendremos la longitud el tramo y la dirección, que corresponde con el ángulo.



Cuadro de dialogo obtenido al realizar un tramo

Se irán guardando todos los tramos que se vayan haciendo para así finalmente tener una imagen completa de los tramos que se han hecho y ver si la forma es aproximadamente parecida al circuito real.

Posteriormente en cada tramo, se tendrá que comprobar la elevación que pueda tener para tener un valor de ángulo de inclinación que introducir en el modelo. Para conseguir este ángulo se cogerá la diferencia entre el valor más grande y el más pequeño entre el incremento o la pérdida de elevación y se dividirá entre la longitud total del tramo, de esta manera se consigue la tangente del triangulo que utilizaremos para aproximar la inclinación de un tramo.

Para determinar el ángulo a partir de la tangente, simplemente haremos el arcotangente del valor que tengamos y así obtendremos el valor de ángulo β correspondiente.

La ventana de Google Earth que proporciona esa información se obtiene al mostrar el perfil de elevación de un tramo de circuito, esta ventana tiene la forma siguiente.



Visualización del perfil de elevación de un tramo del circuito

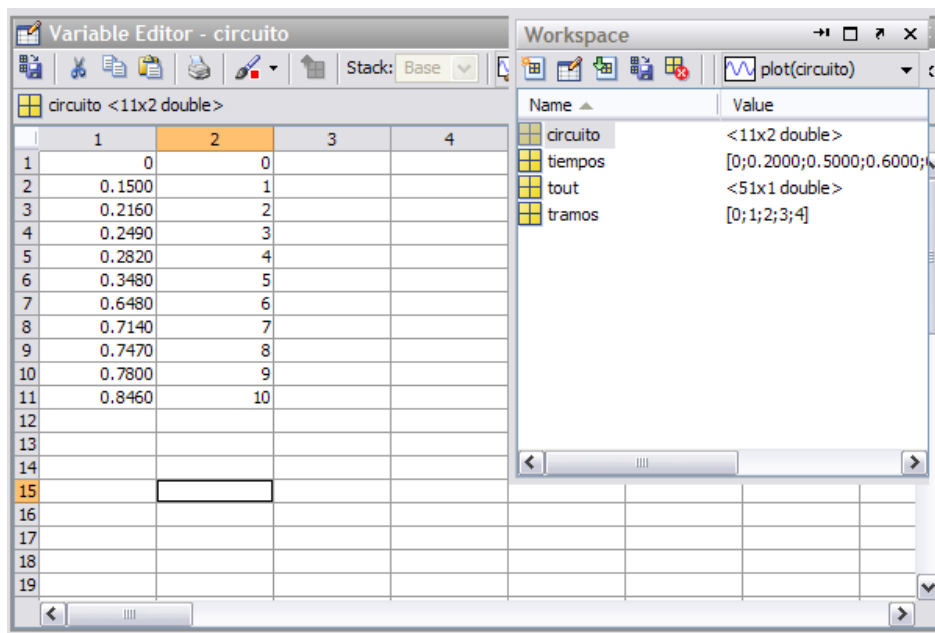
Se observa cómo se puede ver detalladamente el perfil del tramo seleccionado y nos da detalles de incremento/perdida de elevación, pendiente, distancia total, etc...

Con todos estos datos se puede ir formando una tabla en la que se incluyan el número de tramos, el ángulo α y β de cada tramo, la longitud del tramo y el tiempo necesario para completarlo, para lo cual se estimara una velocidad del vehículo de unos 24 Km/h.

También se tendrá que estimar el tiempo de tramo pero sobre un valor de 1, y además el tiempo acumulado en cada tramo, es decir, con la suma de todos los tiempos parciales de los tramos anteriores que será el valor tipo que se usara para la simulación en Simulink de cualquier circuito, ya que al programa debemos indicarle cuando comienza cada tramo contando desde el inicio.

A la hora de introducir los datos del circuito en Simulink se procederá creando una matriz en el entorno Matlab, en la que se introducirán el número de tramos comenzando desde 0 hasta el número de tramos que se hayan conseguido y el valor del tiempo acumulado sobre 1 que se obtenga en la tabla, para de esta manera indicar en qué momento debe ir cambiando de tramo el software.

En la siguiente imagen se muestra como es el entorno de Matlab donde se debe introducir los datos de tramos y de tiempo acumulado de cada tramo.



The image shows a MATLAB Variable Editor window titled 'Variable Editor - circuito' and a Workspace window. The Variable Editor displays a matrix named 'circuito' of size 11x2 double. The matrix has columns labeled 1, 2, 3, and 4. The data in the matrix is as follows:

	1	2	3	4
1	0	0		
2	0.1500	1		
3	0.2160	2		
4	0.2490	3		
5	0.2820	4		
6	0.3480	5		
7	0.6480	6		
8	0.7140	7		
9	0.7470	8		
10	0.7800	9		
11	0.8460	10		
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				

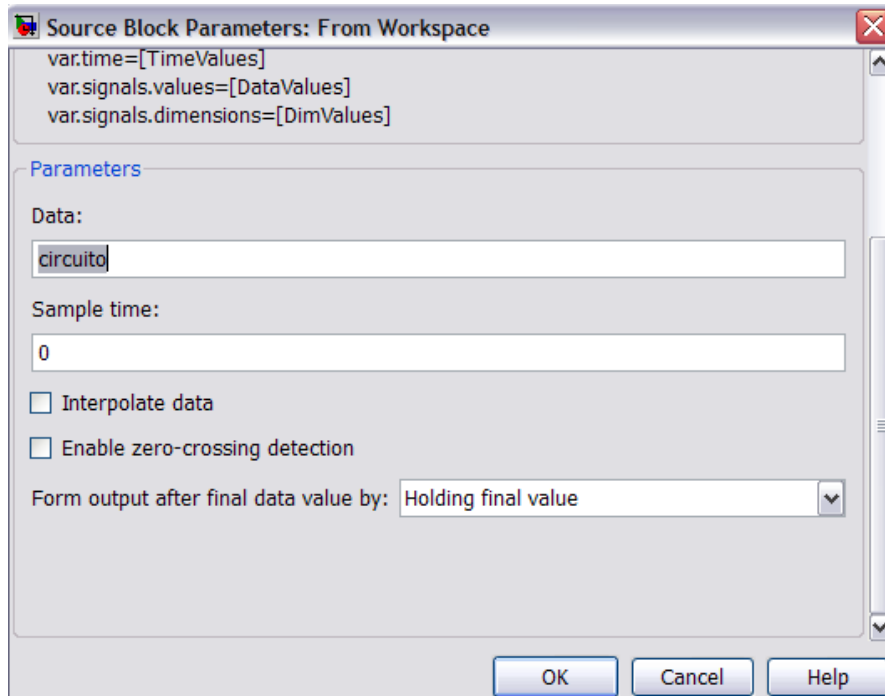
The Workspace window shows the following variables:

Name	Value
circuito	<11x2 double>
tiempos	[0;0.2000;0.5000;0.6000;...
tout	<51x1 double>
tramos	[0;1;2;3;4]

Matriz de datos de circuito

Se le asignara un nombre a esta matriz con datos de tiempo acumulado y tramos. Este nombre servirá de vínculo con el modelo de Simulink a la hora de recrear el circuito.

En Simulink se empezara creando un vinculo a esta matriz de datos mediante un bloque 'From workspace' de la librería Sources. En este bloque se pondrá el nombre de la matriz creada para así coger los datos necesarios para la simulación. En la siguiente imagen se muestran los parámetros que tiene el bloque.

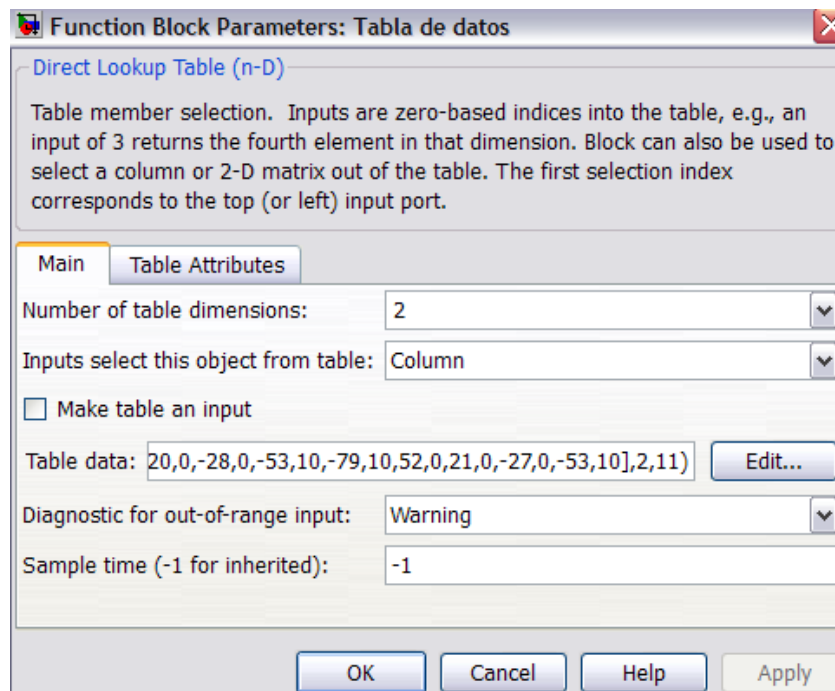


Parámetros del bloque From Workspace

Se observa como en el apartado Data se incluye el nombre 'circuito', que tiene que corresponderse con la matriz del circuito creada anteriormente en Matlab. En el apartado final se observa la opción 'From output after final data value', en este apartado se pide que se indique que hará la simulación cuando no tenga más datos que usar, en este caso se utilizara siempre 'Holding final value', que quiere decir que se mantendrá el dato final de la matriz de datos cuando esta llegue al final, aunque no es estrictamente necesario ya que se ajustara el tiempo de la simulación a 1 y el valor total del tiempo de circuito también es 1, por lo que la simulación parara justamente cuando termine el circuito.

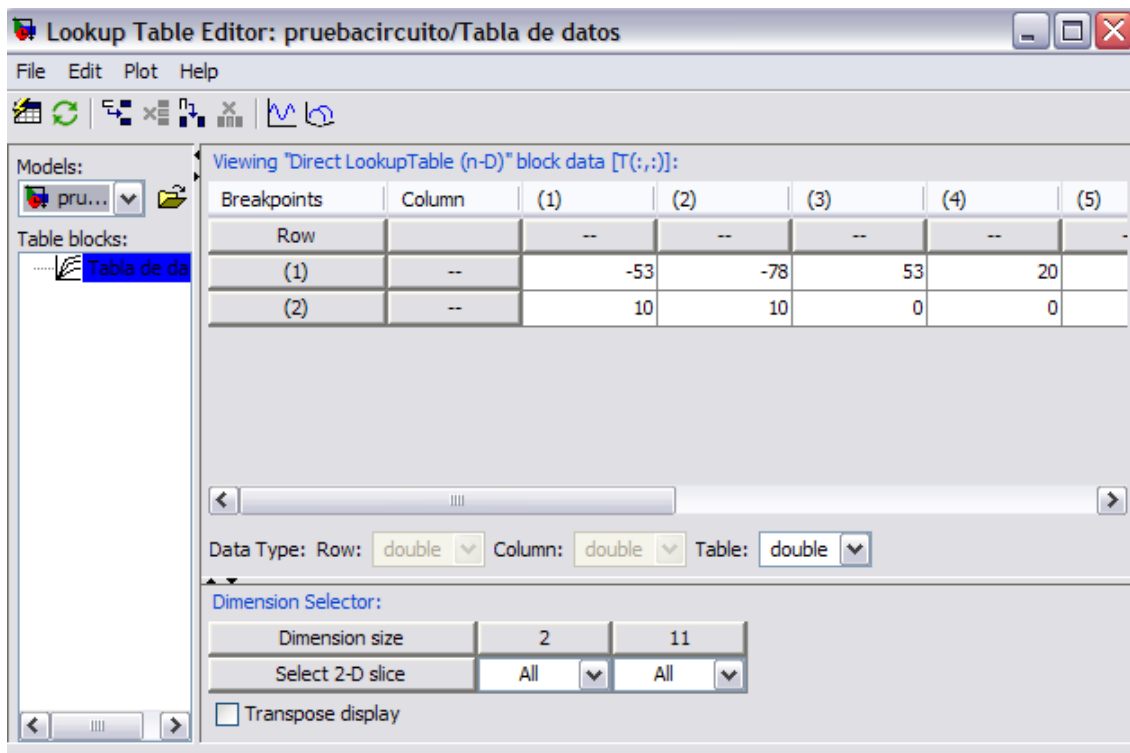
Con esto se consigue crear una señal de tiempo que nos indica cuanto tiempo debe permanecer cada tramo del circuito, ahora se utilizara esta señal de tiempo para extraer de una tabla los datos correspondientes al ángulo α y β de cada tramo. La tabla de datos se crea mediante un bloque 'Direct Lookup Table (n-D)' en el que se introducen los datos de los ángulos para cada tramo. Este bloque funciona mediante una entrada en la que se indica el número de columna de la que se quieren extraer los datos, la cual conectaremos con la señal de tiempo. En la salida tendremos un vector compuesto con los dos valores de ángulos requeridos.

Los parámetros de este bloque se muestran en la imagen.



Parámetros del bloque Direct Lookup Table

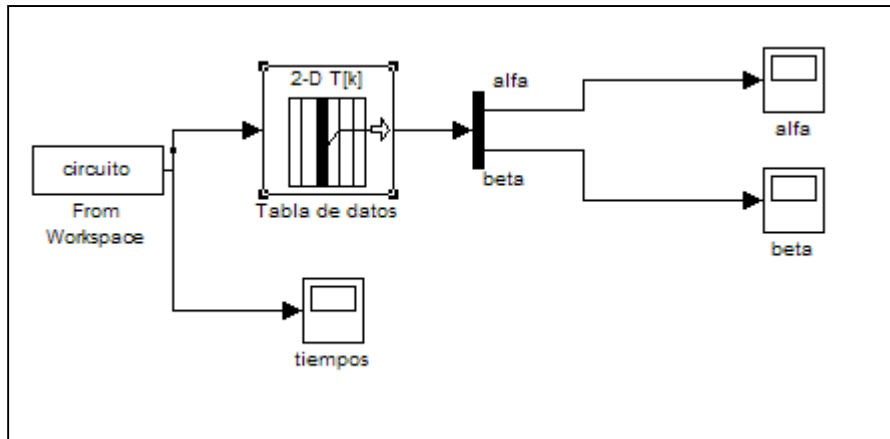
La opción 'Inputs select this...' se coloca en posición Column para acceder con cada dato de tramo a su columna correspondiente. En la opción 'Table data' se pulsara el botón Edit..., entonces se abrirá otra ventana en la que se introducirán los datos de los ángulos.



Ventana para la introducción de valores angulares de cada tramo

En esta ventana se introducirán los datos angulares, para ello se crea esta tabla de 2 filas, una para el ángulo α y otra para el ángulo β , y tantas columnas como tramos se tengan de la división del circuito. Una vez introducido se guarda y ya está preparado para tener los datos angulares en una salida, simplemente habrá que colocar un demultiplexor para separar los datos de los dos ángulos.

El modelo de circuito queda de la siguiente forma.



Modelo completo de circuito

Más adelante las salidas correspondientes a los ángulos se enlazarán con el modelo de radiación solar creado anteriormente y de esta manera se podrá ver la variación de radiación incidente en el panel solar del coche conforme este va avanzando por el circuito. Se colocan osciloscopios en la señal de tiempos y en los valores de los ángulos para comprobar que es correcto el funcionamiento. En el siguiente apartado se creará un circuito aleatorio de prueba con datos inventados para comprobar el funcionamiento del modelo.

Habrà que tener la consideración de que al hacer el modelo de esta forma, a la hora de simular la aplicación debemos de cargar tanto el modelo de Simulink (.mdl) como el archivo de datos de Matlab (.mat) en el cual se incluye la matriz de datos, sino el programa proporcionará un error al no tener datos de circuito para realizar la simulación en Simulink.

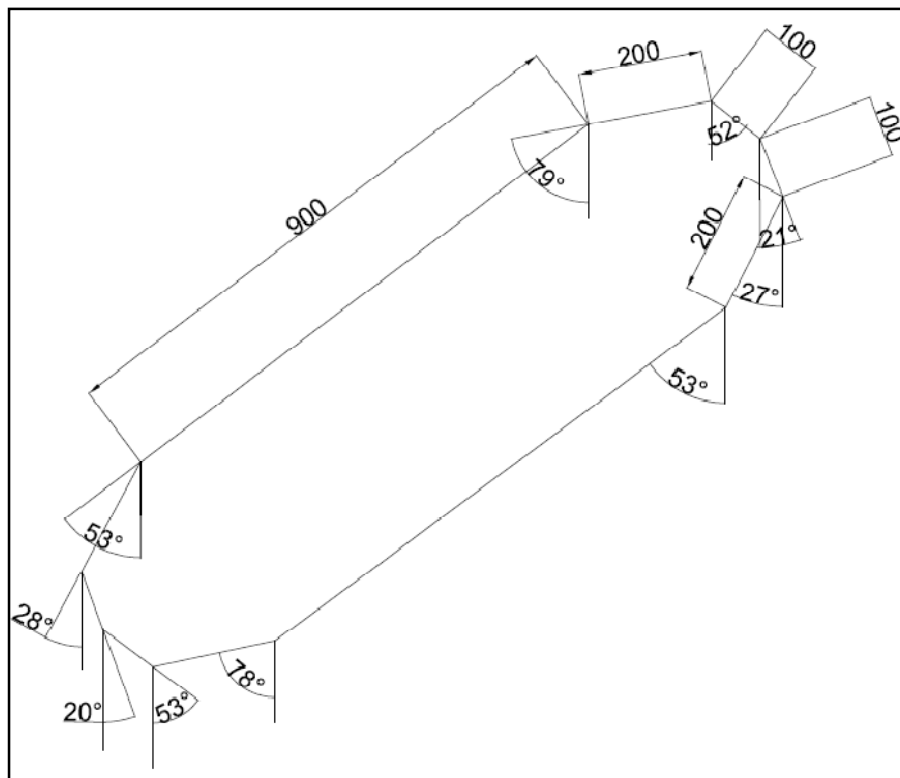
Circuito aleatorio de prueba

7. Circuito aleatorio de prueba

7.1. Creación del modelo

Para comprobar el correcto funcionamiento del modelo creado para simular la circulación por un circuito, se utilizara un circuito inventado de prueba.

El circuito será un circuito ovalado típico que se discretizará en 10 tramos. Se dibujara el circuito en cualquier software de dibujo, en este caso se ha elegido Autocad, que así facilita el trabajo a la hora de obtener los ángulos correspondientes a la desviación con respecto al Sur. Los ángulos de inclinación, al no existir perfil de elevación por ser un circuito inventado, se inventaran para cada tramo. Se realizaran los pasos indicados anteriormente y se tendrán los ángulos α y β de cada tramo. En la siguiente imagen se muestra un esquema del circuito discretizado en tramos con datos de longitud y de ángulo de desviación con respecto al Sur.



Circuito de prueba

El sentido del circuito es el de las agujas del reloj, se supondrá que el coche sale de la mitad del tramo largo inferior.

En la tabla siguiente se muestran los datos de cada tramo, es decir, los ángulos α y β , la longitud del tramo, el tiempo del tramo, el tiempo sobre base de tiempo 1 y el tiempo acumulado en cada tramo.

Tramos	α	β	Longitud	Tiempo	Tiempo en base 1	Tiempo acumulado
0	-53	10	450	67,5	0,15	0
1	-78	10	200	30	0,066666667	0,15
2	53	0	100	15	0,033333333	0,216666667
3	20	0	100	15	0,033333333	0,25
4	-28	0	200	30	0,066666667	0,283333333
5	-53	10	900	135	0,3	0,35
6	-79	10	200	30	0,066666667	0,65
7	52	0	100	15	0,033333333	0,716666667
8	21	0	100	15	0,033333333	0,75
9	-27	0	200	30	0,066666667	0,783333333
10	-53	10	450	67,5	0,15	0,85
Totales				450	1	

El tiempo se ha calculado en base a una velocidad de 24 Km/h. Para el cálculo del tiempo necesario para cada tramo se hace dividiendo la longitud entre la velocidad base, hay que tener en cuenta las unidades, y se tendrá que dividir todo entre 1000 para pasar los metros a kilómetros y multiplicar por 3600 para pasar las horas a segundos.

$$Tiempo = \frac{Longitud}{Velocidad} \frac{3600}{1000}$$

Para el cálculo del tiempo en base 1 simplemente habrá que dividir el tiempo de tramo calculado anteriormente entre el tiempo total del circuito.

$$Tiempo\ en\ base\ 1 = \frac{Tiempo\ tramo}{Tiempo\ total}$$

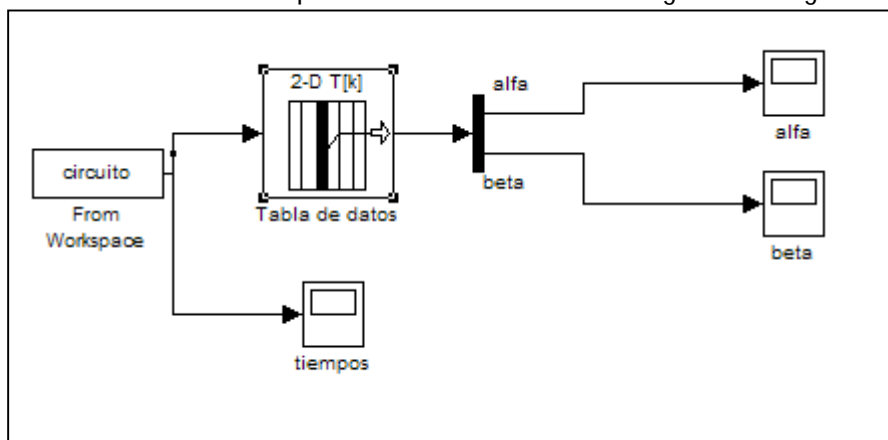
Y por último, los tiempos acumulados se hacen sumando los tiempos en base 1 de todos los tramos anteriores al que se está empezando, por tanto, el primer tramo empezara con un tiempo de 0.

Estos datos de tiempo acumulado son los que se introducen en la matriz de Matlab para crear la señal de tiempos que indica el momento en que el coche va cambiando de tramo. La matriz de Matlab tomara la forma siguiente.

circuito <11x2 double>		
	1	2
1	0	0
2	0.1500	1
3	0.2167	2
4	0.2500	3
5	0.2833	4
6	0.3500	5
7	0.6500	6
8	0.7167	7
9	0.7500	8
10	0.7833	9
11	0.8500	10

Matriz de Matlab con datos del circuito de prueba

El modelo de circuito en Simulink queda como se muestra en la siguiente imagen.



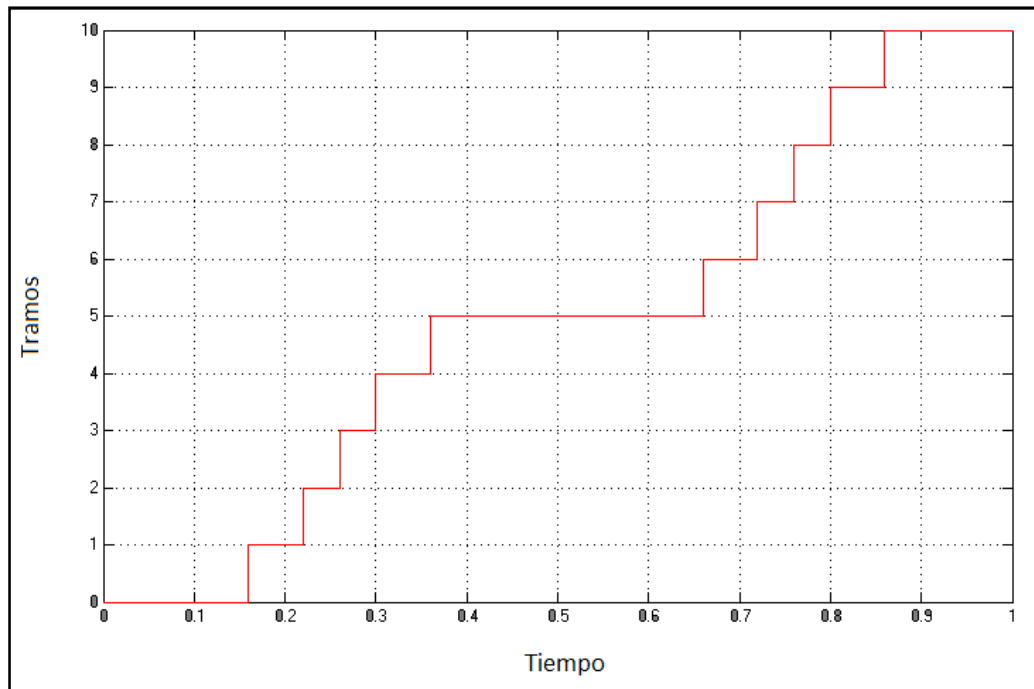
Modelo de circuito de prueba completo

7.2. Resultados del modelo

A continuación se mostrarán los gráficos proporcionados por los osciloscopios colocados en el modelo.

Tiempos

El osciloscopio nombrado como tiempos se encarga de mostrar la señal de tiempos que se crea a partir de la matriz creada en Matlab, y que servirá para seleccionar la columna correspondiente al tramo en la tabla de datos. La señal se muestra en la siguiente imagen.

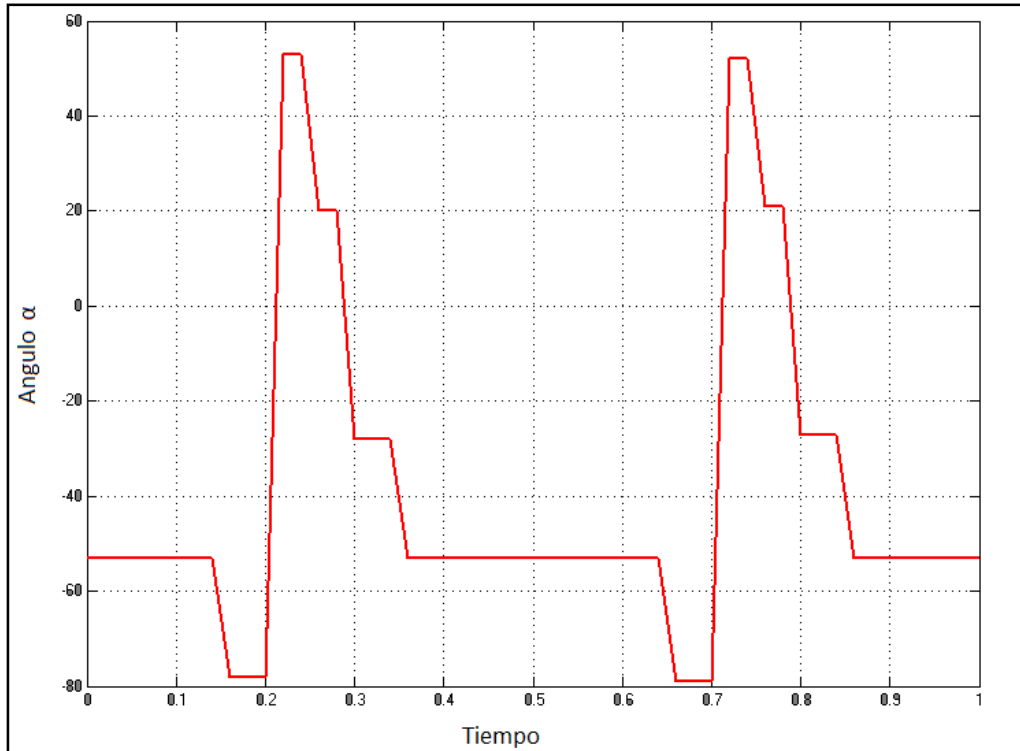


Señal de tiempo del circuito de prueba

Se puede observar el escalonamiento que corresponde a cada uno de los tramos existentes en el circuito, por ejemplo se observa un tramo más largo que se corresponde a la recta de 900 m.

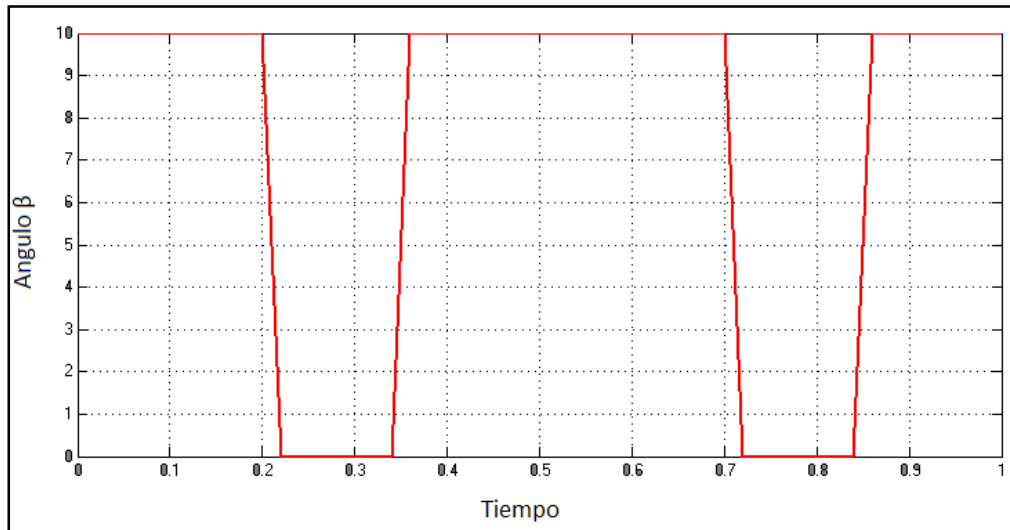
A continuación se muestran también las graficas correspondiente a los osciloscopios alfa y beta que muestran la variación de estos ángulos en el tiempo que va cambiando el coche de tramo.

Angulo α



Variación del ángulo α en función del tiempo

Angulo β



Variación del ángulo β en función del tiempo

Se puede observar como los ángulos van cambiando conforme a los valores que se han indicado en las tablas anteriormente mostradas. Se puede observar como curiosidad que los ángulos no cambian directamente en el momento que el coche cambia de tramo según la señal de tiempos, esto es mejor para la simulación ya que en realidad ningún ángulo cambia

directamente de un valor a otro sin pasar por los intermedios, por lo que la pequeña pendiente que se forma entre los dos valores angulares de dos tramos distintos es una mejor aproximación al comportamiento real del coche.

Modelo de energía generada

8. Modelo de energía generada

Antes de entrar en la caracterización del circuito de velocidad de Cartagena, uno de los principales objetivos, se tiene que conseguir otro objetivo importante como es contabilizar la energía generada por el coche solar en una vuelta a cualquier circuito.

Con el modelo del circuito realizado ya se tienen los datos que van variando de los ángulos α y β de cada tramo, y por tanto introduciendo estos datos en el modelo de radiación solar se consigue obtener la variación de radiación solar conforme el coche solar se va moviendo por el circuito. Esta variación de radiación solar se usará en el modelo de panel solar, para obtener una variación de intensidad aportada por el panel solar al motor, en concreto, al sistema que forman el regulador con el motor y las baterías. Esta intensidad variable irá acompañada de una tensión constante en bornes de panel solar, por lo que del producto de estas dos magnitudes se obtendrá la potencia generada por el panel solar.

$$P = V * I$$

La energía generada es la integral de la potencia con respecto al tiempo, cuando la potencia es constante, la energía se calculara como potencia por tiempo.

$$E = P * t$$

En este caso al no ser la potencia constante sino dependiente en el tiempo, se debe de realizar la integral de la potencia en función del tiempo.

$$E = \int P(t) dt$$

Esta integral ira calculando instantáneamente la potencia en el tiempo que se mantenga e ira sumando todos los valores, dando finalmente un valor de energía.

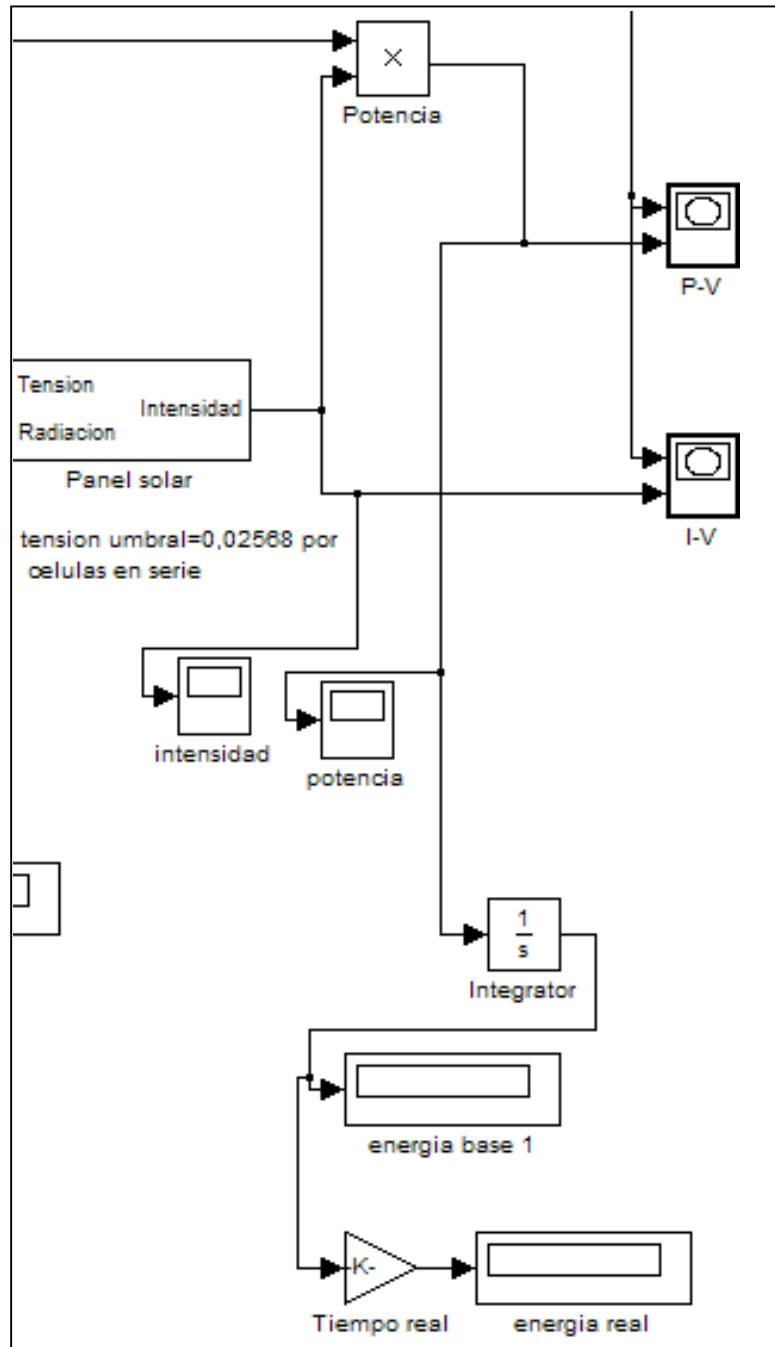
8.1. Creación del modelo

El cálculo indicado anteriormente se debe de realizar en Simulink.

Para realizar la integral en Simulink se procederá con un bloque 'Integrator' en el que se insertara la señal de la potencia del panel solar en cada instante, este bloque automáticamente va realizando la integral y al final de simulación se puede observar su valor en un display.

En la simulación los tiempos son en base a 1, ya que el tiempo que se utiliza en la simulación es de 1, por tanto, la energía obtenida mediante el bloque integrador será en base a 1. Esta energía obtenida no será real, ya que el tiempo real es bastante mayor que 1, por lo que para obtener el valor real de energía generada habrá que multiplicar el valor obtenido por el tiempo total real en realizar una vuelta al circuito, que dependerá de la velocidad a la que se circule.

El modelo de energía generada explicado es el representado en la figura siguiente.



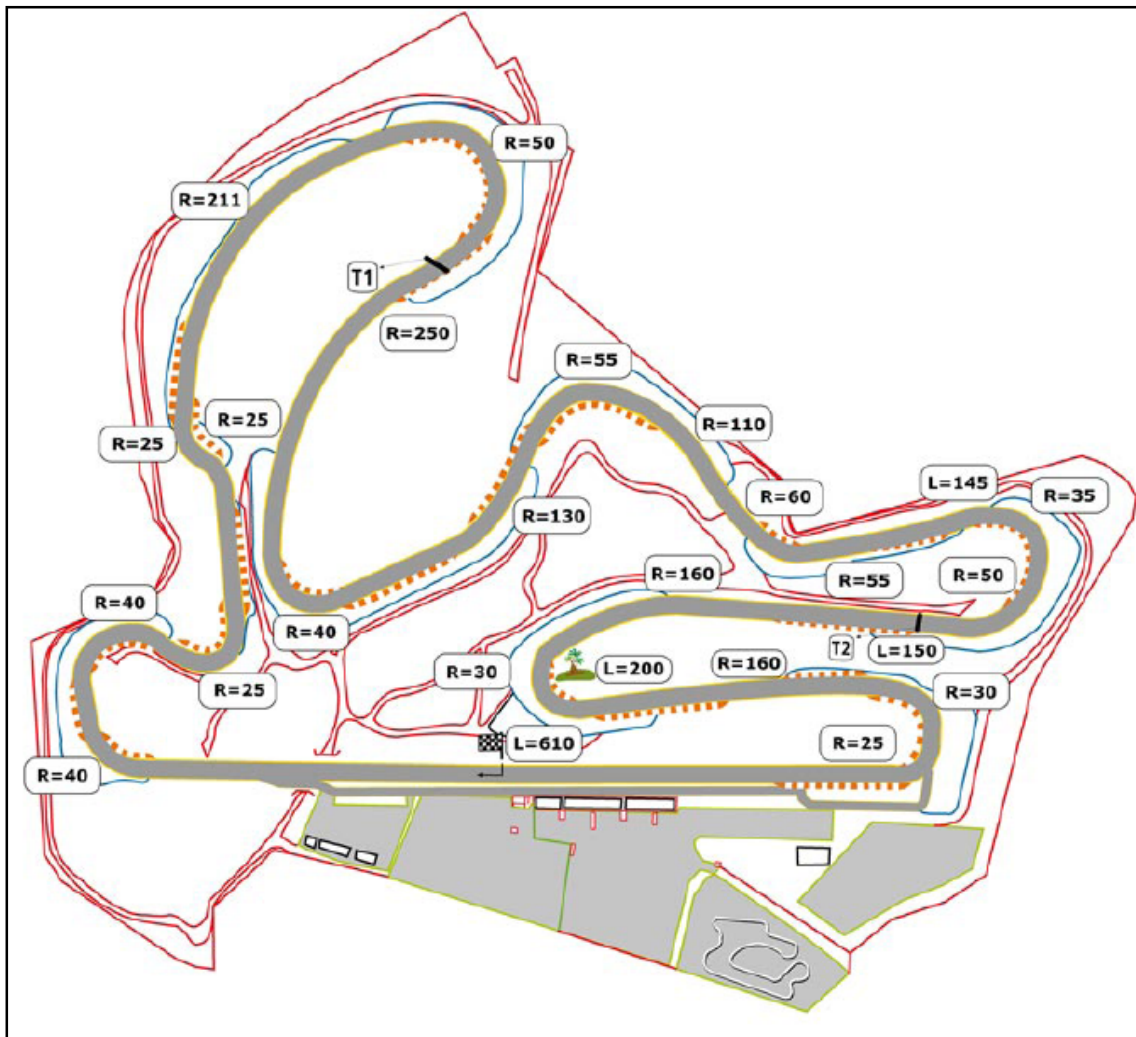
Modelo para el cálculo de la energía generada

Circuito de Cartagena

9. Circuito de Cartagena

En este apartado se tratara de realizar la simulación lo más fiel posible del trayecto realizado por el coche en el circuito de Cartagena.

Los forma del circuito y sus datos principales se indican a continuación.



Circuito de velocidad de Cartagena

- Longitud Total: **3.506.02 mts.**
- Longitud de Recta de Meta: **610 mts.**
- Anchura de pista: **En recta meta 12 mts, resto 10 mts.**
- Número de Curvas: **Total 18, a derechas 10 y a izquierdas 8.**
- Desnivel máximo: **8,92%**

Para obtener los datos de orientación e inclinación de este circuito se hará mediante el método explicado usando Google Earth para medir el ángulo de orientación, y usando su herramienta 'Perfil de elevación' para obtener los datos correspondientes al ángulo de inclinación.

Para realizar una labor correcta a la hora de caracterizar el circuito, se realizarán dos discretizaciones diferentes del circuito, una con más tramos que la otra y se comprobará el error existente entre ellas para determinar si se deben realizar más divisiones en tramos del circuito o el error es despreciable y el modelo suficientemente aceptable.

A continuación se muestran los datos correspondientes a cada una de las dos discretizaciones iniciales realizadas y sus modelos correspondientes con los resultados registrados.

9.1. 1ª Caracterización

En esta primera caracterización del circuito se ha dividido el circuito en 33 tramos, tal y como muestra la imagen.



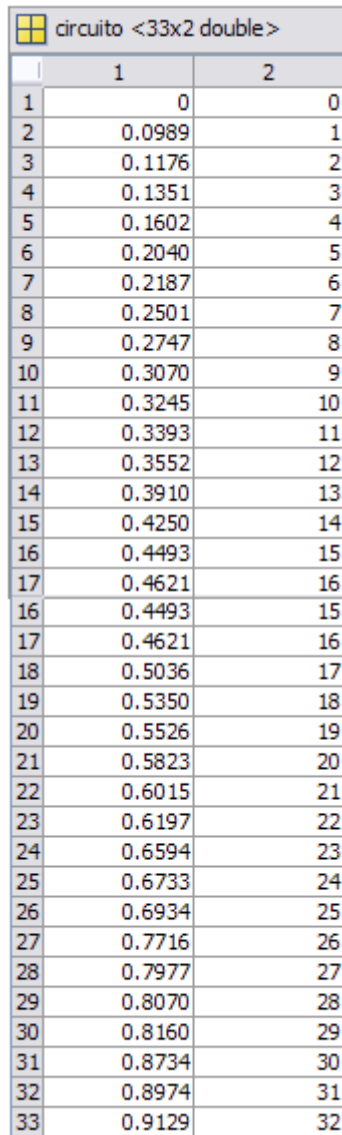
Primera caracterización del circuito en 33 tramos

La imagen está orientada al Norte. La salida está marcada en la imagen y se realiza en sentido hacia el Noroeste.

Mientras se realizaban los tramos indicados se iban tomando los datos correspondientes a los ángulos necesarios para caracterizar cada tramo. También se ha medido la longitud de cada tramo para poder estimar el tiempo necesario para realizarlo a una velocidad de 24 km/h, de esta manera se pueden determinar los tiempos en base 1 y tiempos acumulados.

Tramos	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	Longitud (m)	Tiempo (seg)	Tiempo en base 1	Tiempo acumulado
0	35	1	343	51,45	0,098898564	0
1	-18	2,08	64,8	9,72	0,018684044	0,098898564
2	-79	-1,88	60,8	9,12	0,017530708	0,117582608
3	20	3,7	87	13,05	0,025085059	0,135113315
4	-53	-1,75	152	22,8	0,043826769	0,160198374
5	-13	1,39	50,9	7,635	0,014676201	0,204025143
6	-66	-2,08	109	16,35	0,031428407	0,218701344
7	90	3,44	85,3	12,795	0,024594891	0,25012975
8	63	1,02	112	16,8	0,032293409	0,274724641
9	33	0	60,8	9,12	0,017530708	0,30701805
10	-28	-1,28	51,3	7,695	0,014791535	0,324548757
11	-90	0,75	55	8,25	0,01585837	0,339340292
12	72	1	124	18,6	0,035753417	0,355198662
13	-80	0,89	118	17,7	0,034023413	0,390952079
14	-55	-1,63	84,2	12,63	0,024277723	0,424975492
15	0	0	44,4	6,66	0,01280203	0,449253215
16	62	1,17	144	21,6	0,041520097	0,462055245
17	-84	-1,05	109	16,35	0,031428407	0,503575342
18	48	3,34	61,1	9,165	0,017617208	0,535003748
19	-6	0,77	103	15,45	0,029698403	0,552620956
20	-19	-1,09	66,4	9,96	0,019145378	0,582319359
21	35	-2,23	63,1	9,465	0,018193876	0,601464737
22	45	3,31	138	20,7	0,039790093	0,619658613
23	-25	-5,81	48,2	7,23	0,013897699	0,659448705
24	80	4,03	69,7	10,455	0,02009688	0,673346404
25	30	-0,42	271	40,65	0,078138516	0,693443285
26	57	2,39	90,7	13,605	0,026151894	0,7715818
27	-72	-4,84	32,2	4,83	0,009284355	0,797733695
28	-2	-1,82	31,3	4,695	0,009024854	0,80701805
29	40	-0,57	199	29,85	0,057378467	0,816042904
30	26	-3	83,2	12,48	0,023989389	0,873421371
31	-54	-2,47	53,8	8,07	0,01551237	0,897410761
32	35	1	302	45,3	0,08707687	0,91292313
Totales			3468,2	520,23	1	

De esta tabla se extraen los datos necesarios para crear la matriz que determina la señal de tiempos necesaria para ir cambiando los datos angulares de cada tramo. Se creará en entorno Matlab una matriz de nombre Circuito y de unas dimensiones de 33x2, en la que se incluirán los números de tramo y su tiempo acumulado correspondiente; en la siguiente imagen se muestra la forma en que se ha introducido esta matriz en el programa.



	1	2
1	0	0
2	0.0989	1
3	0.1176	2
4	0.1351	3
5	0.1602	4
6	0.2040	5
7	0.2187	6
8	0.2501	7
9	0.2747	8
10	0.3070	9
11	0.3245	10
12	0.3393	11
13	0.3552	12
14	0.3910	13
15	0.4250	14
16	0.4493	15
17	0.4621	16
16	0.4493	15
17	0.4621	16
18	0.5036	17
19	0.5350	18
20	0.5526	19
21	0.5823	20
22	0.6015	21
23	0.6197	22
24	0.6594	23
25	0.6733	24
26	0.6934	25
27	0.7716	26
28	0.7977	27
29	0.8070	28
30	0.8160	29
31	0.8734	30
32	0.8974	31
33	0.9129	32

Matriz 'circuito' de la primera caracterización

Con esta matriz creada simplemente quedará realizar el modelo explicado anteriormente en Simulink.

Para ello se deben introducir los valores de los ángulos α y β en la tabla de datos según lo explicado en los apartados anteriores. En la tabla se introducirán los datos por columnas como muestran las imágenes a continuación.

Breakpoints	Column	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Row		--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
(1)	--	35	-18	-79	20	-53	-13	-66	90	63	33
(2)	--	1	2.08	-1.88	3.7	-1.75	1.39	-2.08	3.44	1.02	0

Breakpoints	Column	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)
Row		--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
(1)	--	-28	-90	72	-80	-55	0	62	-84	48	-6	-19	35
(2)	--	-1.28	0.75	1	0.89	-1.63	0	1.17	-1.05	3.34	0.77	-1.09	-2.23

Breakpoints	Column	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)	(31)	(32)	(33)
Row		--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
(1)	--	45	-25	80	30	57	-72	-2	40	26	-54	35
(2)	--	3.31	-5.81	4.03	-0.42	2.39	-4.84	-1.82	-0.57	-3	-2.47	1

Datos de ángulos introducidos en la tabla de datos

La fila (1) corresponde a los ángulos α de cada tramo mientras que la fila (2) son los ángulos β , la señal de tiempos ira seleccionando cada tramo cuando marque su tiempo acumulado correspondiente e ira proporcionando a la salida los valores angulares de ese tramo.

Con estos datos introducidos ya se puede recrear el modelo completo introduciendo estos datos en el modelo de radiación solar y del panel solar junto con el de energía generada.

Ahora debemos caracterizar los datos para la radiación solar, ya que se intentara recrear las condiciones de la carrera Solar Race. Para ello se debe tener en cuenta el día aproximado de realización de la carrera y la hora a la que se realiza, ya que son dos datos necesarios para introducir en el modelo de radiación solar. También se debe tener en cuenta el mes en el que se produce la carrera, para seleccionar un índice de claridad de la tabla creada anteriormente con datos de índice de claridad para cada mes del año.

La Solar Race en 2012 se celebrara de los días 4 al 6 de Octubre en el circuito de velocidad de Cartagena. La hora estimada de las carreras será a las 12 del mediodía. Se considerara una temperatura media para el mes de Octubre de unos 20°C, aunque como se ha indicado anteriormente, esta variable no tendrá mucha influencia en los resultados presentados.

La carrera está dividida en tandas de cuatro vueltas al circuito cada una (13,779 km), siendo el objetivo recorrer esta distancia con el menor consumo de energía posible.

Es necesario que cada vehículo finalice con éxito tres tandas.

Para cada una de estas tres tandas se obtendrá el resultado de consumo de energía, expresado en vatios-hora/km, siendo la media aritmética de los tres resultados el dato que se tendrá en cuenta para la clasificación final.

Cada vehículo sólo puede realizar un máximo de cinco tandas de competición.

En el caso de que un vehículo realice con éxito más de tres tandas, se elegirán las tres mejores (menores) marcas para el cálculo del resultado final.

En el caso de que dentro de una misma categoría ningún equipo realice tres tandas válidas, este número se irá reduciendo progresivamente hasta determinar el vencedor.

La Organización pondrá a cero los dos juliómetros del vehículo en la línea de salida, antes de cada tanda. Al final de la tanda, la Organización tomará nota de las lecturas de ambos juliómetros.

La clasificación se determinará con el resultado de restar a la lectura del juliómetro "MOTOR" la lectura del juliómetro "SOLAR".

EMOTOR - ESOLAR

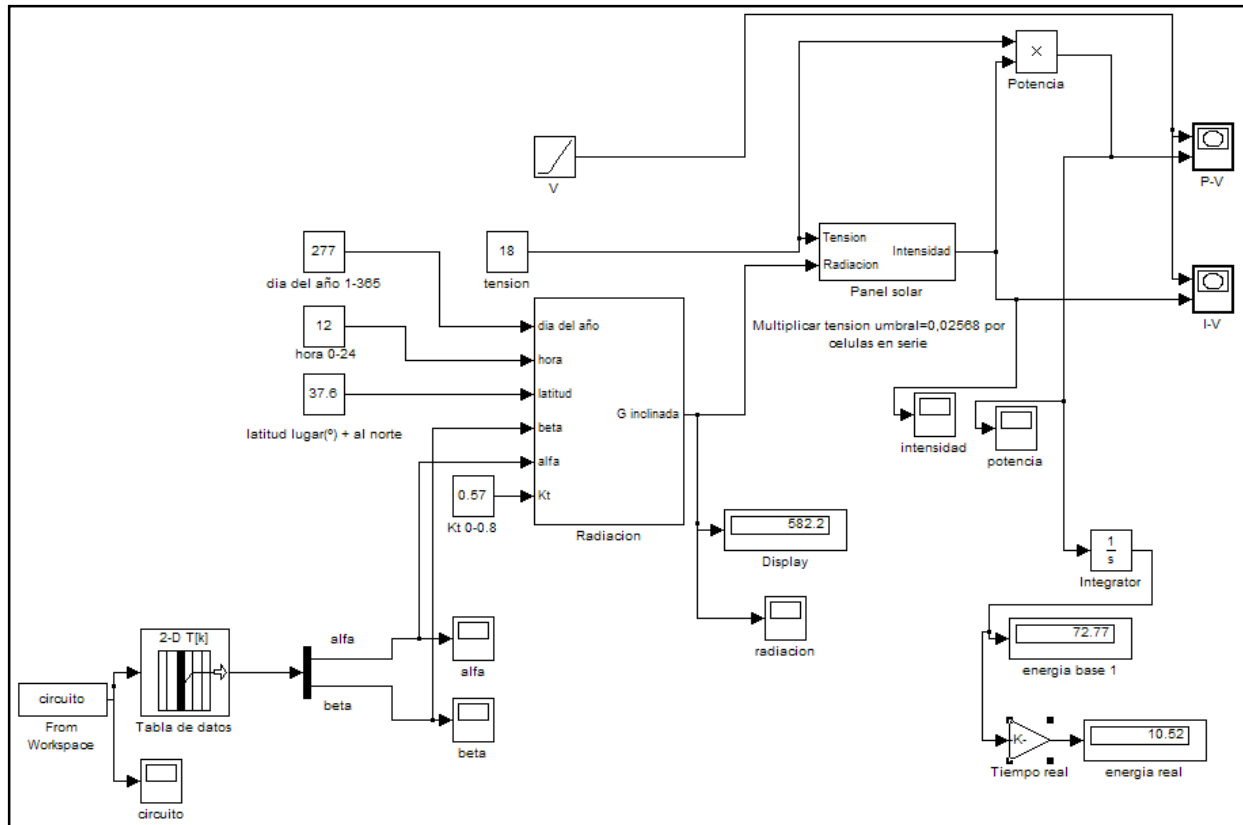
Serán válidas tanto las tandas en las que la producción de energía (ESOLAR) sea superior al consumo (EMOTOR) como aquellas tandas en las que la producción de energía (ESOLAR) sea inferior al consumo (EMOTOR); por tanto, los valores de clasificación podrán ser negativos o positivos, respectivamente, y se ordenarán de menor a mayor como números reales.

El objetivo de la carrera es intentar conseguir un balance energético positivo.

Por tanto, a la hora de introducir estos datos en Simulink, el día 4 de Octubre corresponde con el 277 en la cuenta natural de días del 1 al 365, la hora se considerara a las 12 del mediodía. El índice de claridad estimado para el mes de Octubre es de 0,566, aunque se aproximara en el modelo a un valor de 0,57.

La latitud del lugar se considerara $37,6^\circ$, que aunque no sea con exactitud total la del emplazamiento del circuito de velocidad de Cartagena, el error es despreciable para la estimación de energía generada.

El modelo completo con los datos angulares de la tabla de datos enlazado al modelo de radiación solar y de panel solar, junto con la energía generada por éste es el representado en la siguiente imagen.



Modelo completo para la primera caracterización del circuito de Cartagena (Ver en Anexo)

Este es el modelo ya ejecutado con un tiempo de simulación de un segundo, se puede observar como en el display final se puede ver una energía real generada de 10,52 Wh. Esta energía corresponde a un panel de los dos instalados en el coche solar, por tanto, para estimar la energía total simplemente habrá que multiplicar por 2 esta cantidad ya que en el coche solar se tienen 2 paneles instalados. La cantidad de energía total generada es de 21,04 Wh. En el bloque de ganancia llamado 'Tiempo real' se multiplica por un valor de 520,23 que corresponde con el tiempo real que tarda el coche en dar una vuelta a la velocidad de 24 km/h, extraído de la tabla confeccionada anteriormente. Este tiempo se corresponde con un tiempo total para una vuelta de 8 minutos y 40 segundos.

Los datos reales recogidos en una vuelta del coche solar en el circuito real son:

- Tiempo: 8 minutos y 30 segundos.
- Energía: 21 Wh

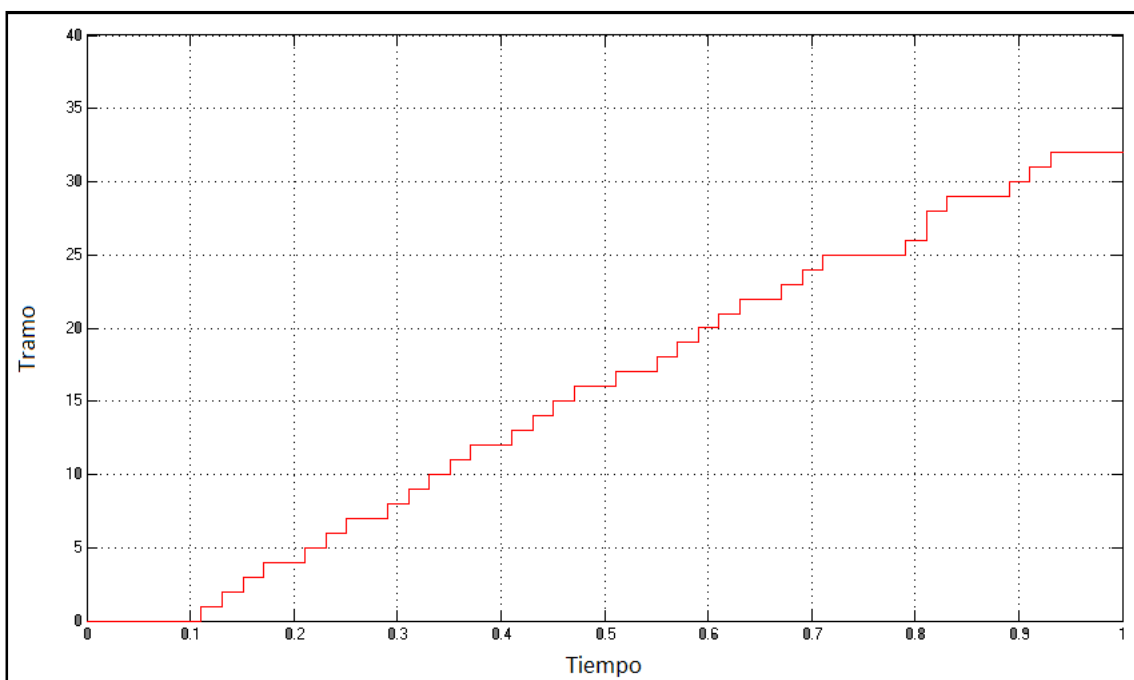
Por tanto, se observa que los datos del modelo son bastante parecidos a los datos reales obtenidos en el circuito, por lo que el modelo es válido.

9.1.1. Resultados

Con el modelo realizado completamente, se mostraran a continuación las graficas que proporciona el modelo en cada uno de sus osciloscopios.

Señal de tiempos

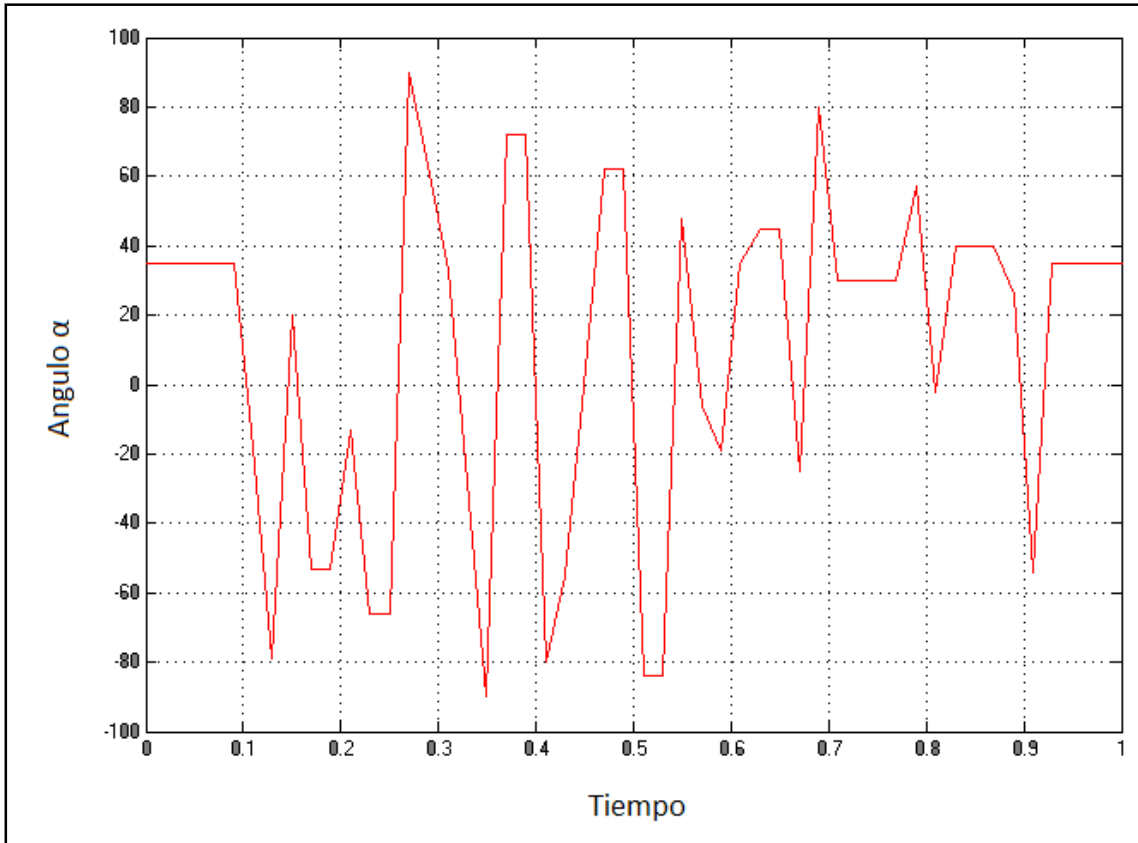
Esta señal está compuesta con los datos de la matriz con los números de tramo y los tiempos acumulados. Servirá para seleccionar los valores de ángulos de cada tramo.



Señal de tiempos de la primera caracterización

Angulo α

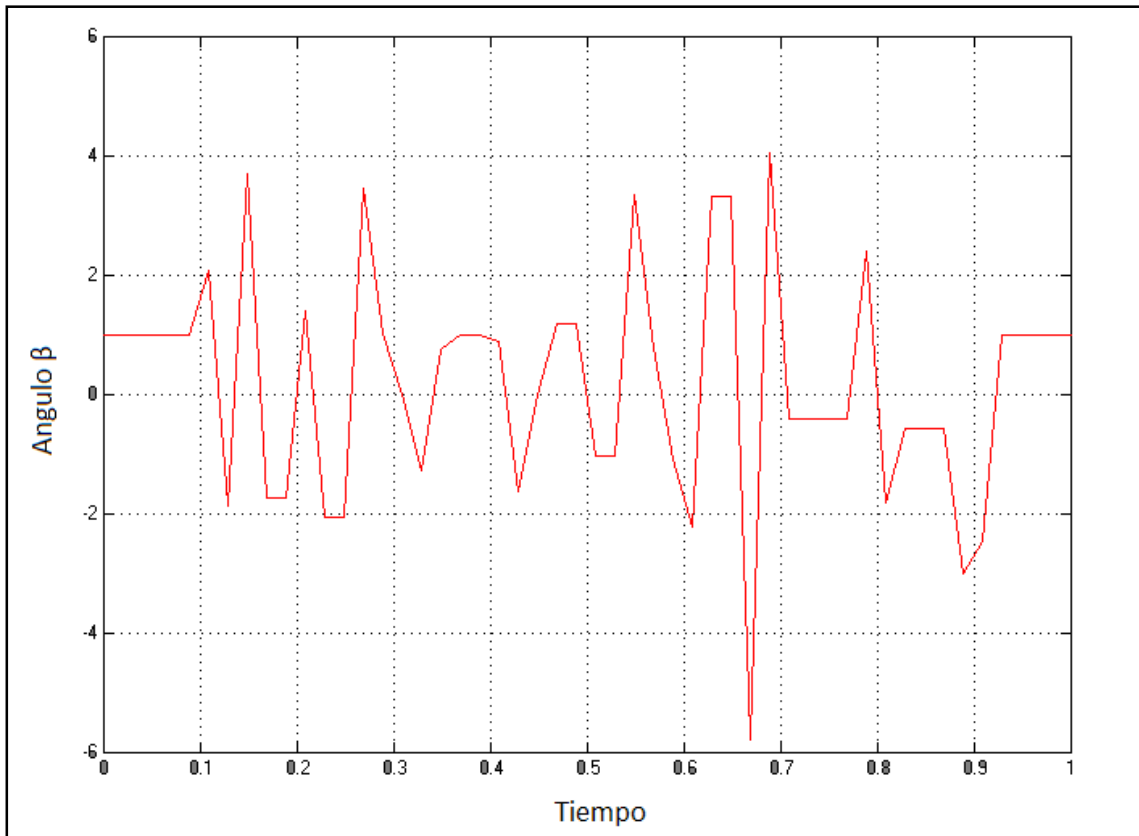
La grafica muestra la evolución de los ángulos de orientación con respecto al sur del panel solar en el tiempo que dura la simulación.



Angulo α correspondiente a la primera caracterizacion

Angulo β

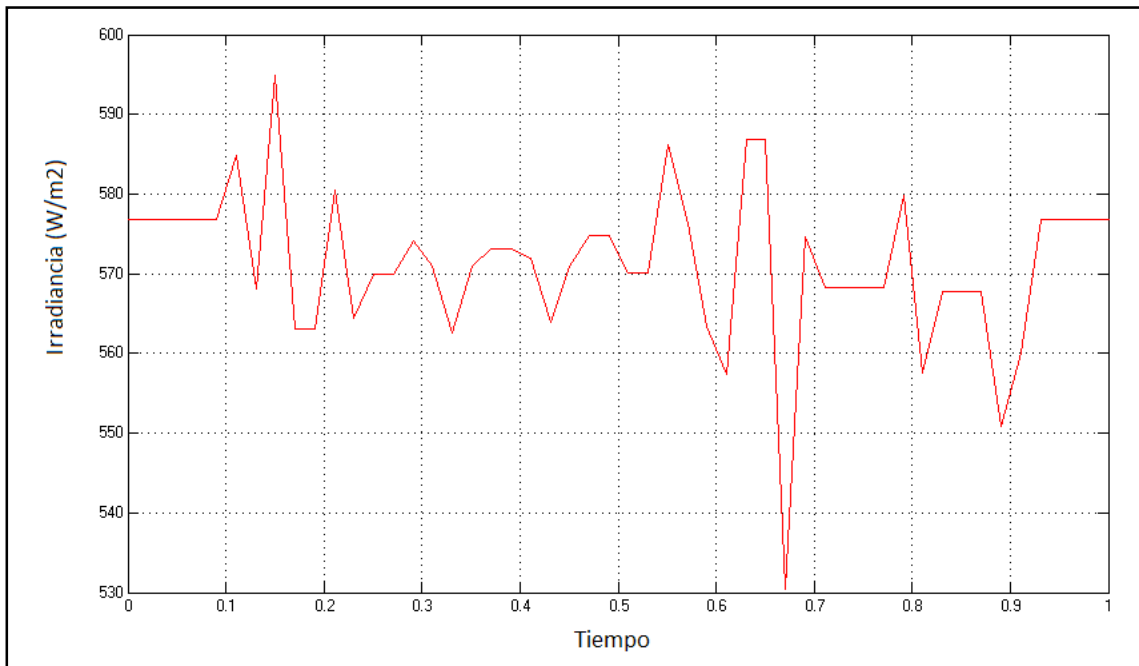
La grafica muestra la evolución del ángulo de inclinación del panel solar por todo el recorrido del circuito.



Angulo β correspondiente a la primera caracterizacion

Irradiancia global

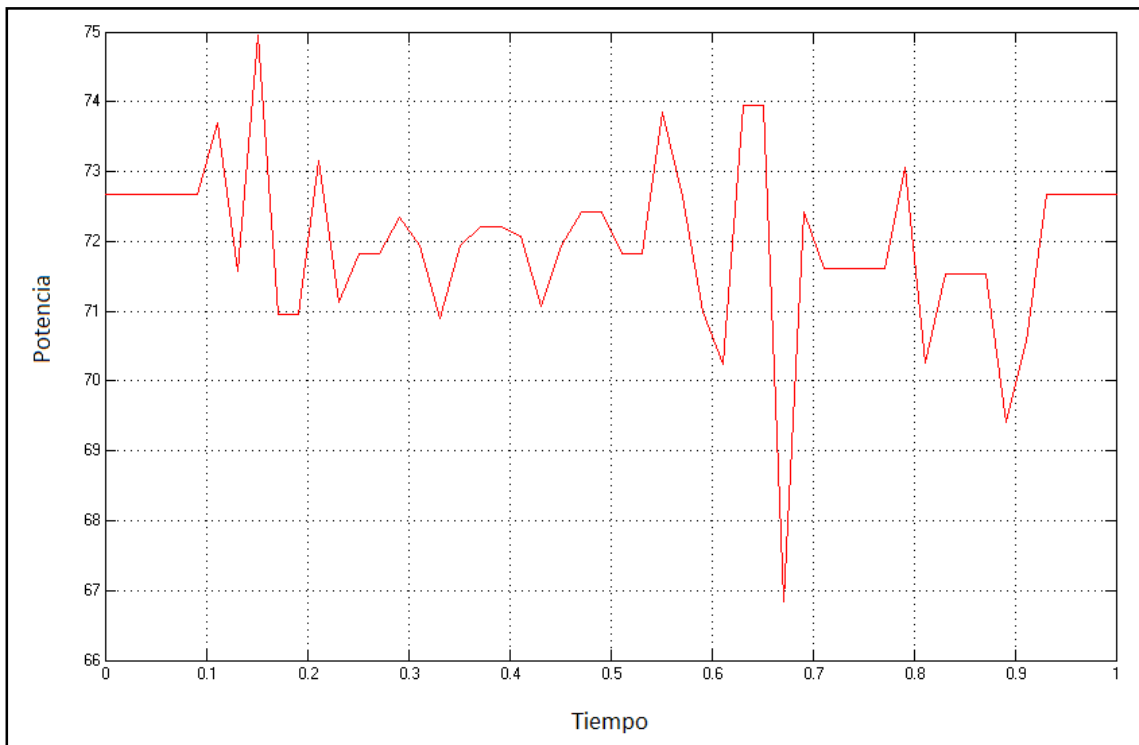
En el osciloscopio marcado como 'Radiación' se muestra la evolución de la irradiancia global sobre superficie arbitrariamente orientada e inclinada en cada uno de los tramos del circuito.



Variación de la irradiancia solar en la primera caracterización

Potencia

La irradiancia variable con el tiempo provoca una intensidad también variable con el tiempo, esta intensidad proporcionada por el panel solar se produce a una tensión constante de 18 voltios, valor indicado en el modelo a la entrada del panel solar. La potencia generada por el panel solar en cada instante no será fija, y su variación se muestra en la siguiente imagen.



Variación de la potencia generada en la primera caracterización

Esta potencia será integrada con respecto al tiempo y se obtendrá el valor de energía generada en el display anteriormente mencionado.

9.2. 2ª Caracterización

Se debe realizar otra caracterización ya que aunque los datos obtenidos en el modelo son bastante parecidos a los datos reales, se pretende ver la diferencia que puede existir entre realizar un mayor o menor número de tramos.

Para ello ahora se ha dividido el circuito de Cartagena en 42 tramos, por tanto, el circuito queda discretizado de una forma teóricamente más eficaz.

Los tramos realizados se muestran en la siguiente imagen, donde la salida no está indicada pero se sitúa en el mismo sitio que en la caracterización anterior.



Segunda caracterización del circuito de Cartagena en 42 tramos

A continuación se muestra la tabla con los datos de cada tramo. Se ha vuelto a considerar una velocidad de 24 km/h.

Tramos	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	Longitud (m)	Tiempo (seg)	Tiempo en base 1	Tiempo acumulado
0	34	1	347,4	52,11	0,100491756	0
1	-9	3,2	34,4	5,16	0,009950824	0,100491756
2	-43	1,38	53,7	8,055	0,0155337	0,11044258
3	90	2,9	33,9	5,085	0,00980619	0,12597628
4	41,5	4,16	32,8	4,92	0,009487995	0,13578247
5	9,3	4,29	54,3	8,145	0,015707261	0,145270466
6	90	3,4	33,3	4,995	0,009632629	0,160977726
7	-48	-2,05	128,3	19,245	0,037113104	0,170610356
8	-14	1,7	43,4	6,51	0,012554238	0,20772346
9	-58	-1	78,5	11,775	0,02270755	0,220277697
10	-77	-2,69	72,8	10,92	0,021058721	0,242985247
11	81,2	3	71,2	10,68	0,020595892	0,264043969
12	60,5	1,52	93,3	13,995	0,026988719	0,284639861
13	34	-1	50,2	7,53	0,014521261	0,31162858
14	-14	-1,38	41,3	6,195	0,011946775	0,326149841
15	-67	-0,92	44,7	6,705	0,012930286	0,338096616
16	72	1	132,6	19,89	0,038356957	0,351026902
17	90	1,85	80,6	12,09	0,023315013	0,389383859
18	-71	-2,32	86,3	12,945	0,024963841	0,412698872
19	-52	-2,43	53,5	8,025	0,015475846	0,437662713
20	0	0	36,9	5,535	0,010673995	0,453138559
21	58	0,92	122,4	18,36	0,035406422	0,463812554
22	84	0	61,5	9,225	0,017789991	0,499218976
23	-81	-1,4	67,8	10,17	0,019612381	0,517008967
24	59	3,03	44,2	6,63	0,012785652	0,536621348
25	3,5	1,7	71,5	10,725	0,020682673	0,549407
26	-18,5	-2,14	109,9	16,485	0,03179057	0,570089673
27	26	-1,59	40,4	6,06	0,011686433	0,601880243
28	46	0,97	158	23,7	0,045704368	0,613566676
29	-12	-5	39	5,85	0,011281458	0,659271044
30	-78	-6,88	45,6	6,84	0,013190628	0,670552502
31	65	4,17	41	6,15	0,011859994	0,68374313
32	31	0,42	270,8	40,62	0,078333815	0,695603124
33	57,2	2,66	81	12,15	0,02343072	0,77393694
34	-81	-5,29	26,8	4,02	0,007752386	0,79736766
35	-32	-4,1	26	3,9	0,007520972	0,805120046
36	30	2,2	51	7,65	0,014752676	0,812641018
37	42	-1,34	161,5	24,225	0,046716806	0,827393694
38	25	-3,1	81,7	12,255	0,023633208	0,8741105
39	-37	-3,3	31	4,65	0,008967313	0,897743708
40	90	1,76	32,3	4,845	0,009343361	0,906711021
41	34	1	290,2	43,53	0,083945618	0,916054382
Totales			3457	518,55	1	

Estas tablas de datos también se han incorporado en un archivo Excel para que en el caso de querer comprobar el modelo a otra velocidad distinta a 24 km/h se pueda hacer simplemente cambiando ese dato, modificándose automáticamente los datos de tiempo de tramo y el tiempo total, que es el dato necesario en el bloque de ganancia al final del modelo, para conseguir la energía real. Los datos de tiempo en base 1 no cambiarán, precisamente por ser en base 1, ya que aunque se tarde más o menos en realizar un tramo según la velocidad, el tiempo en relación a los demás tramos sigue manteniéndose constante.

Con una velocidad más lenta el tiempo de exposición a la irradiancia solar aumenta, por lo que se generará más energía pero en la Solar Race hay un mínimo de velocidad media que cumplir, por lo que no se puede ir a la velocidad que se quiera para así generar más.

Como en el modelo anterior, se creará una matriz, en este caso de 42x2, con los datos de número de tramo y tiempo acumulado de la tabla. Esta matriz quedará de la siguiente forma.

circuito <42x2 double>					
	1	2			
1	0	0	22	0.4623	21
2	0.1002	1	23	0.4976	22
3	0.1101	2	24	0.5153	23
4	0.1256	3	25	0.5349	24
5	0.1353	4	26	0.5476	25
6	0.1448	5	27	0.5682	26
7	0.1605	6	28	0.5999	27
8	0.1701	7	29	0.6116	28
9	0.2071	8	30	0.6571	29
10	0.2196	9	31	0.6684	30
11	0.2422	10	32	0.6815	31
12	0.2632	11	33	0.6934	32
13	0.2837	12	34	0.7714	33
14	0.3106	13	35	0.7948	34
15	0.3251	14	36	0.8025	35
16	0.3370	15	37	0.8100	36
17	0.3499	16	38	0.8247	37
18	0.3881	17	39	0.8713	38
19	0.4114	18	40	0.8948	39
20	0.4362	19	41	0.9038	40
21	0.4517	20	42	0.9131	41

Matriz 'circuito' de la segunda caracterización

El siguiente paso es introducir los datos de los ángulos α y β en la tabla de datos correspondiente.

Breakpoints	Column	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Row		--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
(1)	--	34	-9	-43	90	41.5	9.3	90	-48	-14	-58
(2)	--	1	3.2	1.38	2.9	4.16	4.29	3.2	-2.05	1.7	-1

Breakpoints	Column	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)
Row		--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
(1)	--	-77	81.2	60.5	34	-14	-67	72	90	-71	-52	0	58
(2)	--	-2.69	3	1.52	-1	-1.38	-0.92	1	1.85	-2.32	-2.43	0	0.92

Breakpoints	Column	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)	(31)	(32)	(33)
Row		--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
(1)	--	84	-81	59	3.5	-18.5	26	46	-12	-78	65	31
(2)	--	0	-1.4	3.03	1.7	-2.14	-1.59	0.97	-5	-6.88	4.17	0.42

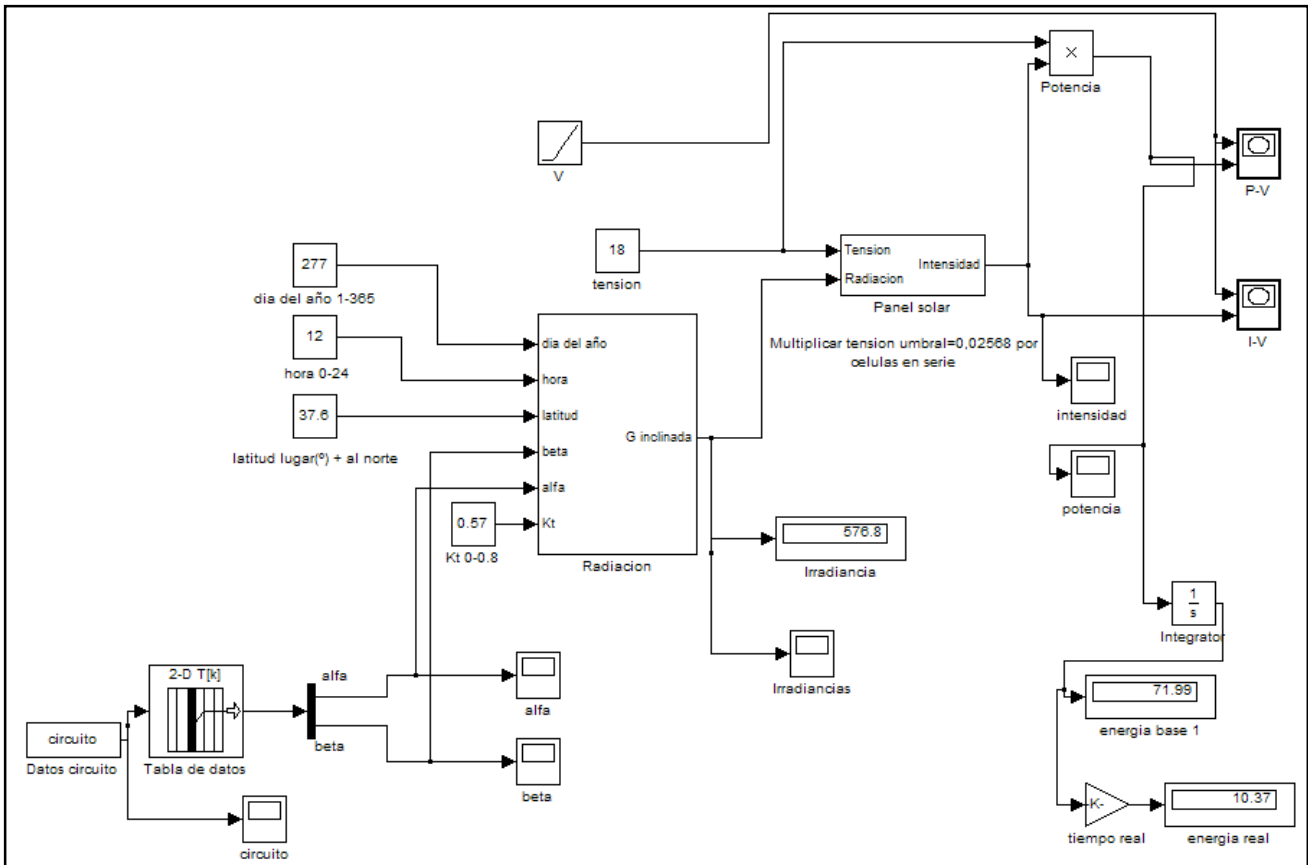
Breakpoints	Column	(34)	(35)	(36)	(37)	(38)	(39)	(40)	(41)	(42)
Row		--	--	--	--	--	--	--	--	--
(1)	--	57.2	-81	-32	30	42	25	-37	90	34
(2)	--	2.66	-5.29	-4.1	2.2	-1.34	-3.1	-3.3	1.76	1

Datos angulares introducidos en la tabla de datos

La fila (1) corresponde a los ángulos α de cada tramo mientras que la fila (2) son los angulos β , la señal de tiempos ira seleccionando cada tramo cuando marque su tiempo acumulado correspondiente e ira proporcionando a la salida los valores angulares de ese tramo.

Los datos para la simulación del modelo son los mismos que en el modelo anterior, ya que únicamente la variación de un modelo a otro es la caracterización del circuito en un mayor número de tramos, es decir, lo único que cambia es la matriz de datos de Matlab y la tabla de datos angulares del modelo en Simulink.

El modelo completo tiene la misma forma que en el apartado anterior, se representa a continuación la imagen donde se podrá observar el valor de energía generada en el display 'Energía real'.



Modelo completo de la segunda caracterización (Ver en Anexo)

En este caso la energía generada por un panel solar del coche es de un valor de 10,37 Wh, por tanto, al ser dos paneles en el coche, la energía total es de 20,74 Wh. Para obtener este valor de energía real se ha tenido que multiplicar con el bloque de ganancia la energía en base 1 por el tiempo total que dura el coche en el circuito en esta caracterización, que es de un valor de 518,55 segundos, que corresponde con 8 minutos y 38 segundos a 24 km/h.

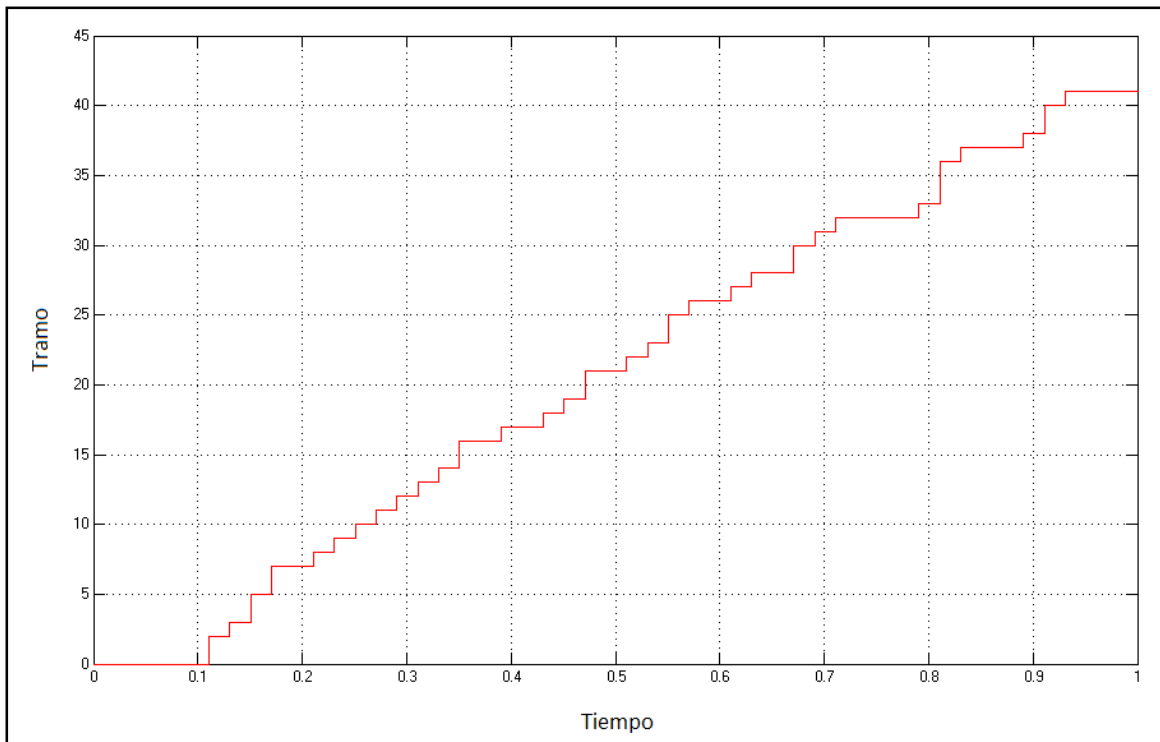
Comparando estos datos con los datos reales de una vuelta anteriormente indicados, se observa como la estimación es muy cercana a la realidad.

9.2.1. Resultados

Con el modelo realizado completamente, se mostraran a continuación las graficas que proporciona este modelo en cada uno de sus osciloscopios, que serán las graficas equivalentes a las mostradas en la 1ª caracterización.

Señal de tiempos

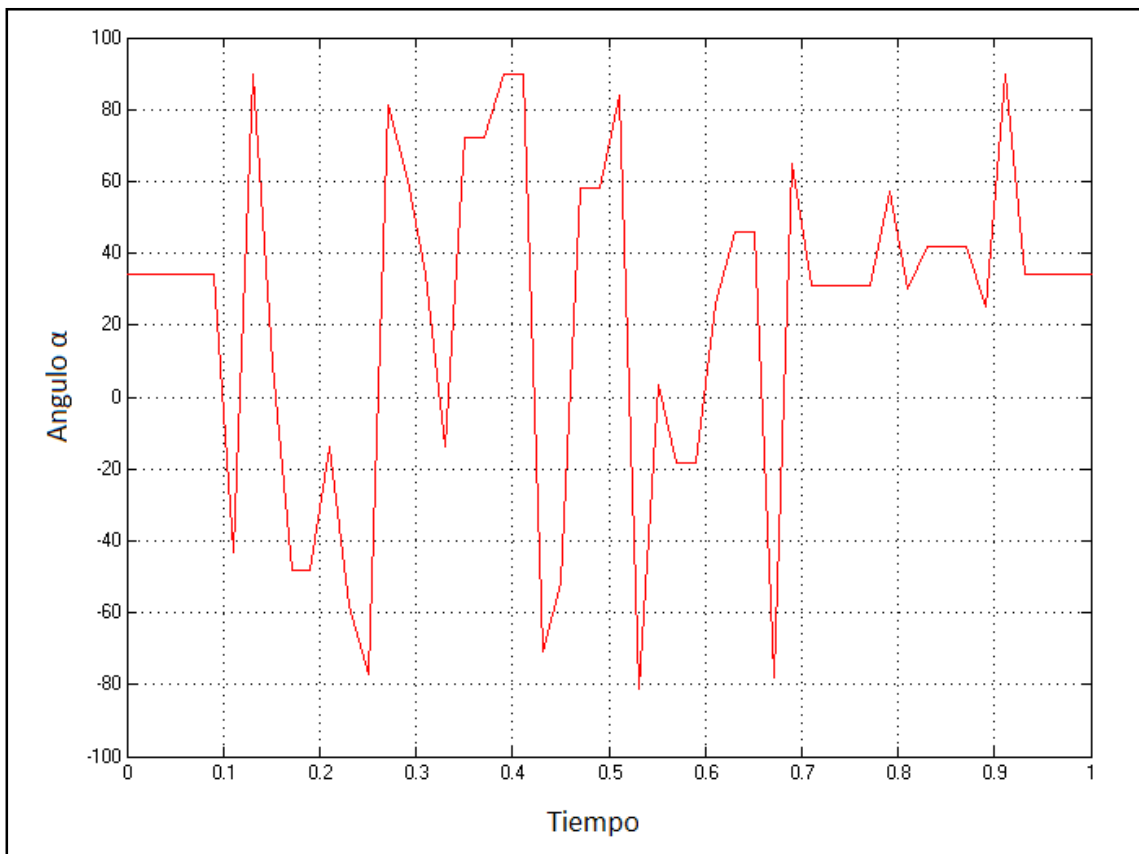
En la imagen se representa la lectura del osciloscopio 'circuito' que muestra la cantidad de tramos en que se ha dividido el circuito y su permanencia en el tiempo de simulación en base a un tiempo de 1 segundo. Esta señal se compone a partir de la matriz creada en Matlab.



Señal de tiempo de la segunda caracterización

Angulo α

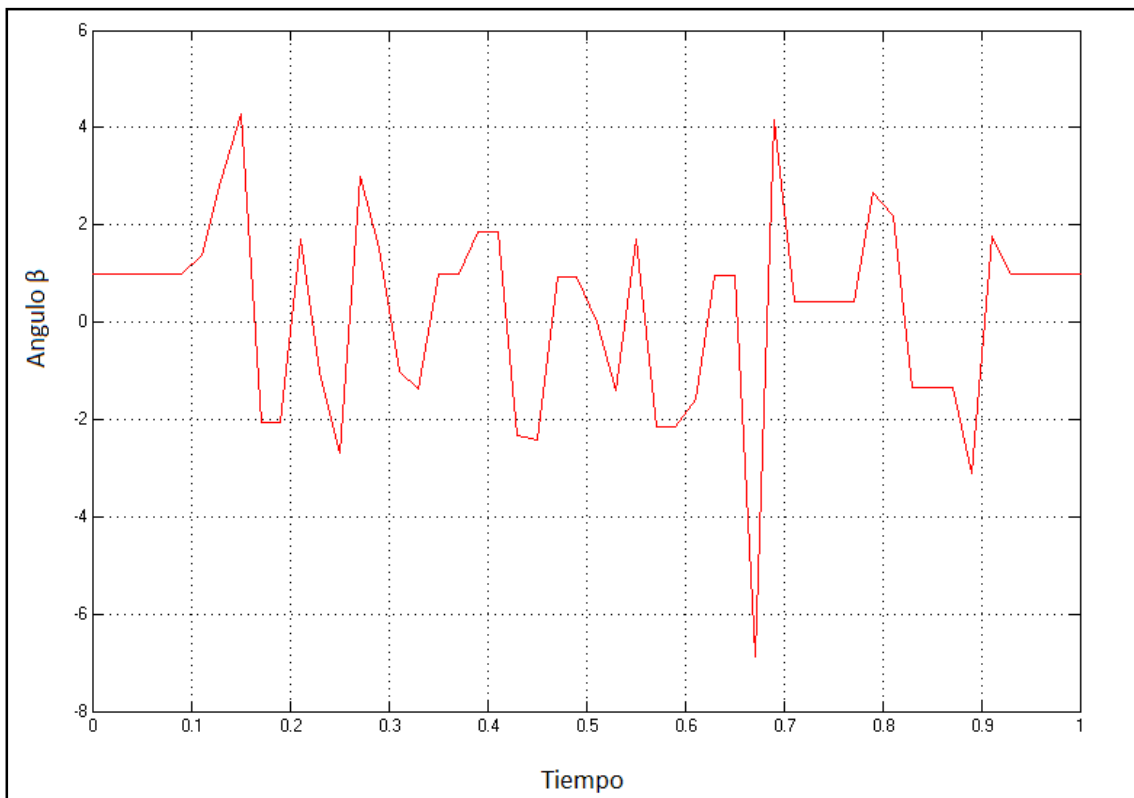
En esta grafica se muestra la variación del ángulo de orientación con respecto al Sur del coche solar en su trayecto por los 42 tramos realizados en la discretización del circuito. Se puede observar como el ángulo inicial y el ángulo final es el mismo ya que la simulación se corresponde con una vuelta al circuito, por lo que el coche termina en el mismo tramo en el que comienza.



Variación de ángulo α de la segunda caracterización

Angulo β

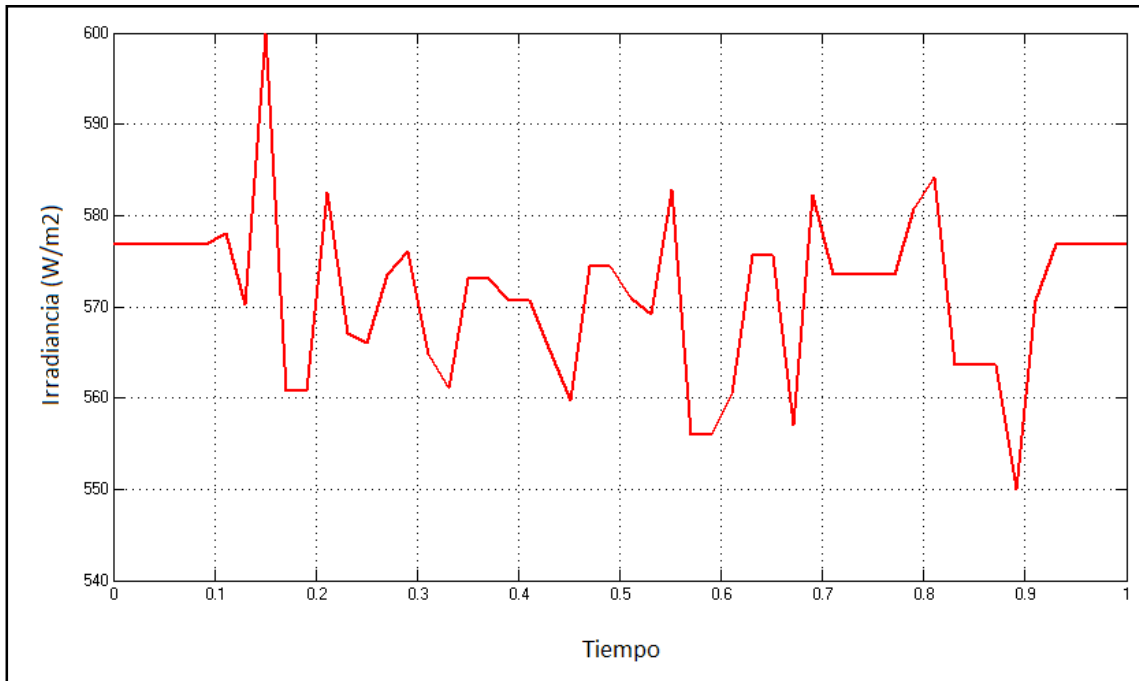
En esta grafica se muestra como va variando con el trayecto del circuito el ángulo de inclinación del panel solar con respecto a la horizontal. Se puede observar el mismo comportamiento que en la grafica anterior, es decir, el mismo ángulo de inclinación tanto en el inicio como en el final de la simulación.



Variación de ángulo β de la segunda caracterización

Irradiancia

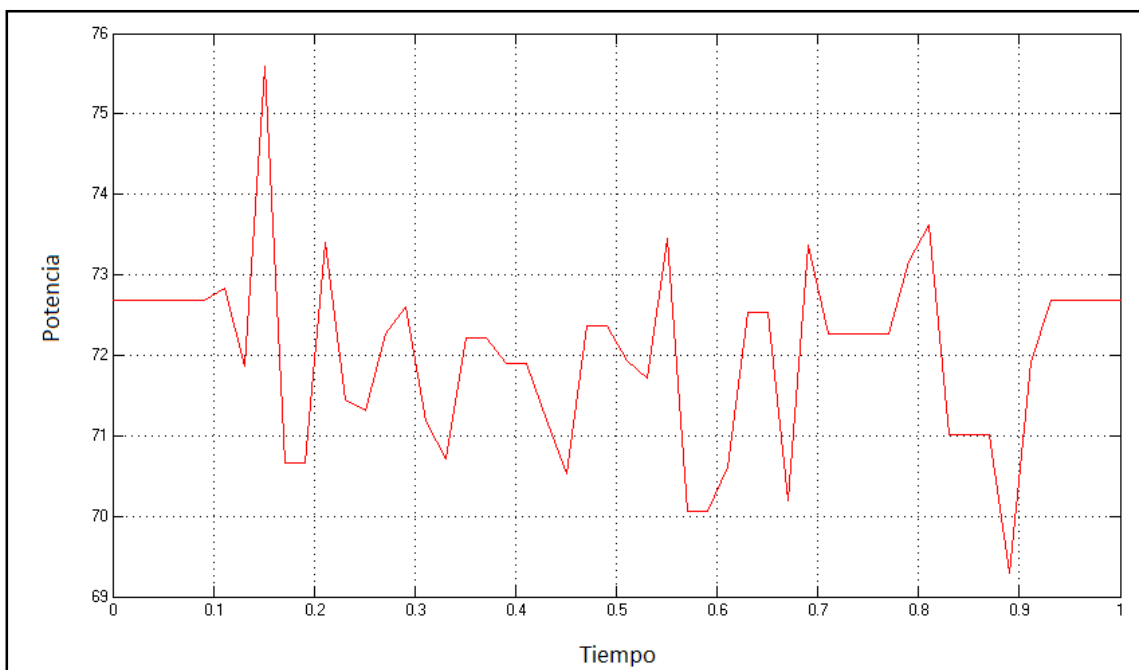
Esta grafica proporciona la variación de la irradiancia incidente en el plano del panel solar. Esta variación es debida al movimiento del coche y las variaciones de los ángulos antes mostrados. Se obtiene de la aplicación del modelo de radiación solar para cada dato pareja de datos angulares de cada tramo.



Variación de la irradiancia solar en la segunda caracterización

Potencia

Con la irradiancia variable en el tiempo y utilizando el modelo de panel solar, se obtendrá una intensidad variable que irá acompañada de una tensión constante en bornes del panel solar. El producto de estas dos magnitudes será la potencia generada por el panel solar. Esta potencia variable es la mostrada en la imagen, y será sobre la que se aplicara la integral para finalmente obtener la energía generada completa.



Variación de la potencia generada en la segunda caracterización

9.3. Conclusiones

Una vez realizadas las dos discretizaciones se deben de comparar para observar el error existente entre ellas, y si es necesario realizar más discretizaciones hasta conseguir un error menor.

Primeramente obtendremos el error de cada discretización con respecto a los datos de energía generada obtenidos experimentalmente de una vuelta del coche solar por el circuito de Cartagena.

La energía generada obtenida de datos experimentales es de un total de 21 Wh.

Para comprobar el error existente entre los datos reales y los datos del modelo se aplicara la siguiente fórmula:

$$Error (\%) = \frac{E_{real} - E_{modelo}}{E_{real}} * 100$$

Los datos extraídos de la primera caracterización arrojan un valor de energía de 21,04 Wh, el error correspondiente a esta cantidad es:

$$Error(\%) = \frac{21 - 21,04}{21} * 100 = 0,19 \%$$

Se puede observar un error muy pequeño con respecto al valor obtenido experimentalmente. Aun así tampoco es fiable completamente porque no se conocen las condiciones exactas del valor obtenido experimentalmente y además hay muchos factores que influyen en la energía generada. Pero la idea de que el modelo nos dé una estimación bastante aproximada se está consiguiendo.

En la segunda caracterización el valor de energía es de 20,74 Wh, el error con respecto al valor experimental es:

$$Error(\%) = \frac{21 - 20,74}{21} * 100 = 1,24 \%$$

El error existente entre las dos caracterizaciones se conseguirá a partir de la misma fórmula tomando el valor mayor de las dos discretizaciones como energía real para que salga un error positivo, aunque el signo no importa sino el valor absoluto del error existente.

$$Error(\%) = \frac{21,04 - 20,74}{21,04} * 100 = 1,43 \%$$

Se puede observar como el error es muy pequeño entre las dos caracterizaciones, este dato nos informa de que tampoco es muy relevante dividir en mayor o menor número de tramos el circuito, porque la variación es mínima. Debido a este pequeño error se descarta el realizar una tercera caracterización, y se da como valido el modelo debido al pequeño error existente con los datos reales obtenidos experimentalmente en el circuito.

Mejoras y futuros estudios

10. Mejoras y futuros estudios

El modelo realizado es una buena herramienta para la estimación de energía generada de cualquier vehículo solar fotovoltaico en cualquier circuito que se pueda obtener los datos necesarios, y para cualquier día del año y hora del día.

Se podrían realizar mejoras al modelo que aunque no se desarrollaran en este proyecto podrían ser bastante útiles en un futuro.

Una posible mejora pasa por acoplar este modelo al modelo existente con el motor del coche solar, para ello se debe intentar crear una fuente controlada que dependiera del valor de intensidad generado por el modelo creado en este documento, y de esta manera tendríamos la fuente que da energía el convertidor que alimenta al motor del coche.

Otra mejora pasa por estudiar la variación de la inclinación del panel solar incluido en el techo del coche solar. Esta mejora ha sido valorada en este proyecto obteniendo un resultado con pocas ventajas sobre la no inclinación del panel, es decir, se ha probado en el modelo por encima, la posibilidad de aumentar los ángulos de inclinación, pero la diferencia de energía obtenida no es muy significativa debido al poco tiempo de exposición a la radiación solar.

También se podría crear un bloque en el modelo para el seguimiento del MPPT, para ello hay que obtener siempre la potencia máxima que podemos obtener en las condiciones de cada momento, habrá que crear un bloque que iguale la derivada de la potencia con respecto a la tensión a cero, para buscar el máximo y poner esa tensión obtenida como tensión del panel solar, de esta manera la tensión ira variando para siempre obtener el punto de máxima potencia con la radiación y temperatura de cada momento.

Las mejoras a estudiar en el futuro para la optimización del coche solar seria la inclusión de supercondensadores en sustitución de baterías, ya que hoy en día la tecnología está muy avanzada y se consiguen grandes capacidades con mucho menos peso, haciendo posible quitar peso al vehículo obteniendo mayor posibilidad de velocidad en el vehículo.

Los supercondensadores son dispositivos electroquímicos capaces de sustentar una densidad de energía inusualmente alta en comparación con los condensadores normales, presentando una capacitancia miles de veces mayor que la de los condensadores electrolíticos de alta capacidad.

Conclusiones

11. Conclusiones

Como conclusión de este proyecto se indicara el éxito obtenido en cada una de las partes que se compone este proyecto.

Con respecto a la simulación del panel solar, se ha conseguido el resultado esperado obteniendo de forma satisfactoria las curvas características correspondientes a los paneles solares instalados. Incluso se ha podido reproducir con éxito las variaciones que se producen a diferentes irradiancias solares y temperaturas, aunque con estas últimas se ha comprobado su poca influencia.

Con respecto a la modelización de la radiación solar, se ha conseguido un modelo en el que se puede indicar el día y la hora del año, así como la situación del lugar en el que se quiere realizar la prueba del modelo. El modelo podría ser utilizado para un sistema fotovoltaico fijo, ya que podemos simular el comportamiento con ángulos de inclinación y orientación fijos. Con todos estos resultados positivos se podría decir que esta parte ha sido la parte más fielmente recreada y que no presenta casi ningún margen de mejora, ya que modeliza prácticamente todas las formulas necesarias para el cálculo de la radiación solar.

Con respecto al modelo de un circuito también se han conseguido los objetivos, que era conseguir representar la variación de ángulos influyentes en la radiación solar durante el paso del vehículo solar por el circuito, lo único negativo de este modelo es la necesidad de realizar el estudio de cada circuito cuando se tenga que hacer otra simulación en otro circuito distinto al circuito de velocidad de Cartagena, teniendo que realizar los tramos, que crear las tablas de datos y las matrices de datos correspondientes en el modelo. A pesar de esto, en este apartado se ha dado una guía con los pasos a realizar para la correcta creación por lo que aunque se tenga que realizar con cada circuito, la forma de hacerlo ha quedado perfectamente explicada.

En la simulación del circuito de velocidad de Cartagena también se han obtenido resultados que arrojan sensaciones positivas con el modelo, obteniendo valores de energía muy parecidos a los reales obtenidos experimentalmente con el vehículo en el circuito. Por tanto se considera que la realización del modelo del circuito particularizado para el circuito de Cartagena ha sido un éxito, y además la forma de obtener la energía generada se ha realizado de forma correcta mediante las formulas físicas básicas para la obtención de la energía.

A nivel personal la experiencia ha sido muy positiva, adquiriendo muchos conocimientos en relación a la energía solar fotovoltaico, una energía que tiene mucho interés para mí, en general, las energías renovables son una materia en la que se puede avanzar mucho y que posiblemente sea una rama muy importante en la industria y la energía del futuro.

También me ha dado la posibilidad de introducirme en el software de simulación de Matlab, una herramienta muy potente para todo tipo de aplicaciones, de la que desconocía totalmente sus usos y con la que no había tenido contacto anteriormente. Su aprendizaje no ha sido tarea fácil pero para la aplicación que se ha desarrollado ha sido suficiente con indicaciones del director del proyecto y pequeños tutoriales de internet.

En definitiva, la realización de este proyecto ha sido una grata experiencia, así como la realización de la beca de formación en el departamento de ingeniería eléctrica, sobre todo, siendo la electricidad la especialidad de mis estudios y un gran interés para mí.

Bibliografía

12. Bibliografía

- <http://www.solarweb.net/forosolar/fotovoltaica-sistemas-aislados-la-red/731-mppt.html>
- http://books.google.es/books?id=C1YKKKpKLi0C&pg=PA143&lpq=PA143&dq=factor+d+e+idealidad+del+diodo&source=bl&ots=81XeZKQDAY&sig=5aK2Q0IkIVhGyF35CCloaUsNdXI&hl=es&sa=X&ei=D9I5T4D_CYew0QWxhqWbDQ&ved=0CDkQ6AEwAw#v=onepage&q=factor%20de%20idealidad%20del%20diodo&f=false
- http://www.infoab.uclm.es/labelec/solar/solar_fotovoltaica/calculo_conectados2.htm
- <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar08/HTML/articulo03.htm>
- http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/02_radiacion/02_intermedio/ej_cal_radiacion.htm
- <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>
- *Sistemas fotovoltaicos de Miguel Alonso Abella*
- www.murciasolarrace.com
- www.circuitocartagena.com
- www.wikipedia.es

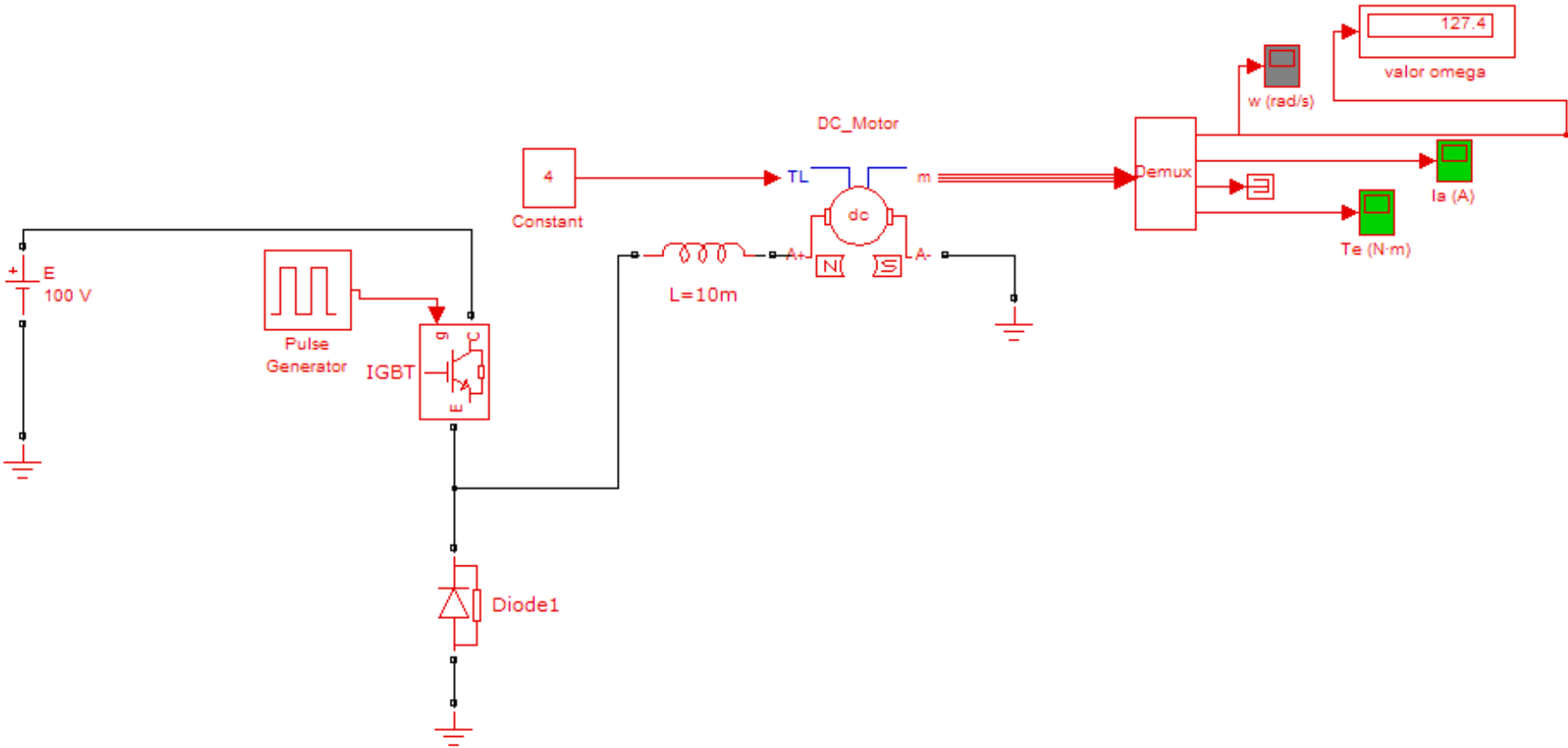


Anexo

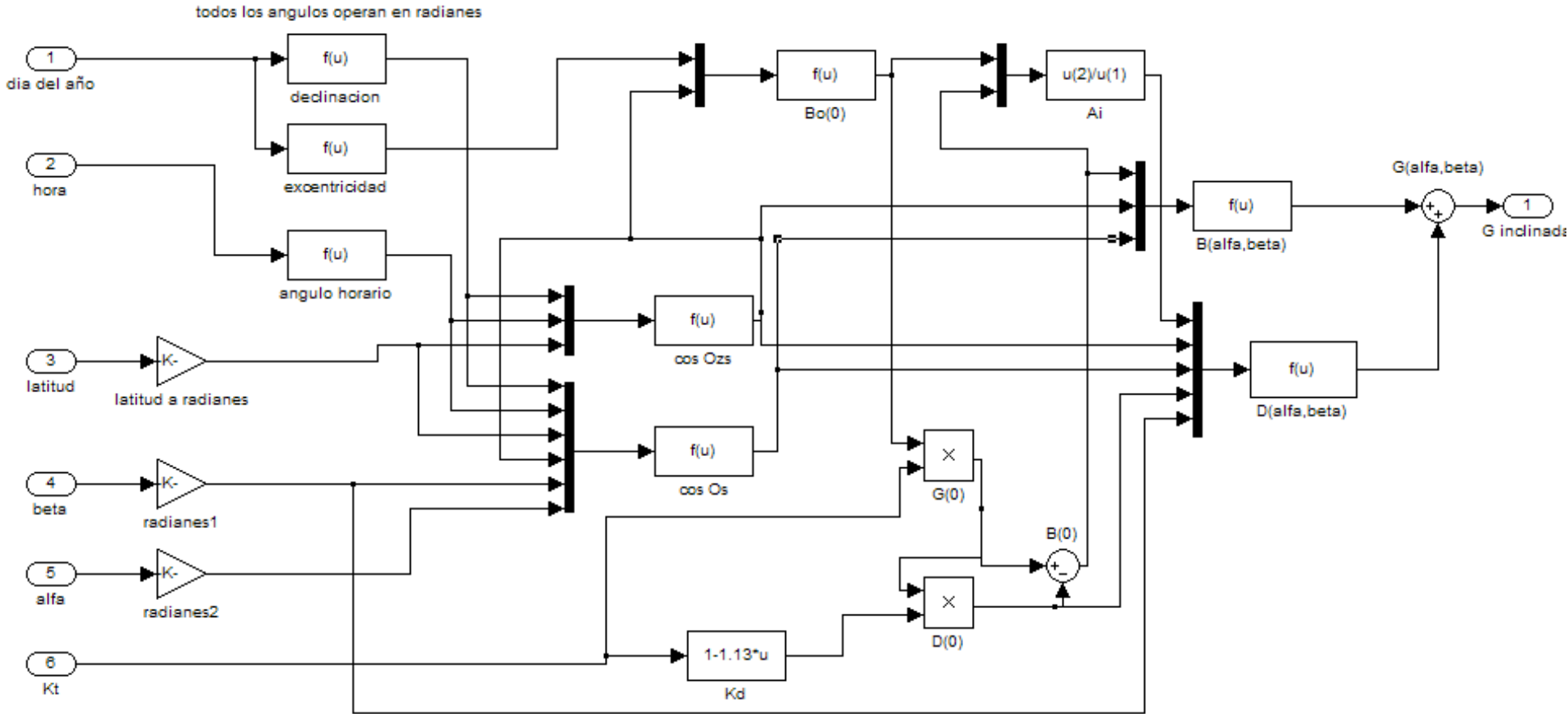
Anexo

En este anexo simplemente se volverán a reproducir las imágenes que no se han podido reproducir con total detalle en todo el texto debido a su mayor tamaño. Se corresponden con el modelo existente de vehículo solar, el subsistema correspondiente a la radiación solar, y los dos modelos completos del circuito de velocidad de Cartagena.

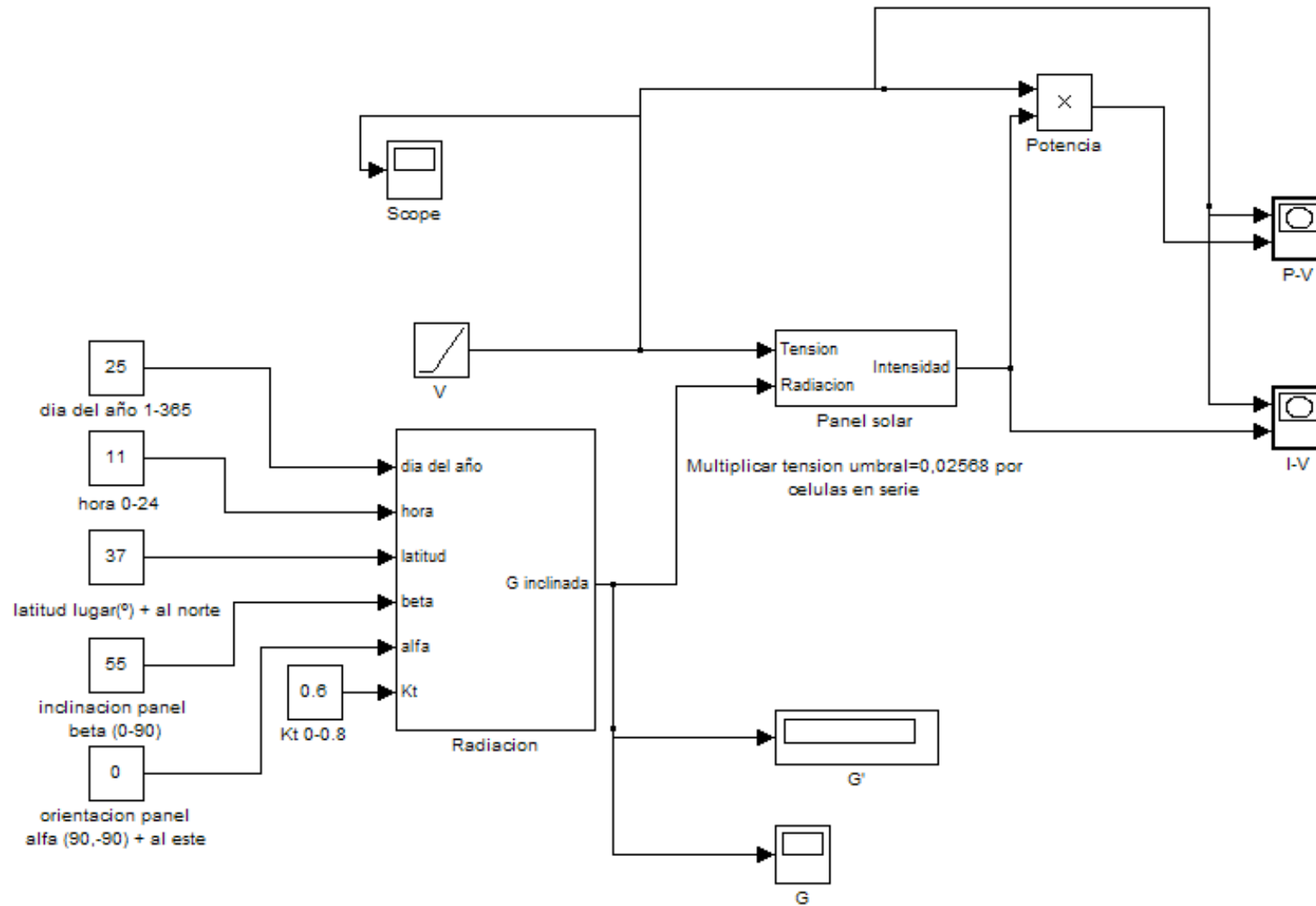
Modelo existente de simulación de vehículo solar



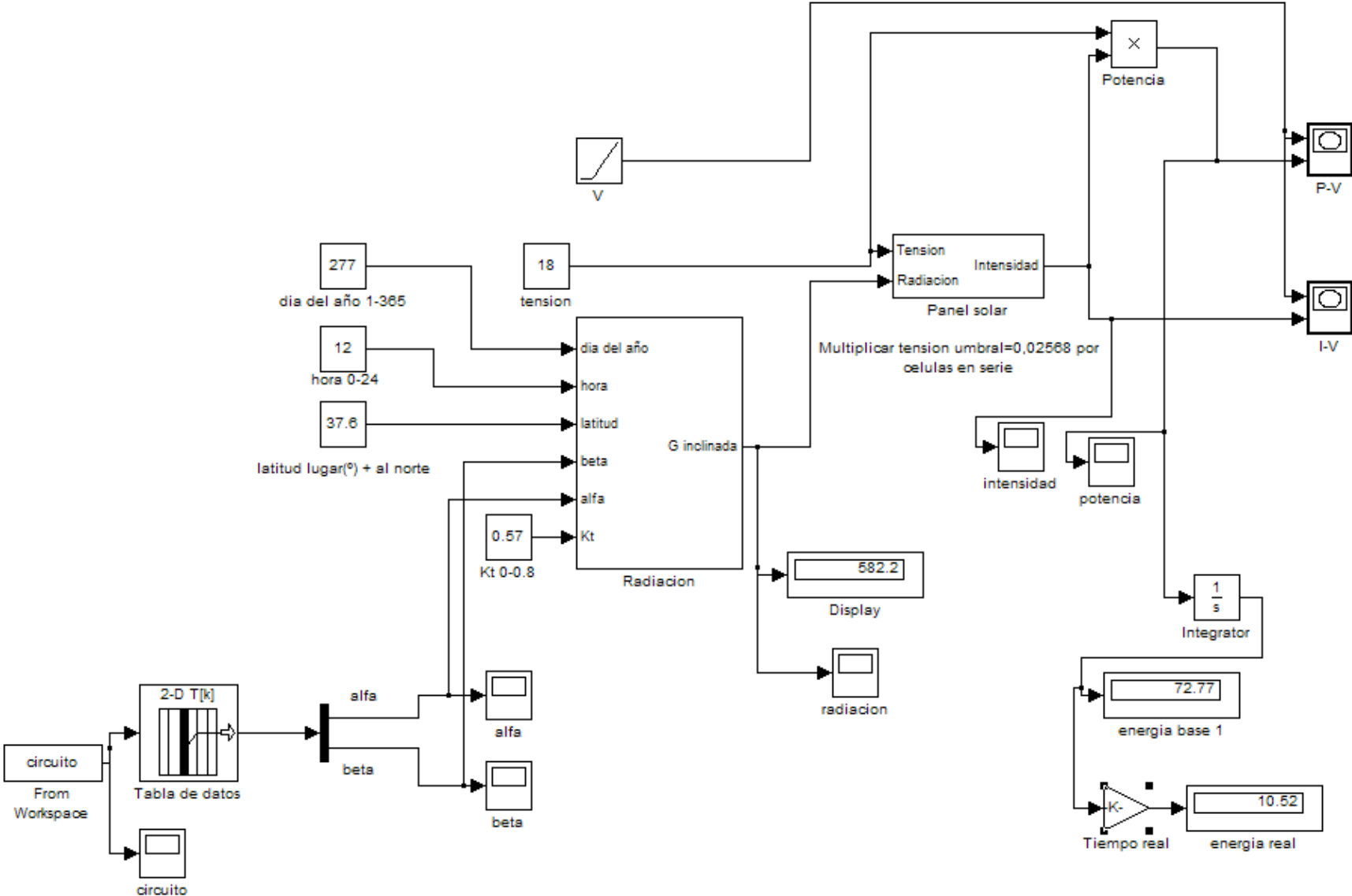
Subsistema de radiación solar



Modelo de radiación solar junto con panel solar



Primera caracterización del circuito de velocidad de Cartagena



Segunda caracterización del circuito de velocidad de Cartagena

