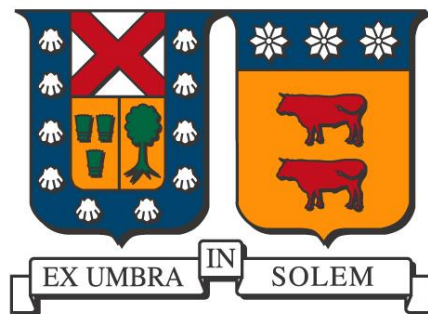


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



**“MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE LA
GANANCIA TÉRMICA POR RADIACIÓN
SOLAR SOBRE ESTANQUES DE
TRANSPORTE QUE SE DESPLAZAN SOBRE
UNA RUTA”**

RICARDO ALBERTO VELÁSQUEZ DIAZ

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO MENCIÓN ENERGÍA**

PROFESOR GUÍA: Ph.D. CARLOS ROSALES HUERTA
PROFESOR CORREFERENTE: Ph.D. ALEX FLORES MARADIAGA

JUNIO – 2020

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia. Su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años ha sido fundamental en todos mis logros. En especial a mi mamá, pues fue ella quien me enseñó el abecedario y a leer, y era quien debía resignarse a que un paseo de 10 minutos se convirtiera en uno de media hora para que yo pudiera leer cada letrero que veía. Su increíble labor de madre es la razón por la cual he llegado hasta donde estoy.

A mis amigos, tanto de la enseñanza media como de la universidad. Sus risas y amistad sincera me han hecho disfrutar cada momento de mi etapa educativa. Convirtieron cada proyecto en algo divertido en lo que trabajar y cada experimento fallido en una anécdota que jamás olvidaré. Ninguna amistad es un accidente, y aprecio sinceramente a cada persona con la cual reí y que tuvo el valor de tenderme la mano cuando pasé por un momento difícil.

También quiero agradecer a los profesores que me formaron a través de los años. En especial a mi profesor guía Carlos Rosales; el desarrollo de este trabajo no fue fácil pero su mentoría y retroalimentación fueron indispensables para culminar este proyecto.

Resumen

En el presente trabajo se expone el desarrollo e implementación de un código computacional que calcule la radiación incidente sobre la superficie de un vehículo en movimiento que transite por una determinada ruta, en este caso, la cisterna de un camión.

Para esto, se calculó la irradiancia extraterrestre basándose en parámetros geométricos de la locación. Posteriormente, la atenuación causada por la atmósfera fue simulada con modelos de clima sintético basados en índices de claridad. Este esquema teórico fue traspasado al código computacional, en donde se ejecutó con la ayuda de una base de datos en formato Excel, que contendrá información geográfica y solarimétrica de los puntos de la ruta previamente discretizada.

Un caso modelo fue estudiado considerando una ruta de 1471 [km] que une las ciudades de Valparaíso y Calama, la cual fue discretizada en 13434 puntos con una separación de 109 [m] en promedio. Se simularon distintos escenarios en donde se variaron los parámetros de velocidad, hora de salida y fecha de salida, obteniendo resultados que representan de manera fidedigna el comportamiento de la radiación a lo largo del viaje. La observación principal de estas simulaciones fue la posible disminución de la radiación incidente en un 99% solo al cambiar la hora de salida del camión.

Un último análisis fue efectuado con mediciones numéricas realizadas con un piranómetro durante un viaje en automóvil para distintas rutas. En este escenario, el programa produjo valores que eran mayores que los valores medidos, obteniendo errores que varían desde los 74 hasta los 994 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$. Esto representa un desajuste considerable para la irradiancia instantánea, pero no implica necesariamente desajustes para la radiación en periodos más largos. Por lo que, en caso de existir desarrollos futuros del programa, es necesario estudiar más detalladamente la precisión numérica del código.

Palabras Clave: radiación solar, índice de claridad, clima sintético.

Abstract

This work aims to show the development and implementation of a computational code which calculates the incident radiation over a moving vehicle's surface on a certain route, in this case, the tank of a truck.

To do so, extraterrestrial irradiance was calculated based on geometric parameters of the location. Subsequently, the attenuation caused by the atmosphere was simulated with synthetic weather models based on clearness indexes. This theoretical scheme was passed to computational code, which was run together with an Excel database, containing geographic and solarimetric information of all the points on the previously discretized route.

A model case was analyzed using a 1471[km] route that joins the cities of Valparaíso and Calama, which was discretized in 13434 points, with an average separation of 109[m]. Different scenarios were simulated by changing the parameters of velocity, departure time and departure date, obtaining results that faithfully represented the radiation behavior along the journey. The main observation of these simulations was the possible 99% reduction of incident radiation just by changing the departure time.

One last analysis was done using numerical measurements carried out by a pyranometer during a car journey over different routes. In this scenario, the program produced results that were greater than the measured values, obtaining errors ranging from 74 to $994 \left[\frac{W}{m^2} \right]$. This represents a considerable mismatch for the instantaneous irradiance but does not necessarily imply long-term radiation mismatch. Therefore, if there is any future development of this program it is necessary to study in more detail the numerical precision of the code.

Keywords: solar radiation, clearness index, synthetic weather.

Índice

Agradecimientos	i
Resumen.....	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Glosario.....	viii
Introducción	1
Objetivos	3
Capítulo 1 Problemática a Resolver.....	4
Capítulo 2 Información General del LNG	6
2.1. Características del LNG	6
2.2. Estudios realizados sobre el transporte de LNG	7
2.3. Normativa de almacenamiento para el transporte de LNG	8
Capítulo 3 Fundamento Teórico	11
3.1. Radiación Solar Extraterrestre.	11
3.2. Efectos de la posición terrestre sobre la radiación incidente	13
3.3. Atenuación Atmosférica.	19
3.3.1. Absorción.....	19
3.3.2. Dispersión.	20
3.4. Generación de Clima Sintético	21
3.4.1. Modelo estándar.....	22
3.4.2. Modelo para zonas cercanas a los trópicos.	26
3.5. Cálculo de Radiación diaria y horaria.....	29
3.5.1. Radiación diaria.	30
3.5.2. Radiación horaria	31
3.6. Radiación sobre superficies inclinadas	32
Capítulo 4 Construcción del programa	35
4.1. Discretización de la ruta.....	35
4.2. Base de datos.....	40
4.3. Definición de parámetros de entrada y salida	44
4.4. Estructura general del algoritmo.	46

4.4.1.	Velocidad constante.....	49
4.4.2.	Velocidad variable.....	54
4.4.3.	Itinerario de viaje.....	56
4.4.4.	Criterios adicionales de funcionamiento.....	59
Capítulo 5	Estudio del caso base.....	62
5.1.	Caso base de velocidad constante.....	65
5.2.	Caso de velocidad variable.....	73
5.2.1.	Rango de velocidades a partir de un valor promedio.....	73
5.2.2.	Itinerario de viaje.....	79
5.3.	Modelo mejorado de distribución de índices de claridad.....	82
5.4.	Simulaciones de optimización.....	85
Capítulo 6	Análisis cuantitativo y restricciones del modelo.....	90
6.1.	Estudio del caso “Ergón”.....	90
6.2.	Limitaciones del modelo actual y recomendaciones.....	94
Conclusiones.....		95
Bibliografía.....		97
Anexos.....		99

Índice de figuras

Figura 0-1:	Cisterna de un camión de transporte de combustible.....	2
Figura 2-1:	Efecto de la transmitancia y la temperatura ambiente en las pérdidas evaporativas de LNG.....	8
Figura 3-1:	Relaciones métricas entre el Sol y la Tierra.....	11
Figura 3-2:	Comparación de la constante solar para radiómetros en diferentes plataformas espaciales medidas desde Noviembre de 1978.....	12
Figura 3-3:	Variación de la declinación de la Tierra a lo largo del año.....	15
Figura 3-4:	Representación de la declinación, latitud y ángulo horario para un punto P arbitrario.....	16
Figura 3-5:	Ángulo de inclinación y azimutal de la superficie analizada.....	18
Figura 3-6:	Distribución del espectro solar terrestre a nivel del mar.....	20
Figura 3-7:	Dispersión de Rayleigh y Mie.....	21
Figura 3-8:	Ilustración de función de densidad de probabilidad para K_t	24

Figura 3-9: Obtención de los K_t para una secuencia de un mes de 5 días.....	25
Figura 3-10: Comparación de modelos de generación de clima sintético. Modelo estándar (Bendt) y modelo de trópicos (Saunier).....	28
Figura 3-11: Correlación ente fracción de radiación diaria difusa y K_t	31
Figura 4-1: Ruta Valparaíso-Calama a analizar	35
Figura 4-2: Procedimiento para generar datos de la ruta en formato legible	36
Figura 4-3: Ruta discretizada	37
Figura 4-4: Sistema de medición de la orientación. Dirección roja positiva y dirección azul negativa.....	39
Figura 4-5: Esquemmatización del cálculo de la orientación del vehículo para un punto i.....	40
Figura 4-6: Vista principal del Explorador Solar	42
Figura 4-7: Interpolación de la radiación.....	43
Figura 4-8: Esquemmatización del programa	45
Figura 4-9: Geometrías basales.....	46
Figura 4-10: Detalles de ángulos para la geometría de 8 caras.....	47
Figura 4-11: Diagrama de flujo del algoritmo funcionando a velocidad constante	53
Figura 4-12: Diagrama de flujo del algoritmo funcionando a velocidad variable	55
Figura 4-13: Diagrama de flujo del algoritmo funcionando como itinerario de viaje	58
Figura 5-1: Mapa de parte de la ruta discretizada	68
Figura 5-2: Mapa de parte costera de la ruta discretizada.....	72
Figura 5-3: Mapa de zona con alto nivel de radiación de la ruta	76
Figura 6-1: Ruta recorrida por el vehículo Ergón	91

Índice de tablas

Tabla 2-1: Características físico-químicas del LNG.....	6
Tabla 3-1: Días promedio para cada mes.....	23
Tabla 3-2: Secuencia de días para los índices de claridad diarios.	26
Tabla 4-1: Número de estaciones usadas en la validación, promedio del sesgo y error cuadrático medio de las medidas tomadas.....	41
Tabla 5-1: Dimensiones de la cisterna a evaluar.....	64

Índice de gráficos

Gráfico 4-1: Rango de validez para el cálculo de Kt	59
Gráfico 4-2: Modificación del rango de valores para Kt, max	60
Gráfico 5-1: Energía acumulada sobre el camión durante el viaje	65
Gráfico 5-2: Energía instantánea sobre el camión clasificada según el tipo de radiación	66
Gráfico 5-3: Distribución de la irradiación por cada cara del estanque	69
Gráfico 5-4: Evolución del índice de claridad en el trayecto.....	71
Gráfico 5-5: Energía acumulada sobre la cisterna	74
Gráfico 5-6: Energía instantánea sobre el camión clasificada según el tipo de radiación	75
Gráfico 5-7: Distribución de la irradiación por cada cara del estanque	77
Gráfico 5-8: Distribución de velocidades en la ruta.....	78
Gráfico 5-9: Energía acumulada sobre la cisterna durante el viaje.....	79
Gráfico 5-10: Irradiación por caras.....	80
Gráfico 5-11: Energía instantánea para periodos de 5 minutos sobre la cisterna	81
Gráfico 5-12: Distribución de velocidades a lo largo de la ruta	82
Gráfico 5-13: Frecuencia absoluta y acumulada para modelo de trópicos	83
Gráfico 5-14: Comparación ente ambos modelos para $Kt = 0.4$	83
Gráfico 5-15: Comparación entre ambos modelos para el cálculo de la energía instantánea. 84	
Gráfico 5-16: Comparación de los índices de claridad de ambos modelos	85
Gráfico 5-17: Comparación de la ganancia térmica en función de la refinación de la malla . 86	
Gráfico 5-18: Comparación de la ganancia térmica en función de la velocidad del camión .. 87	
Gráfico 5-19: Dependencia horaria de la ganancia térmica en función de la hora de salida .. 88	
Gráfico 5-20: Dependencia estacional de la radiación incidente sobre el estanque.....	89
Gráfico 6-1: valores medidos y simulados de radiación instantánea	92
Gráfico 6-2: RMSE para modelos de clima sintético.....	93

Glosario

Clima sintético: simulación del clima de una locación, basado en su datación histórica de fenómenos como radiación, nubosidad, humedad, entre otros; y al análisis estadístico de esta.

Estado criogénico: que se encuentra o produce a bajas temperaturas.

Fotosfera: capa luminosa y más interna de la envoltura gaseosa del Sol

Ignición: proceso que inicia o desencadena una combustión

Índice de claridad: parámetro que mide la transparencia de la atmósfera. Se calcula como el cociente entre la radiación incidente sobre la superficie terrestre y la radiación extraterrestre en el mismo punto.

Irradiancia: magnitud utilizada para describir la potencia radiativa incidente por unidad de superficie.

Irradiancia global horizontal (GHI): es la potencia radiativa neta por unidad de área que incide sobre una superficie que se encuentra de forma horizontal respecto al suelo.

Piranómetro: instrumento que mide la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra.

Radiación circunsolar: radiación dispersada por la atmósfera, de manera que parece provenir de la región del cielo adyacente al Sol.

Radiación solar extraterrestre: radiación proveniente del Sol medida fuera de la atmósfera, en donde todavía no ha sido atenuada.

Registro Solarimétrico: base de datos conformada por la recopilación de información sobre la radiación solar de una zona, tanto directa como difusa.

Volatilizado: que se encuentra en estado gaseoso.

Introducción

Las largas distancias que se deben recorrer en la actualidad para el transporte terrestre de combustibles, hacen que sea necesario tomar ciertas medidas de seguridad. Dentro de estas, se debe tener especial consideración con el combustible que contengan los tanques de estos vehículos, pues debido a su naturaleza, pueden ocurrir percances bajo determinadas circunstancias. El peligro potencial del contenido transportado hace que el diseño de las cisternas de estos camiones considere normas rigurosas que garanticen la seguridad del transporte, ya que cualquier incremento de presión dentro del tanque puede dañar su interior o en el peor de los casos, causar la ignición del contenido.

En este contexto, una de las principales preocupaciones que se tienen en la actualidad es el incremento de presión en el tanque (*build-up pressure*) ocasionado por las alzas de temperatura que calientan el contenido dentro de la cisterna. El factor causante de tales alzas es mayoritariamente la radiación proveniente del Sol, pues el vehículo se encontrará durante todo el trayecto en presencia de este fenómeno, el cual, durante el día y en ausencia de nubes, puede ser realmente perjudicial para el transporte íntegro del combustible.

Analizando el caso de Chile, se observa que es una de las zonas con mayor grado de radiación a nivel mundial. En particular la ciudad de Calama y sus alrededores, en donde se encuentran los registros de incidencia solar más altos del país, lo que se debe principalmente a las condiciones geográficas y climáticas de la zona, pues es una región relativamente cercana al Ecuador y con niveles de nubosidad y contaminación atmosférica bastante bajos. Esto produce que la atenuación ocasionada por la capa de aire de la Tierra sea bastante baja, permitiendo el ingreso de gran parte de la radiación proveniente del Sol a la superficie terrestre. Solo a modo de ejemplo, el índice de claridad promedio del Norte de Chile es equivalente al máximo global que se posee a nivel mundial, lo cual es un indicador de la magnitud del fenómeno en esta zona.

Lo anterior genera que actividades como el suministro de combustible para los equipos usados en la industria minera ubicada en el norte de Chile presenten problemas, en particular para poder entregar la totalidad de la carga en el lugar de destino, a causa de que parte del

combustible puede verse obligado a ser evaporado para reducir la presión dentro del estanque, de manera de disminuir riesgos en la seguridad de la carga transportada. Por lo tanto, para estos escenarios, hay un gran interés en conocer la cantidad de radiación que llega a un vehículo en movimiento, pues permite definir cuál es la carga segura a entregar o los tiempos óptimos de viaje del transporte.

Es por ello que en el presente trabajo se presenta el desarrollo de un programa computacional capaz de estimar la ganancia térmica de la cisterna de un camión en un trayecto estándar de viaje, el cual podrá ser modificado a libertad del usuario. Junto a este programa, se realiza un análisis de los parámetros que influyen en la incidencia radiativa sobre el camión. Para que de esta forma se tenga conocimiento de las medidas a tomar para optimizar el transporte de combustible.



Figura 0-1: Cisterna de un camión de transporte de combustible

Objetivos

Objetivo General

Se tiene como objetivo general el desarrollo de un programa que calcule la radiación incidente sobre la cisterna de un vehículo de transporte de combustible a lo largo de una ruta entre la zona central y la zona norte de Chile. Con la finalidad de poseer información útil respecto a las variables que afectan la ganancia térmica del tanque.

Objetivos Específicos

- Revisión y estudio del estado del arte acerca de la ganancia calórica de los tanques que almacenan combustible en estado criogénico, en los distintos medios de transporte utilizados para esta función.
- Estudiar la caracterización y cuantificación de la radiación solar incidente, índice de claridad, las bases de datos y archivos solarimétricos para radiación en Chile.
- Establecer un esquema de cálculo de radiación en función de la posición a lo largo de una ruta característica, en base a datos solarimétricos y modelos de clima sintético.
- Generar un modelo computacional capaz de estimar la radiación incidente sobre una superficie móvil, para cualquier velocidad de transporte y cualquier fecha del año.
- Realizar simulaciones con el programa para algunos escenarios, y estudiar el comportamiento y los parámetros relevantes para la ganancia térmica del estanque.
- Analizar las limitaciones del modelo y posibles desarrollos a futuro para una versión más refinada del mismo.

Capítulo 1

Problemática a Resolver

Un porcentaje considerable de la minería chilena se encuentra ubicada en el norte del país, y como ya se dejó entrever, esta zona recibe uno de los mayores valores de radiación solar a nivel global, debido a sus características únicas de composición atmosférica y ubicación geográfica. Gran parte de los equipos con los cuales operan estas compañías utilizan motores de combustión interna que necesitan hidrocarburos combustibles para funcionar. Dentro de los principales tipos de combustibles usados para el funcionamiento de los equipos, se encuentran el petróleo y el LNG (gas natural licuado). Este último se transporta en estado criogénico a causa de su bajo punto de ebullición. La condición anterior provoca que el diseño de los tanques de almacenamiento considere una alta capacidad aislante, para reducir lo más posible la transferencia de calor hacia el combustible, minimizando las pérdidas por evaporación. Pero, sin importar que tan bueno sea el diseño de la cisterna, si las condiciones del ambiente generan climas demasiado cálidos, es prácticamente imposible evitar que parte del contenido del estanque se deba evaporar para aliviar la presión interna.

En la zona comprendida por la ciudad de Calama y sus alrededores se encuentran algunos de los principales yacimientos mineros del país, como por ejemplo Chuquicamata, que se encuentra a 15 [km] al norte de Calama. Este sector se caracteriza por tener uno de los mayores niveles de radiación a nivel global, incidiendo sobre su superficie cerca de $2500 \left[\frac{kWh}{m^2 \cdot año} \right]$. Tal situación es contraproducente para conservar la totalidad de la carga de combustible durante su transporte.

Es evidente que las condiciones del clima no se pueden controlar, por lo que hay que tomar otras medidas para disminuir la pérdida de combustible al mínimo posible, resguardando la integridad mecánica de la cisterna. Una de las opciones es que el llenado del estanque no debe ser completo, pues generaría graves conflictos el hecho de que no haya espacio suficiente para el producto evaporado dentro del tanque. Para ello existen límites máximos establecidos por

norma que determinan el porcentaje máximo de la cisterna que se puede rellenar con combustible. Sin embargo, cuando la presión interna es demasiada, a pesar del grado de llenado de la cisterna, es necesario despresurizar la zona, por lo cual lo más usual es la instalación de válvulas de descarga que emitan hacia el exterior parte del combustible volatilizado reduciendo la presión en el tanque.

La solución anterior es poco eficiente, pues genera pérdidas de la carga transportada que pueden llegar a tomar valores considerables. Entonces, ¿qué otra alternativa existe para minimizar las pérdidas durante el transporte de LNG? Como ya se mencionó, es imposible manipular las condiciones del clima a macro escalas, pero si se puede encontrar el momento en el cual la radiación sea mínima, y por ende se puede controlar la velocidad del vehículo para que este pase por ciertas zonas en los momentos de mínima radiación, optimizando así el transporte de combustibles. Se dispone de información altamente detallada sobre mediciones de radiación en todo el país, pero existe un gran inconveniente, estos vehículos recorren distancias de cientos y hasta miles de kilómetros, por lo cual hay que conocer los niveles de radiación de miles de puntos para poder calcular la ganancia térmica total del tanque. De lo anterior se extrae que el problema no es la información, pues esta está disponible. El obstáculo es utilizarla para objetos móviles, pues se necesita estudiar una gran cantidad de locaciones, lo cual representa un esfuerzo de tiempo considerable para la industria.

En la actualidad, no se dispone de ningún software comercial o algún método que pueda ejecutar esta función de forma rápida y eficaz. La cual es una necesidad que va más allá de la industria minera, ya que se puede aplicar a cualquier situación en donde se desee conocer la radiación incidente de un objeto que se mueva en una ruta predeterminada, ya sea para maximizar o minimizar la ganancia térmica del objeto. Una ejecución más rápida de la tarea permitiría poder generar más simulaciones, para entender de mejor manera como optimizar el viaje del vehículo.

Para el caso de la industria minera en particular, la posibilidad de un cálculo rápido de la ganancia térmica de una cisterna móvil, permitiría poder medir el tiempo de conducción en donde se alcanza el límite de presión en el cual se está obligado a liberar parte de la carga. Conociendo esto, sería posible generar un itinerario de viaje con diferentes paradas de entrega de combustible, en donde se reduzcan al mínimo las pérdidas por alzas de presión, aprovechando al máximo la carga que se transporta.

Capítulo 2

Información General del LNG

2.1. Características del LNG

Las principales propiedades físico-químicas del gas natural licuado se detallan a continuación

Tabla 2-1: Características físico-químicas del LNG

Característica	Descripción o valor
Aspecto	Gas licuado, fuertemente refrigerado
Color	Incoloro
Olor	Inodoro
T° de auto ignición	540°C
T° de ebullición	-160°C a 1 atm
Punto de congelación	-182°C
Densidad	460 [kg/m ³]
Densidad relativa del vapor a T° ambiente	0.6
Límites de inflamabilidad	5%-15%
Calor de combustión	11900 [kcal/kg]
Peso molecular	16 [g/mol]

El almacenar y transportar el gas natural de forma licuada posee la ventaja de que reduce su volumen a cerca de 1/600 respecto a cuándo se encuentra en forma de gas. Por lo que, a pesar de los cuidados que se deben tener en cuenta, es la alternativa más rentable desde el punto de vista económico al momento de transportarlo.

La baja temperatura de almacenamiento del LNG hace necesario tomar ciertas precauciones al momento de trabajar con este combustible. Primero que nada, el almacenamiento debe ser del tipo criogénico y hay que tener especial cuidado con la temperatura interna de la cisterna, la cual no puede elevarse demasiado para resguardar la integridad de esta. Por otro lado, existen riesgos y cuidados personales a tener en consideración para la operación del LNG, a causa de ser un elemento inflamable que se encuentra a temperaturas extremadamente bajas.

2.2. Estudios realizados sobre el transporte de LNG

Dependiendo del tipo de aislación que tenga el estanque de combustible y las condiciones ambientales, la tasa de pérdida de combustible puede ser cercano al 0.1-0.15% diario para un viaje típico de transporte. Sin embargo, el nivel de evaporación del LNG varía significativamente en respuesta a una leve variación de los parámetros de los cuales depende, pudiendo llegar a niveles de pérdida tan altos como un 2-6% que, si bien en primera instancia no parecen valores muy preocupantes, las grandes cantidades de LNG transportadas producen que cualquier alza porcentual provoque un impacto notorio en el mercado transportista.

La situación crítica que genera este tipo de almacenamiento ha sido foco de atención para diferentes investigaciones con el fin de reducir el aumento de temperatura dentro de la cisterna y el consecuente aumento de presión. Por ejemplo, en un estudio realizado sobre una cisterna con capa interior de acero A553 y exterior de AISI 1040; considerando la temperatura del combustible, temperatura ambiente y presión de trabajo igual a -165°C , 25°C y 1 [atm] respectivamente; se obtuvo como resultado una tasa de pérdida de 0.0372 kg/kg por día [1], es decir cerca de un 4% de la carga total.

Otro caso que analiza la transferencia de calor en el tanque de LNG, lo estudia cuando se transporta de forma marina, por lo que existen algunos cambios en los análisis a realizar, pero los parámetros de evaluación son similares a los anteriores. Aquí la cantidad de combustible a transportar son 145000 [m³] de LNG en estanques con doble muralla y con una espuma de poliuretano como aislante intermedio. La duración del viaje resultó ser crucial al momento de cuantificar las pérdidas, pasando desde una tasa de aproximadamente 0.2% diario para un viaje de 5 días a 0.7% por uno de 20 días. Por otro lado, la transmitancia también tuvo un impacto considerable, pues al aumentar de 0.4 a 0.6 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}}\right]$, la tasa de pérdida de LNG durante el viaje

se elevó desde un 1.1% hasta un 1.8% diario para un viaje de 20 días a 25°C de temperatura ambiente [2].

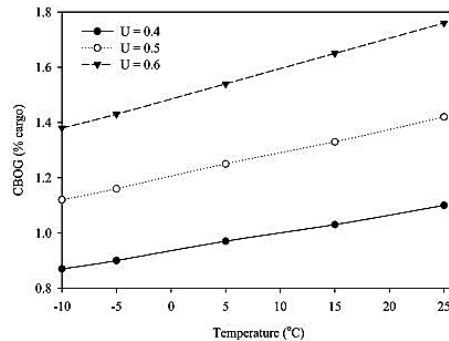


Figura 2-1: Efecto de la transmitancia y la temperatura ambiente en las pérdidas evaporativas de LNG. Modificado de [2]

2.3. Normativa de almacenamiento para el transporte de LNG

En Chile, el Ministerio de Energía es el organismo encargado de establecer las normas para la construcción de cisternas en camiones que transporten combustibles presurizados como el LNG. A causa de que en el “Reglamento de Seguridad de Plantas de Gas Natural Licuado”, aprobado por decreto supremo N° 67 en el 2011 del Ministerio de Energía no existía una regulación para el transporte de este combustible, es que en el año 2014 se aprueba un reglamento de seguridad para el transporte de gas natural licuado, en donde se detallan los criterios a considerar en el diseño y la fabricación de estos estanques a presión, el cual se basa principalmente en las normas europeas y norteamericanas, cuyos aspectos más importantes se detallan a continuación

La norma europea [3] (ADR) establece clasificaciones de combustibles y los pasos a seguir para el almacenamiento de cada uno de ellos. Por esto, es necesario definir la categoría en la cual queda clasificado el LNG que, de acuerdo a esta norma, pertenece a la clase 2 correspondiente a **gases**, pues este combustible cumple con los siguientes requisitos.

- A 50°C tiene una presión de vapor superior a 300[kPa] equivalente a 3[bar]
- Este por completo en estado gaseoso a 20°C, a la presión normalizada de 101.2[kPa]

Dentro de esta categoría, el LNG cae en la subcategoría de **gas licuado refrigerado**, pues cuando se almacena para su transporte, se encuentra parcialmente en estado líquido a causa de su baja temperatura. Además, debido a su alto grado de inflamabilidad se asigna al grupo **F** (*flammable*) de peligrosidad.

Es en base a esta clasificación del LNG, que se puede obtener información sobre el modo de almacenamiento, modo de transporte, tipo de cisterna y vehículo a emplear, categoría de transporte, entre otros. Esta información sobre la manera y precauciones en el almacenaje del LNG es posible encontrarla en los apéndices de [3].

Estados Unidos también posee un código federal para regular el transporte de combustibles [4], el cual indica las restricciones y cuidados a considerar en el transporte de estas sustancias. Dentro de los aspectos que cubre, el más importante para el LNG tiene relación con la obligación del uso de dos sistemas independientes de alivio de presión conectados en paralelo. Un sistema primario de venteo estándar y uno secundario que se empleará para situaciones excepcionales en las cuales el sistema primario no sea capaz por si solo de ventear todo el gas excedente. Además, en este código se plantean las siguientes directrices a seguir relacionadas con los sistemas de alivio de presión de la cisterna.

Requerimientos generales

- *“Un tanque de carga no puede cargarse con un líquido criogénico más frío que la temperatura de servicio de diseño del embalaje”*
- *“Un tanque de carga no puede cargarse con ningún material que pueda combinarse químicamente con cualquier residuo en el embalaje para producir una condición insegura”*

Tipo y construcción de dispositivos de alivio de presión

- *“Cada dispositivo de alivio de presión debe diseñarse y construirse para una presión igual o superior a la presión de diseño del tanque a la temperatura más fría que se pueda encontrar.....las válvulas de alivio de presión deben ser de un tipo que se abra y cierre automáticamente a presiones determinadas”*

Ajustes de dispositivos de presión.

- *“Cada válvula de alivio de presión en el sistema de alivio primario debe configurarse para descargar a una presión que no sea mayor al 110 por ciento de la presión de diseño del tanque”*
- *“Cada dispositivo de alivio de presión en el sistema secundario de alivio de presión debe estar diseñado para comenzar a funcionar a una presión no inferior al 130 por ciento y no superior al 150 por ciento de la presión de diseño del tanque”*

Disposición y ubicación de los dispositivos de alivio de presión

- *“La descarga de cualquier sistema de alivio de presión debe dirigirse hacia arriba y no debe obstruirse hacia el exterior de la carcasa protectora de tal manera que se evite el impacto del gas sobre la camisa o cualquier parte estructural del vehículo”.*
- *“Cada dispositivo de alivio de presión debe tener comunicación directa con el espacio de vapor del tanque en la mitad de la línea central superior”*
- *“Cada dispositivo de alivio de presión debe instalarse y ubicarse de manera que el efecto de enfriamiento del contenido durante la ventilación no impida el funcionamiento efectivo del dispositivo”*

Con respecto a la construcción de estanques a presión, el Parlamento Europeo proclamó una directiva que señala los requisitos de seguridad a considerar para esta labor [5]. En particular, se señala la necesidad de que la construcción se realice de manera conservadora considerando márgenes de seguridad apropiados para prevenir todo tipo de fallos. Además, se detallan los factores a considerar para el diseño de la cisterna que pueden alterar las condiciones de servicio, los cuales se muestran a continuación.

- La temperatura ambiente y la temperatura de funcionamiento
- La presión exterior y la presión interior
- La presión estática y la masa del contenido en condiciones de funcionamiento y ensayo
- Las cargas debidas al tráfico, al viento y a los terremotos
- Las fuerzas y los momentos de reacción derivados de los soportes, los dispositivos de montaje, las tuberías, etc.
- La corrosión y la erosión, la fatiga, la descomposición de los fluidos inestables, etc.

Capítulo 3

Fundamento Teórico

3.1. Radiación Solar Extraterrestre.

El Sol es la mayor fuente de radiación electromagnética de nuestro sistema planetario. Esta estrella consiste básicamente en una esfera de unos $1.391 \cdot 10^6$ [km] de diámetro, constituida en su mayoría por hidrógeno (cerca del 73.46% de la fotosfera está compuesta de este elemento) y en un porcentaje menor por helio. Estos dos elementos son quienes participan en reacciones químicas de fusión que ocurren principalmente en el núcleo de la estrella, el cual se encuentra a millones de grados Kelvin. Estas reacciones liberan grandes cantidades de energía que deben traspasarse hacia la superficie del Sol, lo que genera que esta zona se encuentre a unos $5778^{\circ}K$ aproximadamente, y luego, esta energía es liberada al espacio exterior en forma de radiación electromagnética.

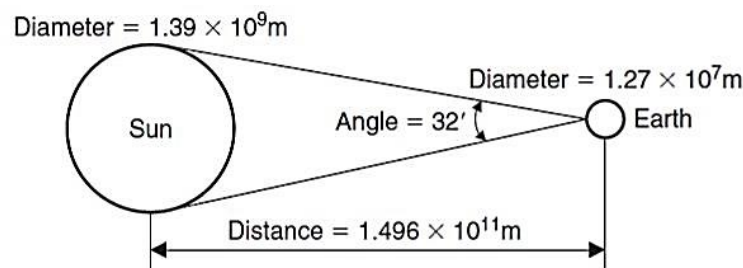


Figura 3-1: Relaciones métricas entre el Sol y la Tierra

Una determinada fracción de estos fotones expulsados llegan a la Tierra, sin embargo, para determinar esta porción es necesario conocer un poco más sobre las dimensiones y distancias de estos dos cuerpos celestes. El diámetro de la Tierra es de aproximadamente 12740 [km] (cerca de 100 veces menos que el Sol) y la distancia que separa a ambos astros es de $1.495 \cdot 10^8$ [km] la cual varía en cerca de un 1.7% a causa de la excentricidad de la órbita terrestre.

En base a estas medidas se puede determinar que el ángulo subtendido por el Sol sobre nuestro planeta es de 32 minutos, tal como se muestra en la figura 3-1. Con esta información, es posible determinar la cantidad de radiación proveniente del Sol que incide sobre la atmósfera de la Tierra. Este valor recibe el nombre de **constante solar** (G_{sc}) y corresponde a la energía proveniente del Sol por unidad de tiempo y unidad de área normal a la dirección de los rayos solares; la cual se mide en la parte exterior de la atmósfera terrestre.

Una gran cantidad de mediciones han sido llevadas a cabo para determinar el valor de la constante solar, las cuales en un principio se debían realizar en la superficie, luego de que cierta parte de la radiación había sido absorbida y dispersada por la atmósfera. No obstante, el avance tecnológico en la construcción de globos y naves capaces de llegar a altitudes muy elevadas han mejorado la precisión de estas mediciones. Datos recolectados por los satélites *Nimbus* y *Mariner* junto con otros datos de radiación anteriores permitieron que un valor de $1373 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ fuera determinado por Frohlich (1978) con un error de 1 a 2%.

Se ha realizado un seguimiento en las mediciones del valor de la constante solar a través de los años, sin embargo, como se muestra en la figura 3-2, este valor oscila dentro de ciertos rangos, y varía además dependiendo del radiómetro que esté operando. Es por esto y por la sensibilidad de los equipos de medición, que se establecen ciertas correcciones a los valores medidos para la obtención de un valor más estable y representativo [6]

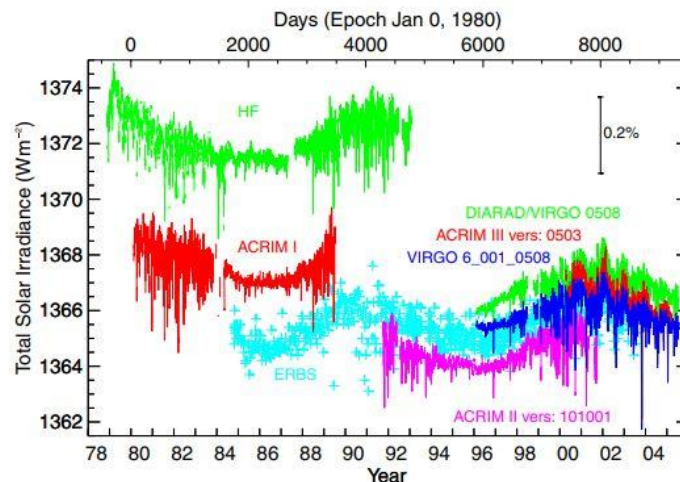


Figura 3-2: Comparación de la constante solar para radiómetros en diferentes plataformas espaciales medidas desde Noviembre de 1978. Recuperado de [6]

En la actualidad el Centro Mundial de Radiación (WRC) ha adoptado un valor de $1367 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ con una incertidumbre del orden del 1%. Es este último valor el que se utilizará en el trabajo a presentar.

3.2. Efectos de la posición terrestre sobre la radiación incidente

Hay muchos factores que afectan la radiación total que incide sobre algún punto en la superficie de la Tierra. El primero a destacar es que, debido a la excentricidad de la órbita terrestre, el valor de la constante solar va a variar a lo largo del año. Es por eso, que debe aplicarse una corrección a este valor en función del día en el cual nos encontremos. Una ecuación simple con la precisión adecuada para la mayoría de los cálculos se presenta a continuación.

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \quad (3-1)$$

Donde n representa el día del año en el cual se desea estimar el valor de la constante solar.

Otro aspecto que influye considerablemente en la magnitud de la energía solar incidente, es el **tiempo solar**, que no debe confundirse con el tiempo u hora satelital. Mientras que el primer concepto guarda relación con el tiempo preciso en función de la posición del Sol, el segundo está relacionado con la definición de un horario estándar de acuerdo a delimitaciones geopolíticas de las diferentes naciones. Una forma práctica de notar la diferencia entre ambos conceptos es considerar las localidades de Antofagasta y Calama, ambos lugares poseen la misma hora satelital GMT+4 correspondiente al territorio chileno, sin embargo, en un mismo instante, a causa de la diferencia de longitud entre ambas zonas, el Sol estará ubicado en una posición diferente si comparamos ambos lugares, es decir, poseen un mismo tiempo satelital, pero diferente tiempo solar.

Es por esta razón, que se hace necesario emplear dos correcciones para convertir la hora satelital a solar. Primero, hay que aplicar una modificación para la diferencia entre la longitud en la cual se ubica la superficie o punto de estudio, y la longitud en base a la cual se define la

hora satelital de la región. Considerando que al Sol le toma 4 minutos recorrer 1° de longitud, es posible calcular la diferencia en minutos causada por la distancia entre el punto de estudio y la zona de referencia como una simple resta de coordenadas. La segunda corrección viene dada por la **ecuación de tiempo**, que toma en consideración las perturbaciones y cambios en la velocidad de rotación de la Tierra, lo cual afecta el tiempo que tarda el Sol en realizar su “ruta” a lo largo del día. En base a esto, la diferencia en minutos entre la hora solar y la hora estándar queda definida como.

$$AST - LST = ET \pm 4(SL - LL) [min] \quad (3-2)$$

$$ET = 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \cdot \sin(B) \quad (3-3)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (3-4)$$

Donde AST representa la hora solar y LST corresponde a la hora satelital de la región, ET es la denominada ecuación de tiempo, y los términos SL y LL representan el meridiano en el cual se fija el horario estándar y la longitud local en la cual se encuentra el punto de estudio respectivamente. Para estos últimos valores se utilizan el signo menos (-) si es que los puntos de estudio se ubican en el lado Este, es decir, hacia la derecha del Meridiano de Greenwich, y un signo más (+) si es que se ubican al Oeste de este meridiano.

La posición relativa entre los rayos solares y la superficie a analizar, también influye de forma considerable, esto debido a que, de toda la radiación incidente sobre un cierto plano, solo se toma en cuenta una cierta parte de esta energía. Solo la componente normal de la radiación al plano de estudio es considerada como incidente en él, es decir, en un caso de desalineamiento cero (superficie perpendicular a los rayos solares) toda la radiación es captada, mientras que en el caso de desalineamiento de 90° (superficie paralela a los rayos solares) no habrá incidencia. De aquí se deduce que la radiación que efectivamente incide sobre una determinada superficie viene dada por.

$$R_{captada} = R_{sol} \cdot \cos(\theta) \quad (3-5)$$

Donde θ es el ángulo formado entre los rayos incidentes y el vector normal a la superficie.

Debido a esto, es necesario determinar esta relación geométrica entre los rayos solares y la posición de la superficie estudiada. Para ello, se deben tomar en cuenta varios factores, los cuales van desde la posición de la superficie en el suelo terrestre hasta la época del año en la cual se realiza el cálculo, los cuales se definen a continuación.

- **Declinación (δ):** es el ángulo formado entre los rayos solares y el Ecuador, esta se define positiva hacia el hemisferio Norte y negativa en el hemisferio Sur. Su valor oscila entre 23.45° y -23.45° dependiendo de la época del año y se puede calcular aproximadamente como.

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (3-6)$$

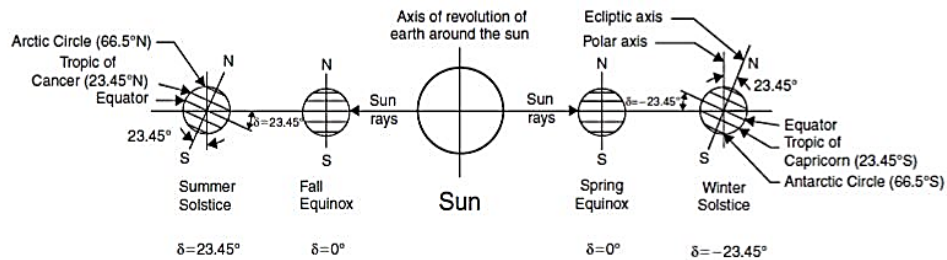


Figura 3-3: Variación de la declinación de la Tierra a lo largo del año. Recuperado de [7]

- **Latitud (L):** es la distancia angular formada entre la línea ecuatorial y un punto determinado de la Tierra, medido a lo largo del meridiano en el cual se encuentra dicho punto. Se mide de 0° a 90° , considerando la latitud 0° como la línea del Ecuador y 90° los polos, ya sean Norte o Sur.
- **Horario (h):** se define como el ángulo en el cual la Tierra debería girar respecto a su eje para ubicar el punto de estudio justo por debajo del Sol (mediodía). Como 1 hora

representa en coordenadas terrestres un total de 15° , el ángulo que es necesario girar para llegar a dicha posición se calcula de la siguiente manera.

$$h = (AST - 12) \cdot 15 \quad (3-7)$$

Es necesario aclarar que para el caso en que la hora también contenga minutos, se debe proceder a dividir estos por 60 y agregarlos al AST a modo de decimal.

Estos tres ángulos definidos anteriormente representan la influencia de las coordenadas terrestres, y la posición relativa de la Tierra respecto al Sol para el cálculo de la radiación incidente. Dichos valores se representan de manera esquemática en la figura 3-4.

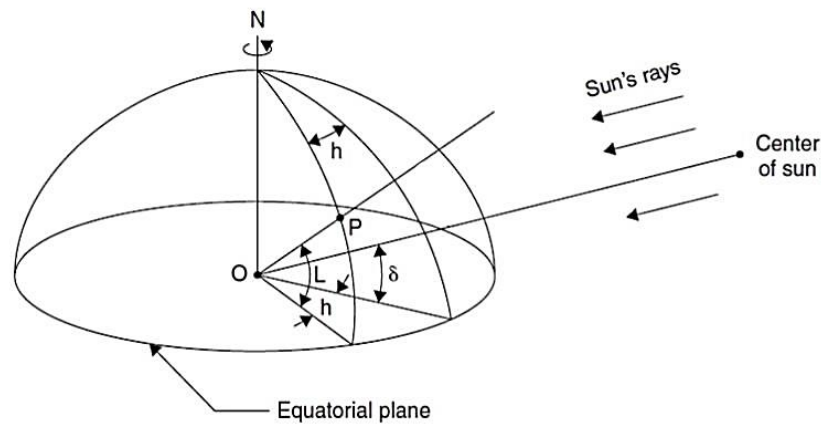


Figura 3-4: Representación de la declinación, latitud y ángulo horario para un punto P arbitrario. Modificado de [7]

En base a los ángulos definidos anteriormente es posible establecer la duración del día o en otras palabras, el tiempo durante el cual el Sol está presente, lo que sirve para determinar los lapsos de tiempo en los cuales se absorbe radiación. Esta duración se determina a partir del ángulo de atardecer (h_{SS}) que corresponde al momento en el cual el Sol desaparece en el horizonte.

$$\cos(h_{SS}) = -\tan(L)\tan(\delta) \quad (3-8)$$

Si nos basamos en que al mediodía el ángulo horario es nulo, es posible determinar la cantidad de horas desde el mediodía hasta la llegada del atardecer mediante la siguiente expresión.

$$h_{ss} = \frac{1}{15} \cos^{-1}(-\tan(L)\tan(\delta)) \quad (3-9)$$

Por lo tanto, la duración del día va a corresponder simplemente al doble de la ecuación 3-9, ya que, por definición de la hora solar, el movimiento del Sol es simétrico respecto al mediodía, por lo que la diferencia de horas para el amanecer y atardecer respecto del mediodía solar es exactamente la misma.

$$\text{Duración del día} = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan(L)\tan(\delta)) \quad (3-10)$$

También se define otro parámetro que se usará más adelante, que está relacionado con la posición del Sol respecto a un plano horizontal, el cual se define a continuación.

- **Altitud Solar (α):** corresponde al ángulo formado entre los rayos solares y el plano horizontal.

$$\sin(\alpha) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (3-11)$$

Ahora hay que definir los ángulos que guardan relación con la posición relativa de la superficie respecto al suelo terrestre, estos son básicamente dos ángulos. La inclinación de la superficie respecto al suelo y la orientación que presente respecto al eje Norte-Sur. Ambos se definen con más detalle a continuación.

- **Inclinación (β):** ángulo formado entre una recta paralela a la superficie analizada y la superficie terrestre, este valor puede estar en un rango de 0° a 180° .
- **Azimutal de superficie (z_s):** es el ángulo formado entre la proyección de la normal de la superficie sobre el suelo y el vector Norte-Sur que apunta hacia el Sur geográfico. Este ángulo se mide positivo en sentido Oeste y negativo en el sentido Este.

Las posiciones de la superficie respecto al suelo se detallan en la figura 3-5.

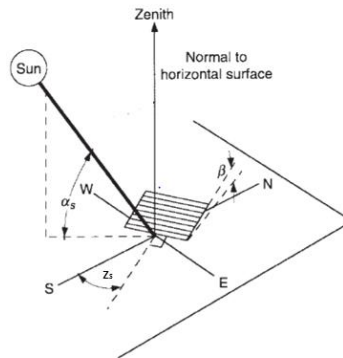


Figura 3-5: Ángulo de inclinación y azimutal de la superficie analizada. Recuperado de [7]

Con todos estos datos ya definidos, es posible determinar el desalineamiento entre el vector normal a la superficie y los rayos solares incidentes. A este ángulo se le denomina como **ángulo de incidencia (θ)** y se relaciona con los valores definidos anteriormente de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \sin(L) \cos(\beta) - \cos(L) \sin(\delta) \sin(\beta) \cos(z_s) \\ & + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \cos(\beta) + \cos(\delta) \sin(h) \sin(\beta) \sin(z_s) \quad (3-12) \\ & + \sin(L) \cos(\delta) \cos(h) \sin(\beta) \cos(z_s) \end{aligned}$$

Es este ángulo de incidencia el que posee interés real para el tratamiento de la radiación, por ende, la energía total que incide sobre el camión se obtiene simplemente sustituyendo el valor de la ecuación (3-12) en (3-5). La forma en la cual se emplea este ángulo para el estudio de la radiación es mediante el concepto de **air mass**, que se define en palabras simples como la longitud de la trayectoria atmosférica que deben seguir los rayos solares para llegar a la superficie. Es este parámetro el que se utiliza para el cálculo de la radiación incidente en estudios de factibilidad para la instalación de paneles fotovoltaicos. Precisamente en ese caso se analiza la radiación con un **AM1.5** (air mass de 1.5) lo que equivale a un ángulo de 48.18° de acuerdo a la ecuación 3-13.

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (3-13)$$

3.3. Atenuación Atmosférica.

El ítem anterior considera la variación de la radiación solar incidente tomando en cuenta solo los aspectos espaciales entre ambos cuerpos, simplificando el análisis al asumir una atmósfera inerte que no interfiere en la radiación incidente sobre la Tierra. No obstante, tal escenario no sucede y, por el contrario, una parte considerable de la radiación extraterrestre es atenuada por los gases constituyentes de la atmósfera produciendo que solo una fracción de ella llegue a la superficie. A continuación, se describen los dos mecanismos principales que contribuyen a la atenuación de la radiación solar.

3.3.1. Absorción.

Las partículas presentes en la atmósfera interfieren con la trayectoria de la luz solar, mediante los fenómenos de dispersión, absorción y reflexión lo que causa una disminución de la intensidad de la radiación. Dicho fenómeno es visible en la figura 3-6, en donde se muestra que parte de la radiación desaparece para ciertas longitudes de onda definidas. La atenuación de la radiación depende de cuatro factores principalmente.

- El espesor de la capa de ozono.
- La distancia que los rayos solares deben viajar a través de la atmósfera (air mass).
- La cantidad de partículas presentes en el aire (polvo, vapor de agua, etc.).
- La nubosidad.

Se observa de manera inicial que, para longitudes de onda muy pequeñas, en donde se encuentra principalmente la radiación ultravioleta (UV) la cantidad de fotones incidentes sobre la Tierra es muy pequeña. Esto debido al fenómeno de absorción que experimenta la luz ante la presencia de ozono en las capas superiores de la atmósfera. Este compuesto absorbe casi en su totalidad la radiación de longitudes de onda inferiores a $0.29[\mu m]$, por lo que la contribución energética de la radiación ultravioleta penetrante en la superficie terrestre es insignificante en comparación con el resto del espectro solar. La absorción por parte del ozono comienza a

disminuir conforme aumenta la longitud de onda hasta los $0.35[\mu m]$ en donde prácticamente ya no hay absorción. Es hasta los $0.6[\mu m]$ en donde el ozono vuelve a tener importancia en una pequeña franja. El vapor de agua absorbe radiación de forma importante en la banda infrarroja del espectro solar, con peaks de absorción en los puntos de $1.1, 1.4$ y $1.8[\mu m]$. Más allá de los $2.5[\mu m]$ la transmisión de radiación en la atmósfera es muy baja debido a la absorción del H_2O y CO_2 , además el aporte energético de la luz con longitudes de onda mayores a $2.5[\mu m]$ representa cerca del 5% de la radiación total incidente, y a causa de la absorción experimentada este aporte es prácticamente despreciable.

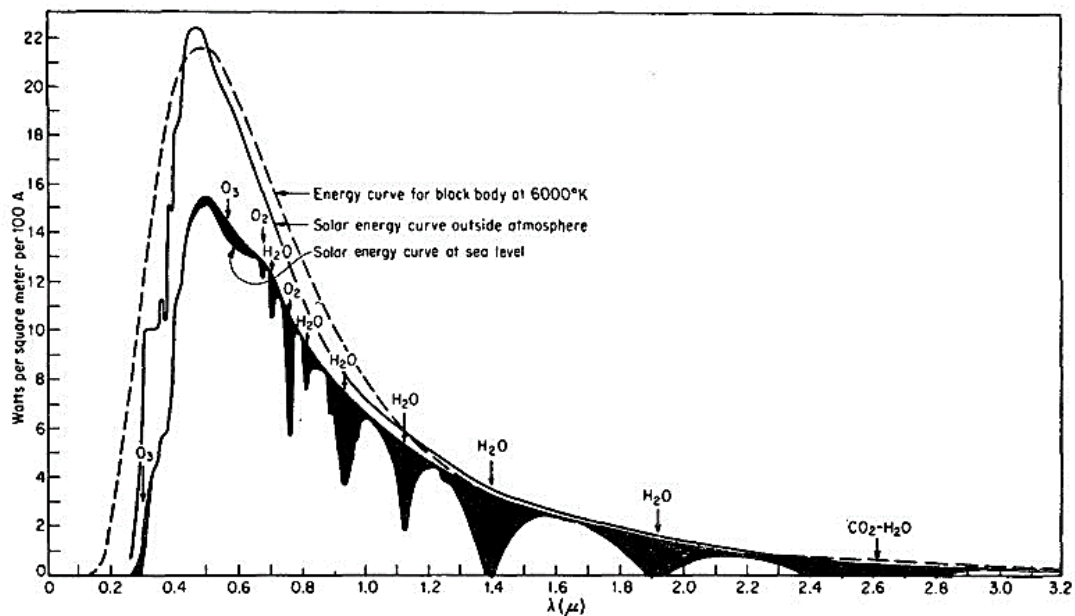


Figura 3-6: Distribución del espectro solar terrestre a nivel del mar. Recuperado de [8]

3.3.2. Dispersión.

Otro método de atenuación es la dispersión, causada por la interacción de la luz con las partículas de la atmósfera que producen la desviación de los rayos solares en todas direcciones.

El primer tipo a considerar es la dispersión de Rayleigh, que se enfoca principalmente en partículas de tamaño muy pequeño $d < \lambda$, es decir, partículas de tamaño atómico o molecular. Este tipo de interacción onda-partícula produce una dispersión equitativa alrededor de la partícula, generando que no exista una dirección preferente para la radiación dispersada. Este

tipo de fenómeno ocurre principalmente cuando la trayectoria a través de la atmósfera terrestre es bastante corta, es decir, ocurre en situaciones como el mediodía.

Por otro lado, la dispersión de Mie se enfoca en partículas con un tamaño mayor a la longitud de la onda dispersada $d > \lambda$. En este caso la radiación dispersada posee una dirección preferente que coincide con la dirección inicial en la cual se propagaba la luz antes de ser dispersada. Este caso ocurre más frecuentemente para situaciones en donde la luz atraviesa una trayectoria mucho más larga en comparación con el caso de dispersión de Rayleigh, por ende, es posible identificar este tipo de dispersión en ocasiones como los atardeceres (o amaneceres) o para regiones de latitudes muy altas [9].

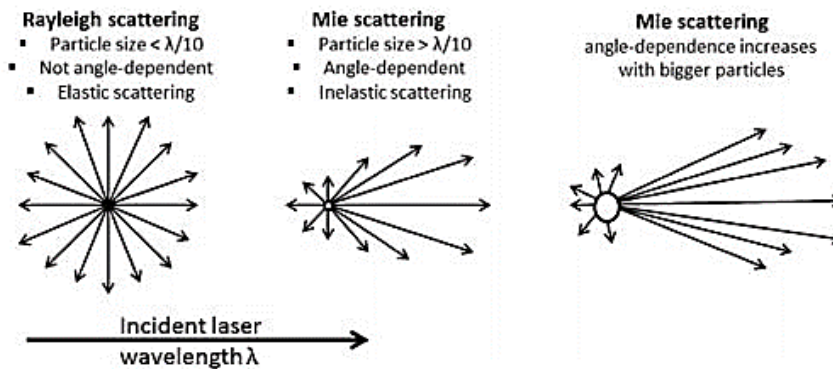


Figura 3-7: Dispersión de Rayleigh y Mie. Recuperado de [10]

El efecto de la dispersión se observa como la diferencia entre la curva para la radiación solar extraterrestre y la curva solar a nivel del mar en la figura 3-6. Se puede apreciar que su efecto es dominante en las zonas de menor longitud de onda, pero este se va haciendo cada vez más despreciable, y a partir de los $1.2[\mu m]$ su contribución es prácticamente nula.

3.4. Generación de Clima Sintético

Las expresiones para el cálculo de la dispersión y absorción de la radiación son bastante complejas, a causa de la gran cantidad de parámetros que se deben considerar. Es por eso, que resulta más factible el uso de coeficientes empíricos que consideren los efectos atenuantes de la atmósfera independiente de los parámetros de los cuales depende este efecto. A dichos coeficientes se les denomina **índices de claridad**, y son un indicador de la radiación total que

incide sobre la Tierra luego de ser atenuada por la atmósfera, en comparación con la radiación solar extraterrestre.

Usualmente se calcula un índice de claridad para cada día del periodo de tiempo analizado, y en base a estos se generan expresiones que permiten determinar la radiación diaria y horaria sobre un determinado punto. No obstante, el cálculo de estos índices de claridad diarios, al ser de forma empírica, depende fuertemente de los datos que se tengan a disposición, por lo que se requiere de información solarimétrica histórica para largos periodos de tiempo (del orden de décadas) si se quiere tener un cálculo de índices de claridad para cada día con un nivel de confianza aceptable.

En base a lo anterior es que se definen los llamados **modelos de clima sintético**, que generan estos coeficientes en base a un índice de claridad promedio mensual que es más sencillo de calcular. Este valor permite generar un modelo estocástico que determina los coeficientes antes mencionados de forma diaria con un cierto rango de confianza. La generalidad de este procedimiento produce que, además de existir un modelo probabilístico estándar para encontrar estos coeficientes, existan otros que se enfocan en áreas de climas locales para obtener resultados más precisos en dichas zonas y que, por ende, funcionan mejor en esos lugares que en otros de climatología diferente.

3.4.1. Modelo estándar

Las investigaciones realizadas han demostrado que, en general la distribución de los índices de claridad de una zona depende fuertemente de un índice de claridad promedio mensual, independiente de la zona geográfica o de la estación del año. Dicha conclusión facilita enormemente la determinación de estos factores, pues hace posible la construcción de un modelo universal aplicable a cualquier región del mundo [11].

Se define el índice de claridad promedio mensual como.

$$\overline{K_t} = \frac{\overline{H}}{\overline{H_0}} \quad (3-14)$$

Donde \overline{H} representa el valor promedio de la radiación diaria que efectivamente incide sobre el suelo y $\overline{H_0}$ es la radiación solar extraterrestre promedio.

El modo en el cual se calcula esta radiación promedio para un mes cualquiera, es integrando la ecuación (3-5) con respecto a los ángulos de amanecer y atardecer (h_{ss} y $-h_{ss}$) respectivamente, considerando una inclinación de 0, ya que se calcula la radiación promedio sobre un plano horizontal. Estudios realizados han dado como resultado que es posible predecir el comportamiento mensual promedio de la radiación en base a un cierto día representativo de este, comúnmente son días que se encuentran a mediados de mes, los cuales se encuentran detallados en la siguiente tabla.

Tabla 3-1: Días promedio para cada mes

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Día promedio	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10
Posición anual	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344

A partir de $\overline{K_t}$ se generan los índices de claridad correspondientes a cada día del mes, considerando que valores muy bajos o muy altos de K_t diarios son muy poco probables. Lo que a su vez implica que los valores de K_t tienden a concentrarse en las posiciones centrales ubicadas entre los extremos. En base a esto, la función de probabilidad de los índices de claridad tiene una forma similar a la indicada en la figura 3-8.

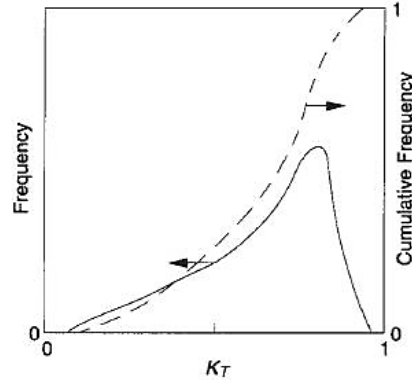


Figura 3-8: Ilustración de función de densidad de probabilidad para K_t . Recuperado de [7]

Ciertos valores de $f(K_t)$ (probabilidad acumulada de los índices de claridad) se encuentran tabulados en el anexo A. No obstante, es posible determinar una expresión analítica en base a las siguientes variables recomendadas por [12] y [13].

$$K_{t,min} = 0.05 \quad (3-15)$$

$$K_{t,max} = 0.631 + 0.267\bar{K}_t - 11.9 \cdot (0.75 - \bar{K}_t)^8 \quad (3-16)$$

$$\xi = \frac{K_{t,min} - K_{t,max}}{K_{t,min} - \bar{K}_t} \quad (3-17)$$

$$\gamma = -1.498 + \frac{1.184\xi - 27.182\exp(-1.5\xi)}{K_{t,min} - K_{t,max}} \quad (3-18)$$

Con estos parámetros definidos, la función de probabilidad acumulada para los índices de claridad queda definida como.

$$f(K_t) = \frac{\exp(\gamma K_{t,min}) - \exp(\gamma K_t)}{\exp(\gamma K_{t,min}) - \exp(\gamma K_{t,max})} \quad (3-19)$$

La expresión anterior es una buena aproximación para la distribución de los índices de claridad por debajo de 0.9; para $K_t > 0.9$ la función sobrestima el valor de la frecuencia para ciertos valores de K_t . En base a la expresión anterior, se van generando los distintos índices de claridad para cada día de la siguiente forma. Para un mes cualquiera de por ejemplo 30 días, existe un κ tal que el $f(\kappa) = \frac{1}{30}$ del tiempo existirá un índice de claridad igual o menor a κ , lo que podría representar fielmente la atenuación de un cierto día en particular. Pero, el procedimiento estándar para determinar el valor de K_t de un cierto día es tomando el promedio entre la función de probabilidad acumulada del valor κ y el valor previo (en este caso cero), pues ambas probabilidades representan el inicio de un día y el termino de este (inicio del día siguiente) respectivamente, por lo que se obtiene un resultado más apropiado para el comportamiento promedio del día. Es decir, el índice de claridad a seleccionar es el que posea una probabilidad acumulada igual a $\frac{1}{60}$. De manera análoga se procede con el resto de los días con probabilidades acumuladas de $\frac{3}{60}, \frac{5}{60}$, etc. hasta llegar a obtener 30 valores diferentes para K_t . Estos índices no se ordenan de forma ascendente o descendente en función de los días del mes, sino que se distribuyen en base a una secuencia establecida de días que conforman la generación del clima sintético, pues son los que mejor representan la climatología de un mes estándar.

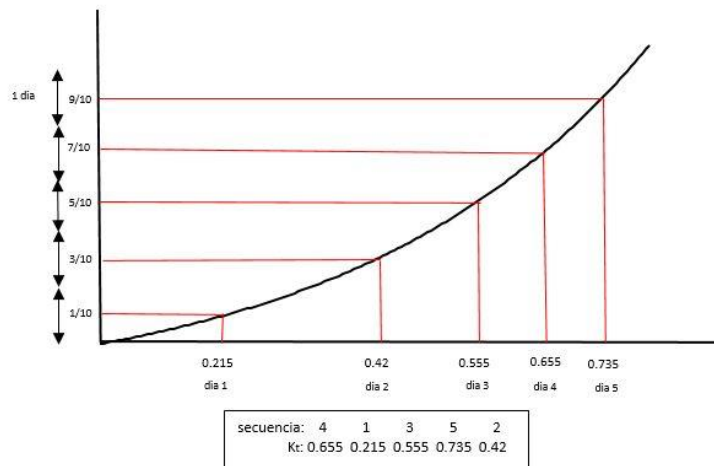


Figura 3-9: Obtención de los K_t para una secuencia de un mes de 5 días.

En la figura 3-9 se observa un ejemplo simplificado para un mes de solo 5 días, en donde se obtienen los 5 K_t y luego se ordenan mediante una secuencia predefinida, para hacerlos calzar con cada día del mes. En este caso en particular, el primer día de este mes ficticio tendrá un

$K_t = 0.655$ y así sucesivamente para los 5 días del mes. Distintas secuencias de días se han generado en estudios previos, las que comúnmente se construyen para meses de 31 días, sin embargo, es posible adaptar dichas secuencias para meses de 28 o 30 días. Una secuencia en particular, es ampliamente usada para la generación del clima para años típicos en distintos softwares de simulación, debido al alto grado de correlación respecto al comportamiento estándar de un mes. Tal secuencia se presenta en la tabla 3-2 y como se puede observar depende exclusivamente del valor de $\overline{K_t}$.

Tabla 3-2: Secuencia de días para los índices de claridad diarios. Extraída de [13]

	Criterio	Secuencia
K_t	$\overline{K_t} \leq 0.45$	24, 28, 11, 19, 18, 3, 2, 4, 9, 20, 14, 23, 8, 16, 21, 26, 15, 10, 22, 17, 5, 1, 6, 29, 12, 7, 31, 30, 27, 13, 25
K_t	$0.45 < \overline{K_t} \leq 0.55$	24, 27, 11, 19, 18, 3, 2, 4, 9, 20, 14, 23, 8, 16, 21, 26, 22, 10, 28, 6, 5, 1, 26, 29, 12, 17, 31, 30, 15, 13, 25
K_t	$\overline{K_t} \geq 0.55$	24, 27, 11, 4, 18, 3, 2, 19, 9, 25, 14, 23, 8, 16, 21, 26, 22, 10, 15, 17, 5, 1, 6, 29, 12, 7, 31, 20, 28, 13, 30

3.4.2. Modelo para zonas cercanas a los trópicos.

La existencia de un modelo universal para la determinación de los índices de claridad es de gran ayuda debido al amplio rango de uso, no obstante, el modelo descrito anteriormente no está exento de errores los cuales se incrementan al situarse en zonas que difieren de un clima estándar. Otro de los factores que influyen en la falta de concordancia entre el modelo teórico y los datos empíricos, es la selección de los rangos entre los cuales se mueve K_t . En el modelo universal se proponen ambos valores, sin embargo, estos dependen firmemente de la zona en la cual nos encontremos, por lo que su verdadero valor debe ser obtenido a partir de los datos disponibles de la zona en cuestión, con el objetivo de que, mediante una regresión lineal de esta información, se puedan establecer los límites entre los cuales se encontrará el índice de claridad de la zona.

Junto a esto, en [14] se analiza que la dependencia de los modelos de clima sintético y la posterior obtención de los índices de claridad depende del $\overline{K_t}$, pero además del *air mass*, lo que se puede traducir en la latitud de la zona. Lo anterior refuerza la idea de que es necesario implementar un modelo propio de una locación específica, para evitar los errores producidos por no considerar la variación del *air mass*.

Es por ello que, dentro de los modelos alternativos, existe uno creado especialmente para la zona entre trópicos que usualmente poseen un clima más templado que el resto del mundo. La probabilidad acumulada de encontrar un periodo de tiempo con un índice de claridad menor a K_t viene dada por la integral.

$$f(K_t, \overline{K_t}) = \int_{K_{t,min}}^{K_t} P(K_t, \overline{K_t}) dK_t \quad (3-20)$$

Donde $K_{t,min}$ y $K_{t,max}$ quedan definidos en (3-15) y (3-16). Un intento por adaptar la ecuación 3-19 a locaciones tropicales ha sido desarrollado por [15], en donde se expresa la función de densidad de probabilidad $P(K_t, \overline{K_t})$ de la siguiente manera.

$$P(x, \overline{x}) = Cx(1-x)e^{\gamma x} \quad (3-21)$$

Donde $x = \frac{K_t}{K_{t,max}}$, y los valores para C y γ vienen dado por las expresiones

$$\overline{K_t} = \frac{e^{\gamma}(\gamma^2 - 4\gamma + 6) - 2\gamma - 6}{\gamma(e^{\gamma}(\gamma - 2) + \gamma + 2)} \quad (3-22)$$

$$C = \frac{\gamma^3}{e^{\gamma}(\gamma - 2) + \gamma + 2} \quad (3-23)$$

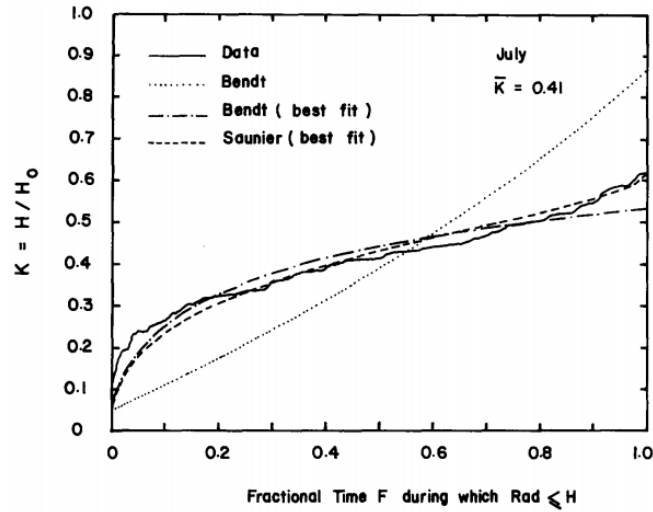


Figura 3-10: Comparación de modelos de generación de clima sintético. Modelo estándar (Bendt) y modelo de trópicos (Saunier). Recuperado de [15]

La ecuación 3-22 presenta un gran inconveniente respecto al caso anterior para un esquema universal. No existe una expresión explícita que permita obtener γ en función de K_t , sino que se debe iterar sobre un rango de valores hasta obtener un valor adecuado que se adapte lo más posible a la ecuación 3-22. Esto genera una enorme pérdida de tiempo en comparación con el caso anterior, pues es necesario encontrar una gran cantidad de coeficientes de modo “prueba y error” para poder establecer una distribución apropiada para los índices de claridad. Es por esto que [16] proporciona expresiones alternativas para el cálculo de los coeficientes de la densidad de probabilidad y para la probabilidad acumulada en zonas tropicales, cuyo grado de correlación es cercano a 0.999. Tales resultados se muestran a continuación.

$$f(x, \bar{x}) = \begin{cases} \frac{\gamma + 2 - e^{\gamma x}((\gamma x)^2 + (1 - \gamma x)(\gamma + 2))}{e^{\gamma}(\gamma - 2) + \gamma + 2}, & \text{si } K_t \neq 0.5 \\ x^2(3 - 2x), & \text{si } K_t = 0.5 \end{cases} \quad (3-24)$$

(3-25)

$$\gamma = 103.4\bar{K}_t^3 - 155\bar{K}_t^2 + 96.4\bar{K}_t - 22.36$$

$$x = \frac{K_t - K_{t,min}}{K_{t,max} - K_{t,min}} \quad (3-26)$$

El modelo anterior garantiza una densidad de probabilidad acorde a los supuestos señalados inicialmente, en donde se estipula que un modelo apropiado es el que tiene una baja probabilidad para casos extremos (días muy nublados o muy despejados), lo que conlleva a que la mayor cantidad de los índices de claridad se ubiquen en torno a un valor central. Dicho suceso generalmente no ocurre en el modelo universal en donde la densidad de probabilidad va aumentando junto con el valor de los índices de claridad.

3.5. Cálculo de Radiación diaria y horaria.

Primero, es necesario distinguir entre los tipos de radiación que interactúan con una superficie cualquiera de estudio.

- **Radiación directa:** Energía incidente que proviene directamente desde el Sol y que, por ende, no ha sido dispersada por la atmósfera.
- **Radiación difusa:** Haz de luz generado a causa de la dispersión de la radiación solar, por esta razón, este tipo de radiación no tiene dirección preferente y proviene desde todas direcciones.
- **Radiación reflejada:** Debido a su naturaleza, la radiación no es absorbida en su totalidad por la superficie en donde incide, sino que parte de ella se refleja y es devuelta al ambiente. Este fenómeno produce que parte de la radiación que incide sobre el suelo se refleje y pueda incidir sobre la superficie de estudio contribuyendo a su ganancia energética. Es por esto que debe considerarse esta contribución, la cual se calcula de la siguiente manera.

$$R_{reflejada} = \rho \cdot R_{incidente} \quad (3-27)$$

Donde ρ representa la reflectividad del material y es una propiedad exclusiva de este.

3.5.1. Radiación diaria.

Para este caso, es posible determinar H a partir de H_0 y K_t para un cierto día en particular. En donde H_0 corresponde a la radiación solar diaria extraterrestre la cual se calcula según la ecuación 3-28, y K_t se obtiene en base a la función de distribución para los índices de claridad. Es necesario recalcar que para el cálculo de H_0 se integra la ecuación 3-5 respecto a la duración del día (desde $-h_{ss}$ a h_{ss}) y se considera una superficie sin inclinación ($\beta = 0$), pues el radio a calcular se establece para superficies horizontales, entonces queda una expresión de la siguiente forma.

$$H_0 = \int_{-h_{ss}}^{h_{ss}} G_{on} dh \quad (3-28)$$

$$H_0 = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.0033 \cdot \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right) \left(\cos(L) \cos(\delta) \sin(h_{ss}) + \frac{\pi h_{ss}}{180} \sin(L) \sin(\delta) \right) \quad (3-29)$$

Ahora es necesario encontrar una expresión que relacione la radiación total con la difusa. Muchos estudios han encontrado que existe una correlación considerable entre la fracción de radiación difusa y el índice de claridad del día en particular. A pesar de esta fuerte dependencia entre ambas variables, existen ciertas discrepancias entre los resultados obtenidos por los distintos investigadores, esto debido posiblemente a dificultades con la instrumentación usada, al *air mass* o incluso a efectos estacionales.

En primera instancia se puede pensar que la relación entre H y H_d queda definida por una sola expresión algebraica, sin embargo, esta independencia de la época del año no es justificada, pues la dispersión de la radiación que pasa a través de la atmósfera depende del grosor de esta (*air mass*); y como este factor varía a lo largo del año, es de esperar que el cambio estacional influya sobre el cálculo de H_d [17]. Es por esto que se definen dos casos, para el invierno ($h_{ss} \leq 81.4^\circ$) y para verano ($h_{ss} > 81.4^\circ$).

- $h_{ss} \leq 81.4^\circ$.

$$H_d = H(1 - 0.2727K_t + 2.4495K_t^2 - 11.95K_t^3 + 9.3879K_t^4), \text{ si } K_t < 0.715 \quad (3-30)$$

$$H_d = 0.143H, \quad \text{ si } K_t \geq 0.715 \quad (3-31)$$

- $h_{ss} > 81.4^\circ$.

$$H_d = H(1 + 0.2832K_t - 2.5557K_t^2 + 0.8448K_t^3), \quad \text{ si } K_t < 0.722 \quad (3-32)$$

$$H_d = 0.175H, \quad \text{ si } K_t \geq 0.722 \quad (3-33)$$

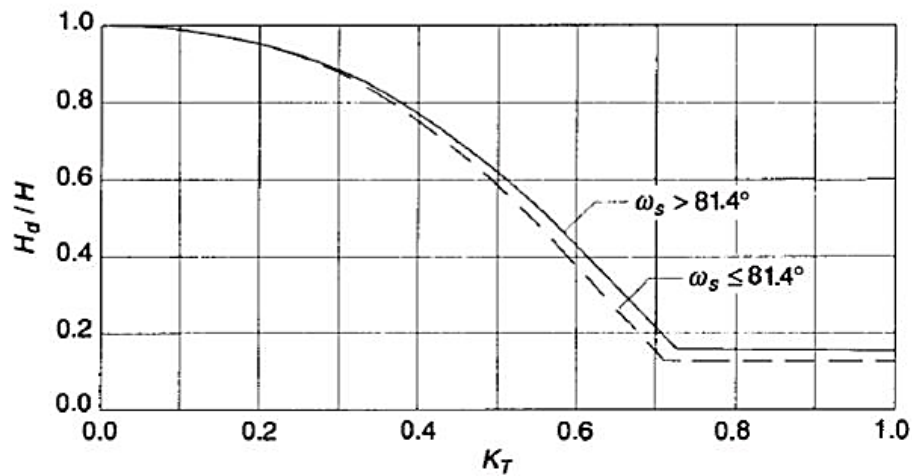


Figura 3-11: Correlación ente fracción de radiación diaria difusa y K_t

3.5.2. Radiación horaria

Cuando es necesario tener datos hora por hora, o incluso en periodos de tiempo más cortos, es bueno comenzar con datos diarios y estimar valores horarios a partir de esta información. Al igual que en el caso diario, aquí también se presentan diferentes obstáculos que nos permiten obtener información de forma exacta. Dentro de los factores más influyentes se encuentra la intermitencia de las nubes y la presencia de nubes densas o poco densas que dejan pasar cierto

porcentaje de la luz. No hay manera de determinar estos fenómenos para el transcurso de día, sin embargo, los métodos empleados tienden a producir valores conservadores para cálculos que consideren largos periodos de tiempo.

Diversos estudios estadísticos acerca de la distribución de radiación sobre superficies horizontales a lo largo del día han dejado una gran cantidad de información para poder generar gráficos del coeficiente r_t , que corresponde al cociente entre la radiación horaria y diaria. En base a estos gráficos es posible determinar una relación algebraica para r_t en función de la duración del día y la hora en cuestión.

$$r_t = \frac{I}{H} = \left(\frac{\pi}{24}\right) (a + b \cos(h)) \frac{\cos(h) \cos(h_{ss})}{\sin(h_{ss}) - \frac{\pi h_{ss} \cos(h_{ss})}{180}} \quad (3-34)$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(h_{ss} - 60) \quad (3-35)$$

$$b = 0.6609 + 0.4767 \sin(h_{ss} - 60) \quad (3-36)$$

También es posible obtener una expresión para la I_d en función de H_d .

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \left(\frac{\pi}{24}\right) \frac{\cos(h) \cos(h_{ss})}{\sin(h_{ss}) - \frac{\pi h_{ss} \cos(h_{ss})}{180}} \quad (3-37)$$

3.6. Radiación sobre superficies inclinadas

Ahora se tiene el problema de calcular la radiación sobre superficies inclinadas cuando solo la información disponible es sobre superficies horizontales. Para esto, es necesario saber la dirección en la cual la componente directa y difusa de la radiación llegan a la superficie en cuestión. La ecuación 3-12 da información sobre la componente directa; y para el caso difuso, al ser proveniente de todas direcciones se vuelve más complicado de analizar, además este aspecto depende fuertemente de la nubosidad la cual es altamente variable. Distintos

investigadores han generado perfiles en base a los datos registrados, los cuales sugieren que la radiación difusa posee tres componentes. Una parte isotrópica que proviene uniformemente de todas partes, la segunda es circunsolar difusa que es el resultado de la dispersión directa de la radiación que se ve concentrada en las cercanías de la porción de cielo que esta alrededor del Sol, y una última parte llamada brillo del horizonte, que se concentra en las cercanías del horizonte y es más importante para cielos despejados.

La radiación difusa es representada en modelos matemáticos llamados modelos de cielo (Clear Sky Model) que junto con la adición de la radiación directa y reflejada generan una manera simplificada para determinar la radiación incidente sobre superficies inclinadas a partir de la información registrada sobre superficies horizontales. Uno de los modelos más utilizados debido a su simplicidad y buena aproximación de los valores reales es el modelo de **cielo isotrópico**, el cual asume que tanto la radiación difusa desde el cielo como la reflejada por el suelo son isotrópicas, es decir, que la intensidad de ambas es la misma sin considerar la orientación [18].

En base a lo descrito anteriormente, es posible establecer una relación para el cálculo de la energía neta que llega a la superficie la cual se detalla a continuación.

$$I_t = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho_g \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (3-38)$$

En donde I_b y I_d simbolizan la radiación directa y difusa respectivamente y ρ_g representa la reflexividad del suelo donde esta localizada la superficie de estudio.

En la ecuación 3-38 el primer término guarda relación con el aporte de la radiación directa que proviene desde el Sol, en donde el factor R_b es la razón entre la energía que incide sobre superficies inclinadas en comparación con un plano sin inclinación.

$$R_b = \frac{\text{radiacion sobre superficie inclinada}}{\text{radiacion sobre superficie normal}} = \frac{\cos(\theta)}{\cos(90 - \alpha)} \quad (3-39)$$

El segundo término es el aporte proveniente de la radiación difusa y el término que acompaña a I_d corresponde al factor de forma entre el plano analizado y el cielo (representado por una semiesfera para indicar que la luz proviene de todas partes). Por último, la tercera parte de la ecuación es la radiación causada por la reflexión del suelo, en este caso hay que considerar la radiación incidente neta (aporte difuso y directo).

Es la ecuación 3-38 la que permite tener un valor apropiado para la radiación incidente sobre una superficie inclinada en cualquier hora del día y cualquier día del año y que, por ende, será de gran ayuda para el trabajo a realizar. Con esta herramienta se puede determinar la ganancia energética en tiempos relativamente cortos, comparado con los registros solarimétricos actuales que comúnmente entregan datos de forma diaria, lo que produce que se pierda información importante como la evolución de la intensidad de la radiación a lo largo del día.

Capítulo 4

Construcción del programa

4.1. Discretización de la ruta

El primer parámetro que se debe definir es la ruta de estudio, pues en base a este camino se realizarán todos los análisis correspondientes de radiación absorbida.

En este caso en particular, se escoge el camino que une las ciudades de Valparaíso y Calama. La razón por la cual se selecciona esta ruta, es que al tratarse de un estudio sobre camiones que transportan combustibles, se asume que un viaje posible para estos vehículos es el de recibir la carga de LNG en Valparaíso, y transportar el combustible hacia las zonas mineras en las proximidades de Calama. No obstante, el programa es lo suficientemente flexible como para operar con cualquier ruta que se le ingrese, siempre y cuando se discretice de manera adecuada.



Figura 4-1: Ruta Valparaíso-Calama a analizar

Lo primero que se debe notar es que el análisis de la radiación se realiza sobre un punto determinado, pues se necesitan las coordenadas (latitud y longitud) para poder estimar la radiación incidente. Es por esto que se debe discretizar la ruta Valparaíso-Calama en una serie de puntos en los cuales se estudiará la radiación que llegue a la cisterna. Por lo tanto, la forma en la que se analizará el fenómeno no es continua, sino que se considerará que el camión se queda detenido en un punto de estudio una cierta cantidad de tiempo, durante el cual absorbe energía desde el Sol, y una vez terminado este tiempo “salta” hasta el próximo punto en donde ocurrirá lo mismo que en el paso anterior. De esta manera, se intenta simular el movimiento del camión mediante saltos y detenciones de este, en lapsos de tiempo que se ajusten a la duración real del viaje en cuestión.

Para realizar la discretización, se ingresa al visor de mapas de Google (Google Maps) accediendo a su vez a la categoría **MyMaps** de la aplicación. Aquí se traza la ruta de estudio (Valparaíso-Calama) para posteriormente guardar el mapa con el camino trazado. En esta misma aplicación se tiene la opción de guardar el mapa en formato **kml**, que es un tipo de archivo utilizado para discretizar un mapa y guardar los datos geográficos de una zona, en este caso la latitud y longitud del camino trazado. Dicho archivo puede a su vez ser exportado como un documento **gpx** en la página <https://www.gpsvisualizer.com>; este documento puede ser fácilmente convertido a formato **Excel xlsx** importando el documento **gpx** a <https://mygeodata.cloud/>. Este archivo xlsx contiene las coordenadas de latitud y longitud de cada punto que este contenido en el archivo kml logrando una discretización homogénea del camino a estudiar que sea comprensible para el programa a utilizar, ya que Python tiene la opción de leer y trabajar con archivos Excel.

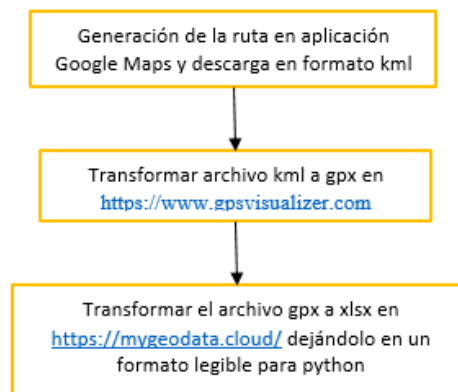


Figura 4-2: Procedimiento para generar datos de la ruta en formato legible

Para este caso en particular, al discretizar la ruta de 1471 [km] se obtiene un documento Excel de 13434 puntos con sus respectivas latitudes y longitudes, teniendo una separación promedio de 109 [m] entre ellos, por lo cual, se puede asumir que se dispone de una discretización bastante refinada considerando la extensión de la ruta.



Figura 4-3: Ruta discretizada

Con las coordenadas ya establecidas, es necesario tener la información geográfica sobre este nuevo camino que recorrerá el camión, pues como la ruta fue discretizada y por ende modificada, la distancia total cambiará. Además, se hace necesario determinar la distancia que existe entre dos puntos consecutivos. A causa de que los puntos están bastante próximos entre sí, es apropiado asumir que la curvatura de la Tierra tiene un rol despreciable en el cálculo de distancias, por lo tanto, se puede estimar la distancia entre puntos de manera pitagórica tal y como se hace en las coordenadas cartesianas.

Considerando que 1° sexagesimal terrestre corresponde a 111.31 [km], la distancia entre dos puntos se calcula de la siguiente forma.

$$distancia = \sqrt{((lat_1 - lat_2) * 111.31)^2 + ((long_1 - long_2) * 111.31)^2} \quad (4-1)$$

Donde los subíndices 1 y 2 corresponden al punto actual y posterior, respectivamente.

De esta manera se procede a calcular todas las distancias entre puntos consecutivos y así estimar la distancia total que recorrerá el camión en su camino, la cual corresponde a 1549.81 [km]. Esta estimación produce un error del 5.35% en la obtención de la longitud total de la ruta, lo cual se considera aceptable para los fines del estudio a realizar.

Al calcular las distancias, se encuentra que el valor máximo calculado para la separación entre dos puntos corresponde a 9.81 [km] lo que puede generar problemas en cálculos posteriores, ya que, al tener un valor considerablemente grande, no es factible ni apropiado despreciar el aporte de la curvatura terrestre. Sin embargo, a causa de que esto solo aplica a un punto del total de 13434, es correcto pensar que este error ocasionado no causará un impacto significativo en el cálculo total de radiación. Junto a esto, solo 70 puntos del total poseen una distancia mayor a los 2 [km] con respecto al punto siguiente, por lo cual, se concluye que la discretización generada tiene el refinamiento suficiente como para producir una base de datos confiable para el estudio a realizar.

El otro factor a considerar es la orientación que tendrá el camión al desplazarse, pues no es lo mismo si se mueve en dirección sur o norte, ya que, para un mismo instante de tiempo, si el vehículo se mueve en dirección norte, un lado “x” de la cisterna se calentará más que el otro, mientras que si viaja en dirección sur será el lado contrario el que se caliente más. La manera de determinar la orientación del camión es un poco más complicada. Primero que nada, se establece la referencia en base a la cual se medirá el grado de inclinación del camión, que en este caso corresponderá a una línea horizontal en dirección Este, tal como se muestra en la figura 4-4. Si el camión se dirige hacia el Norte, ya sea en sentido Este u Oeste, este tendrá una orientación positiva medida desde 0° a 180°, por otro lado, si se dirige hacia el Sur, la orientación será negativa desde 0° hasta 180°, independiente de si se dirige en sentido Este u Oeste.

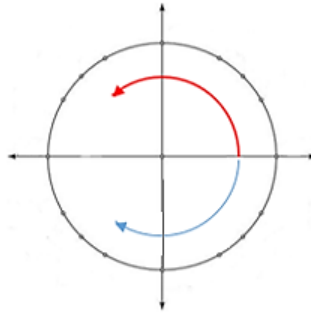


Figura 4-4: Sistema de medición de la orientación. Dirección roja positiva y dirección azul negativa

Considerando que solo se dispone de las coordenadas geográficas de los puntos y de la distancia entre ellos, se prosigue de la siguiente manera para poder estimar la orientación del camión en un punto arbitrario.

Hay que considerar las coordenadas del punto anterior ($i - 1$) y posterior ($i + 1$) al que se está analizando. Se calcula la diferencia entre la latitud y longitud de ambos puntos para obtener un delta de distancia en ambas direcciones ortogonales. Luego, se saca el cociente entre ambos diferenciales de distancia. Si se desprecia nuevamente la curvatura terrestre, es posible asumir que el cociente calculado corresponde a la tangente del ángulo plano que se forma entre los puntos ($i + 1$) y ($i - 1$). Además, la poca distancia que existe entre los puntos discretizados (en comparación con la distancia total del trayecto) genera que la orientación de la recta que une los puntos anterior y posterior al analizado, sea similar a la orientación real que posee este punto en cuestión, tal como se muestra en la figura 4-5. Por esta razón, para efectos del presente trabajo se asume que la orientación que posee el camión en un punto arbitrario (i) corresponde a la arcotangente del cociente entre las diferencias de latitud y longitud.

Es necesario hacer notar que la forma en la cual se calcula la orientación del vehículo genera un problema para el primer y último punto de la ruta, pues estos no poseen punto anterior ni posterior respectivamente. Lo que se hace en estos casos, es simplemente calcular las diferencias entre el punto analizado y el más próximo a este, es decir, para el inicial la diferencia se calcula entre i e $i + 1$, y para el punto final se usan i e $i - 1$.

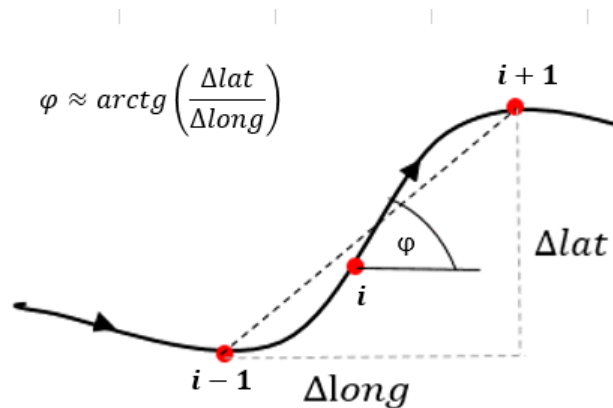


Figura 4-5: Esquematización del cálculo de la orientación del vehículo para un punto i

4.2. Base de datos.

En el archivo Excel que se utilizará como base de datos para el programa se ha adicionado hasta ahora, información sobre las distancias entre puntos, distancia recorrida acumulada desde el origen y orientación del vehículo en el punto estudiado. Dicha información está disponible para cada punto de la discretización junto con sus coordenadas respectivas.

Ahora falta incorporar a este documento registros sobre la radiación solar incidente en los puntos a trabajar. Se necesita de esta información para determinar los índices de claridad de cada ubicación a estudiar, ya que una parte viene proporcionada por los cálculos numéricos (ecuación 3-29) y la otra se obtiene directamente de los registros solarimétricos del lugar. Sin embargo, no hay manera de calcular estos valores, ni patrones que seguir para obtener su valor, pues son mediciones empíricas de la intensidad radiativa de un lugar.

Para tal propósito, se utiliza el “Explorador Solar” del Ministerio de Energía que despliega información climática (entre ella radiación solar promedio diaria) para cualquier coordenada del territorio chileno terrestre comprendido entre las latitudes -17° y -56° , además de Isla de Pascua y la isla Robinson Crusoe. La información proporcionada por esta página ha sido corroborada con mediciones de un total de 140 estaciones (67 de alta calidad y 73 de baja calidad) ubicadas en distintas zonas de Chile que miden radiación global horizontal.

Tabla 4-1: Número de estaciones usadas en la validación, promedio del sesgo y error cuadrático medio de las medidas tomadas. Recuperado de [19]

Zona	Estaciones	SESGO[%]	RMSE[%]
Norte	24	-1.3	5.7
Centro	26	-0.4	9.6
Sur	17	0.9	16.7
TOTAL	67	-0.38	10.0

Como se puede apreciar en la tabla 4-1, el error calculado para la validación del modelo es inferior al 10% en las zonas Norte y Centro, lo cual es ideal para este caso, pues son las zonas utilizadas para las simulaciones del trabajo presentado.

La razón por la cual se escoge este programa en lugar de otros que predicen niveles de radiación para cualquier zona de la Tierra es a causa de las peculiaridades climáticas del país. El Norte de Chile es bien conocido por su excepcional disponibilidad de radiación solar. Esta zona se ve favorecida por la poca atenuación atmosférica que se opone al paso de los rayos solares, teniendo un índice de claridad anual promedio cercano a 0.72, lo que implica sobre 300 días con un clima de “día claro”, es decir, sin nubes que afecten la radiación solar incidente. Además, es destacable el señalar que dicho índice de claridad promedio se encuentra cercano al máximo mundial equivalente a 0.8 [20]. Por lo expuesto anteriormente, es que se escoge un programa de simulación de clima que este especialmente diseñado para el país.

Ahora bien, para poder registrar la información solar en cada punto de la ruta discretizada, dentro del sitio se debe ingresar las coordenadas del punto en el cual se desea conocer los valores de radiación promedio, tal como se muestra en la referencia 1 de la figura 4-6. Una vez hecho esto, se despliega un gráfico con los valores de radiación en su componente directa y difusa para el punto solicitado, como se puede apreciar en la referencia 2 de la misma imagen. Es la información de radiación total (directa y difusa) la cual se incorporará al Excel de datos para cada mes del año.



Figura 4-6: Vista principal del Explorador Solar

El tener que realizar la tarea de buscar las estadísticas para cada uno de los 13434 puntos es una tarea tediosa y poco práctica, considerando que hay mejores opciones. Es por eso, que mediante la interpolación de ciertos puntos cuya información sobre la radiación incidente es conocida, se obtendrá el resto de los valores de la serie discretizada.

En este caso, los puntos cuyas coordenadas se ingresarán al registro solarimétrico para obtener información, se encuentran separados a una distancia aproximada de 20 [km]. Comenzando desde el origen (Valparaíso); luego se obtiene información del punto que se encuentra a 20 [km] de Valparaíso, después el que se encuentra a una distancia acumulada de 40[km] y así sucesivamente hasta llegar a los 1549 [km], obteniéndose un total de 75 puntos en los cuales se conocerá la radiación mensual promedio para todos los meses del año. La vista del mapa con los 75 puntos en los cuales se tendrá información real del registro solarimétrico se encuentra en el anexo B.

Ahora bien, como la interpolación depende de dos variables (latitud y longitud), es más conveniente operar con la distancia entre puntos calculada según la ecuación 4-1. Por lo tanto, se interpolan los datos de la siguiente manera.

Sean los puntos (i) e $(i + 1)$, uno de los 75 puntos que contienen información real sobre la radiación incidente, y un punto intermedio k cuyas coordenadas se conocen y en donde se desea

saber cuánta es la radiación que incide sobre él. Como se interpolará en base a la distancia a la que se encuentre el punto k respecto a uno de los 75 puntos de los cuales se posee información, es necesario determinar cuál es la medida de dicho tramo para cada punto k que se encuentre entre (i) e $(i + 1)$ y compararla con la distancia entre los dos puntos extremos, para así generar una función peso que pondere ambos valores de radiación mensual de modo que se ajusten al punto k . Dicho planteamiento se resume en la ecuación 4-2.

$$H(x_k, y_k) = \omega H(x_{i+1}, y_{i+1}) + (1 - \omega)H(x_i, y_i) \quad (4-2)$$

En donde $H(x_k, y_k)$ corresponde a la radiación global horizontal sobre el punto k en un determinado mes, y ω representa la función peso que consiste básicamente en el cociente entre la distancia que une los puntos i y k , y la distancia total entre los puntos ya conocidos, tal como se señala en la ecuación 4-3.

$$\omega = \frac{l}{L} = \frac{\sqrt{((lat_k - lat_i) * 111.31)^2 + ((long_k - long_i) * 111.31)^2}}{\sqrt{((lat_{i+1} - lat_i) * 111.31)^2 + ((long_{i+1} - long_i) * 111.31)^2}} \quad (4-3)$$

Para mostrar de mejor manera las distancias involucradas en la interpolación de la radiación, se adjunta un esquema ilustrativo en la figura 4-7, que detalla tales distancias para un par de puntos arbitrarios.

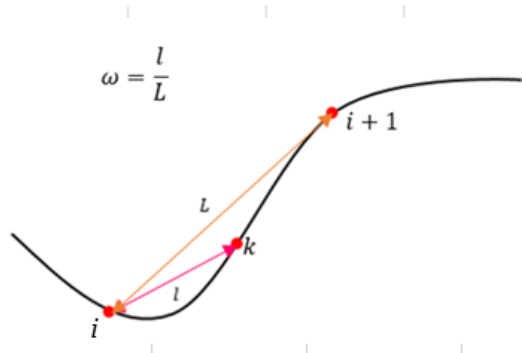


Figura 4-7: Interpolación de la radiación

Este procedimiento se aplica para todos los puntos en los cuales no se dispone de información, y se aplica para todos los meses del año

Con esto ya se posee de un archivo completo con los datos suficientes para empezar a trabajar. Esta planilla contiene las coordenadas de los 13434 puntos discretizados, la distancia entre dicho punto y el consecutivo, la distancia acumulada desde Valparaíso, la orientación que tendrá el vehículo en dicho punto y la radiación horizontal global promedio en esa ubicación para los 12 meses del año.

4.3. Definición de parámetros de entrada y salida

Como ya se dispone de toda la información necesaria para el cálculo de la radiación sobre la cisterna, ahora se debe diseñar el programa computacional que desarrolle dicha función, y definir cuál es la información de entrada necesaria para el cálculo, así como también, los resultados que arroje este programa.

Con respecto a los datos de entrada necesarios para el programa, se hace referencia a toda la información que debe ser fijada de antemano antes de iniciar cualquier cálculo. Dicho esto, los parámetros de entrada que se deben definir con anterioridad son.

- **Fecha:** incluyendo el día y el mes en el cual inicia su viaje el camión.
- **Hora de salida del camión:** se debe fijar la hora de salida del vehículo, en esta instancia se considera la hora satelital (hora usada para un territorio geográfico específico, sin considerar las diferencias entre longitudes terrestres).
- **Velocidad del móvil:** en este caso se van a presentar dos modalidades las cuales se detallarán en las secciones siguientes. Primero, se hará un estudio simplificado bajo la modalidad de velocidad constante, por lo cual se debe fijar un valor como dato de entrada. Luego, se hará un estudio más realista, en donde se tendrá una velocidad variable, la cual será calculada por el programa a partir de un valor promedio de velocidad, el cual debe quedar definido al inicio del cálculo.

Por otro lado, una vez ingresados estos datos, y luego de que el programa realice los cálculos correspondientes, se obtienen datos de salida o resultados, los cuales se entregan en un archivo Excel. Tales datos se desglosan a continuación.

- **Radiación incidente por cara:** entrega la energía total incidente por unidad de área para cada cara del estanque, clasificada además en el aporte directo, difuso y reflejado. La cantidad de elementos de esta lista dependerá de la cantidad de caras que posea el manto de la cisterna.
- **Radiación instantánea:** para cada punto de la ruta discretizada se da una lista con la radiación que fue captada por la cisterna en dicho punto durante un periodo de tiempo estándar, junto con el desglose del aporte directo, difuso y reflejado.
- **Acumulación de la radiación:** se obtiene como resultado una lista con la radiación que se va acumulando a medida que el camión avanza por su camino, este caso es simplemente la versión acumulada del ítem anterior.
- **Velocidad:** es aplicable al análisis con velocidad variable. En estos casos se obtiene como entregable una lista de la velocidad instantánea del camión en todos los puntos estudiados al momento de ejecutar el programa.
- **Evolución del índice de claridad:** se muestra también esta información para cada punto estudiado en la simulación, con el fin de comprender el grado de atenuación que sufre la radiación en todo el trayecto.

En base a lo expuesto anteriormente, el programa se puede resumir como una función que toma datos de entrada y los convierte en parámetros de salida tal como se expone en la figura 4-8.



Figura 4-8: Esquematización del programa

4.4. Estructura general del algoritmo.

La forma en la cual va a trabajar este programa viene definida directamente por el orden en el cual se describió el marco teórico. Primero se definen todas las variables espaciales y temporales, luego se evalúa la atenuación causada por la atmósfera mediante modelos de clima sintético, y en base a esto se determinan valores de radiación diaria y horaria. No obstante, se necesita detallar de mejor manera la forma en la cual el código va a operar.

Primero, se fijan los parámetros de entrada (hora, fecha y velocidad), luego de esto se establece el refinamiento que se le va a hacer a la cisterna del camión, pues al tratarse de un cilindro se vuelve muy complejo el análisis de radiación desde el punto de vista geométrico. Por esta razón, se aproxima la cisterna a un prisma regular de 8, 16 o 32 caras, con el propósito de conocer el refinamiento apropiado de la geometría que permita obtener resultados con el mínimo error de cálculo posible. El dimensionamiento de estos prismas se realizó en base al plano de la cisterna de un camión que transporta LNG, el cual se puede encontrar en el anexo C.

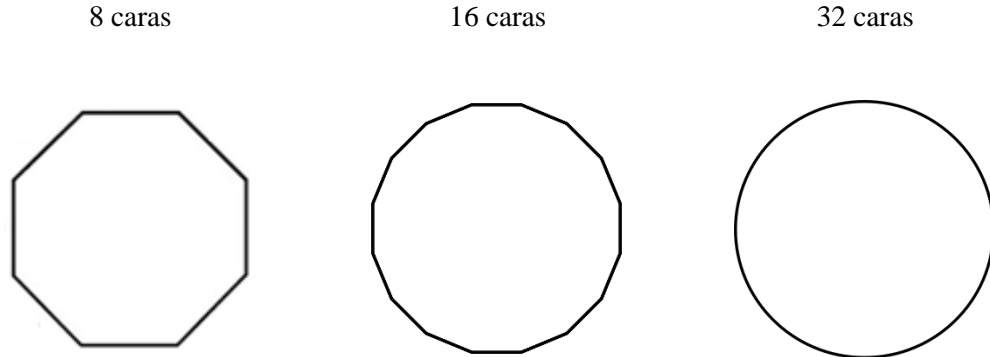


Figura 4-9: Geometrías basales

Más adelante se probarán los 3 refinamientos de malla en un mismo estudio para determinar cuál es la geometría más apropiada a usar, considerando el error generado respecto a la geometría anterior (8 caras vs 16 caras y 16 caras vs 32 caras) pero también considerando que mientras más caras tenga el polígono más largo será el proceso de cálculo.

Cuando ya se tiene definida la geometría a usar, automáticamente se fijan los ángulos de inclinaciones y azimutales de cada cara. Esto ocurre para fijar la posición de las caras del

polígono al principio; y es en base a estos datos que se irá calculando la orientación de cada superficie a medida que el camión avance.

Para ejemplificar el cálculo de los ángulos de inclinación se toma como ejemplo el polígono más simple que contiene un total de 8 caras.

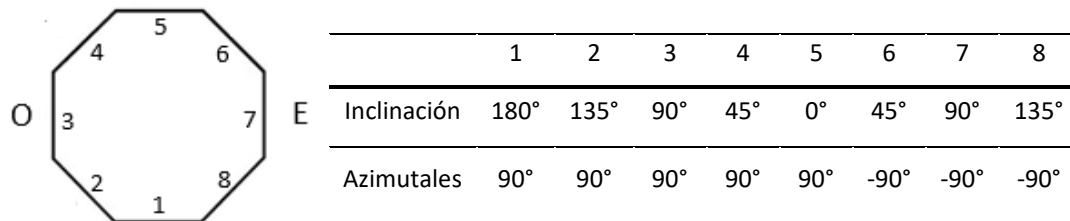


Figura 4-10: Detalles de ángulos para la geometría de 8 caras

Con respecto a las inclinaciones, se debe recordar que estas se miden respecto a la horizontal, por lo tanto, el hecho de que la cara 1 posea un valor de 180° significa que se encuentra mirando hacia abajo. En contraste con la cara 5, cuya inclinación es 0° y apunta hacia arriba. En el caso de los ángulos azimutales, estos se miden en el plano terrestre y representan el grado de desviación que posee un objeto con el eje Norte-Sur, entonces se considera que las caras de la 1 a la 5 giran 90° para quedar en sentido Oeste, mientras que de la 6 a la 8 giran -90° para quedar en sentido Este. El hecho de que el giro hacia el Este se indique como negativo, se debe a la manera en la cual se define el ángulo azimutal de superficie.

Para los polígonos de 16 y 32 caras, los ángulos de inclinación y azimutal de superficie se encuentran en el anexo D.

Una vez definidos los parámetros de entrada y la geometría con la cual se va a trabajar, se procede a programar las funciones que ejecutará el programa al momento de trabajar, las cuales ya fueron definidas de manera conceptual en el fundamento teórico, y se ejecutarán en la misma secuencia en que fueron definidas en ese capítulo. Primero se definen los parámetros geométricos que permiten obtener el ángulo de incidencia, luego con este valor se procede a calcular la radiación solar diaria promedio mensual. Posteriormente, se determina el índice de claridad promedio, en base al cual se determinarán los K_t para cada día del mes en cuestión. Con este valor se definen en el programa las funciones de radiación diaria total y difusa, y a

continuación las funciones de radiación horaria total y difusa con las cuales se determinará el valor total de radiación que incide sobre la superficie a evaluar.

Todos los parámetros mencionados anteriormente tendrán sus funciones, que ira ejecutando el programa de manera secuencial para el cálculo de radiación sobre el camión. Pero no siempre se ejecutarán todas las funciones, o en algunos casos se añadirán funciones extra dependiendo de si se fija una velocidad constante o variable.

El hecho de que el programa realice simulaciones con velocidad tanto variable como constante, complica la implementación de un código que se adapte a ambas condiciones, pues gran parte del cálculo a realizar depende fuertemente del valor de la velocidad en el punto. Por lo que se decide crear códigos diferentes para cada situación.

Se tendrán tres versiones diferentes del código. Una en donde el camión se moverá a velocidad constante. Luego un código en donde la velocidad será variable, pero su valor no será calculado mediante una función determinista, sino que se generarán valores aleatorios en cada punto de la ruta los cuales oscilarán en un cierto rango de acuerdo a las velocidades que comúnmente tienen los vehículos en caminos interurbanos. La última versión corresponde a un itinerario de viaje para el camión, que vendría siendo el caso que más se ajusta a la realidad. Consiste en un modelo de velocidad variable idéntico al anterior, pero con la diferencia de que es posible programar detenciones del móvil, las cuales se ajustan en base a la hora del día. Por ejemplo, si el conductor debe detenerse a las 5 horas de manejo para descansar y el camión sale a las 8:00, entonces el programa a las 13:00 seteará una velocidad de $0 \left[\frac{km}{h} \right]$, lo que indicará que el vehículo no se mueve. Esta última versión representa de mejor manera el comportamiento de un viaje estándar, pues usualmente en viajes de larga duración el conductor debe detenerse ya sea para comer, descansar, entre otros.

La manera en la que se desarrollará cada versión del programa se detalla a continuación.

4.4.1. Velocidad constante.

Teniendo definidas todas las funciones a utilizar, lo primero que se debe hacer es transformar la información contenida en la base de datos del archivo Excel a una forma admisible para el programa. Cabe recordar que dicho archivo correspondía a las coordenadas, distancia acumulada desde el origen, orientación y nivel de radiación solar para todos los meses del año, para un total de 14343 puntos. Para esto, simplemente se transforma el archivo Excel estándar que se genera por defecto a un archivo Excel separado por comas. Sin embargo, no se utilizarán todos los puntos de la ruta, sino que se tomarán en cuenta solo los puntos que estén distanciados una longitud equivalente a la recorrida por el camión en un periodo de tiempo a acordar.

Se considera que un periodo de 5 minutos es un buen refinamiento temporal para el caso a estudiar, pues la medida mínima de radiación calculada corresponde a energía incidente sobre una hora. No obstante, el hacer cálculos cada una hora produce que la simulación del camión moviéndose pierda credibilidad, ya que los saltos de un punto a otro serían demasiado grandes. Por otro lado, una división excesiva de este tipo de radiación (en segundos por ejemplo) pierde exactitud, ya que se estaría tratando de generar datos instantáneos a partir de datos horarios.

En base a esto, y considerando como tiempo de separación entre puntos un lapso de 5 minutos, la cantidad de puntos a utilizar viene dada por la siguiente fórmula.

$$cantidad\ de\ puntos = \frac{distancia\ total[km]}{\left(\frac{velocidad}{12}\right)[km]} \quad (4-4)$$

La distancia total corresponde al total recorrido por el móvil en toda la ruta discretizada que equivale a 1549.81 [km], y la velocidad se incorpora como dato de entrada para luego dividirla por 12 entregando como resultado la cantidad de kilómetros recorrida en un lapso de 5 minutos. Por ejemplo, si el camión se mueve a $90 \left[\frac{km}{h}\right]$, la cantidad de puntos será de 206.6, pero como se trabaja con valores enteros, este número se trunca y se trabajaría con 206 puntos de la ruta, los cuales estarían distribuidos de forma relativamente equiespaciada a lo largo del camino.

Ahora es necesario encontrar cuales serán tales puntos por los cuales pasará el camión en su trayecto de acuerdo a la velocidad fijada. Esto se hace simplemente mediante un ciclo

comparativo (comando *for*) dentro del programa con todos los puntos de la ruta. En donde al principio se pregunta si el punto de la ruta posee una distancia acumulada mayor o igual que la recorrida por el móvil en 5 minutos. Si la respuesta es no se prosigue al siguiente, y así hasta encontrar un punto que satisfaga la condición mencionada. Una vez cumplido esto, se registra toda la información de dicho punto (coordenadas, distancia acumulada, orientación del móvil y registros solares para los 12 meses) en listas creadas dentro del programa. Luego se procede a buscar el siguiente punto que tenga una distancia recorrida mayor o igual que la recorrida por el camión en un periodo de 10 minutos; y así sucesivamente hasta tener todos los puntos para realizar el estudio. Con esto se toma como finalizado el proceso de transformación de la información desde el archivo Excel hasta un modo legible por el programa.

Ahora se comienza a definir la parte del código que calculará la radiación incidente sobre la cisterna del camión en todo su trayecto. Primero, se crean 5 listas vacías para la salida, las cuales se definen a continuación.

- **Energía difusa:** lista que contendrá los valores de la radiación aportada por el cielo y las nubes. La extensión de esta viene dada por la cantidad de caras que contenga el polígono, es decir, la lista puede ser de 8, 16 o 32 elementos.
- **Energía directa:** es la lista que contiene el aporte proporcionado por los rayos solares que no son absorbidos ni dispersados por la atmósfera. Al igual que el caso de energía difusa, la extensión de esta lista viene dada por la cantidad de caras que contenga el polígono.
- **Energía reflejada:** lista que contiene el aporte radiativo suministrado por el suelo al reflejar parte de la radiación incidente. La extensión de la lista también viene condicionada por la cantidad de caras del polígono.
- **Energía instantánea:** contendrá el aporte de la radiación directa, difusa y reflejada sobre todas las caras de la cisterna. La finalidad de esta lista es tener la radiación neta que incide sobre la cisterna durante 5 minutos en una posición fija.
- **Energía acumulada:** el primer elemento de esta lista es la suma de las energías totales correspondientes a cada cara del polígono en el primer punto. El segundo elemento corresponderá al resultado anterior, pero agregando la sumatoria de las energías calculada en el segundo punto de la ruta. Por lo tanto, la cantidad de elementos que contenga es igual a la cantidad de puntos calculada en la ecuación 4-4.

Posterior a la definición de estas cinco listas, se procede a programar la manera en la cual se desarrollarán los saltos de tiempo, para de esta forma ir actualizando la hora también. Como se dijo anteriormente, la distancia que separa a dos puntos consecutivos en el caso de velocidad constante, es la equivalente a la recorrida por el camión en 5 minutos. Entonces, por cada punto estudiado, se considerará un tiempo de 5 minutos gastado. A pesar de la simplicidad que se aprecia al principio, hay que considerar todos los posibles casos que se pueden generar por un cambio de 5 minutos. Con esto se hace referencia a casos en donde tal lapso de tiempo genere un cambio de día, de mes o incluso de año; todas estas posibilidades se encuentran desglosadas y detalladas en el código del programa. Cabe destacar que este cálculo de la hora se encuentra dentro de un loop que se repetirá tantas veces como puntos extraídos del archivo Excel se tengan. Por ejemplo, para el caso del camión que se mueve a $90 \left[\frac{km}{h} \right]$ se debe calcular la hora un total de 206 veces, una para cada punto a tratar.

Con el control de la hora listo, se procede a estructurar la forma de cálculo. Para esto se vuelve a generar una estructura anidada (comando *for*) que estaría dentro del loop mencionado anteriormente, pero este se calcularía tantas veces como caras contenga el polígono, pues en este caso se está en un punto fijo, pero hay que hacer cálculos para cada una de las superficies laterales de la cisterna. Una vez definido el límite del loop, se colocan las listas que contienen las inclinaciones y las orientaciones del camión que están definidas al inicio del programa. No obstante, el ángulo de azimut con el cual se mide la orientación se evalúa respecto del Sur, y la orientación de la ruta esta medida a partir del sentido Este. Para dejar la orientación neta de acuerdo a la regla que usa el azimut de superficie (que es finalmente la regla con la cual se hacen todos los cálculos correspondientes) la forma en la cual se medirá la orientación del camión, es que a la orientación inicial de la cara se le resta la orientación de la ruta, pues esta última se mide en sentido contrario a la forma en la cual se mide el azimut, y a ese valor se le suma 90° para mover el eje de referencia Este hacia el eje Sur.

$$\textit{orientación real} = \textit{orientación cara} - \textit{orientación ruta} + 90 \quad (4-5)$$

A continuación, se realiza el desglose básico de las funciones que se ejecutarán una vez que lo anterior ya haya sido seteado.

Se calcula el ángulo de incidencia promedio para el mes. Con este valor se calcula la radiación diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal, luego se obtiene el valor de la

radiación diaria mensual real generada a partir del registro solarimétrico. Este valor de radiación se multiplica por 3600000 para transformarlo de kWh a Joules. Posteriormente estos dos valores se dividen obteniendo un índice de claridad promedio el cual se ingresa a la función de distribución de índices de claridad generando todos estos coeficientes para cada día del mes en cuestión. Con los valores de K_t ya calculados, se procede a determinar todos los valores de radiación necesarios en la siguiente secuencia: radiación diaria, radiación diaria difusa, radiación horaria y por último radiación horaria difusa. Con todo esto se calcula el coeficiente de superficies inclinadas (R), para finalmente determinar el valor de la radiación total sobre una de las caras de la cisterna en un punto determinado. Este procedimiento se realiza tantas veces como caras tenga la cisterna y finalmente para el punto estudiado se calcula la radiación total ganada por la cisterna, la cual se adiciona a la lista de energía acumulada y energía instantánea.

A medida que el programa funciona se van obteniendo valores de radiación para cada punto en cada cara. Por lo tanto, si para fines de análisis se requiriese, puede crearse una lista adicional que vaya guardando la energía que se va absorbiendo en cada punto, lo que podría servir, por ejemplo, para identificar las zonas geográficas en donde una cara se calienta más que las otras, y de esta manera tener resguardos adicionales en esos casos. Pero como el objetivo de este estudio es tener un conocimiento general de la ganancia térmica del camión, es suficiente con los resultados finales que fueron definidos con anterioridad.

Junto a las listas antes mencionadas, se agrega además como entregable una lista especial para el registro de los índices de claridad. La extensión de esta será igual a la cantidad de puntos utilizados para la simulación, para así entender el nivel de atenuación en cada zona estudiada. Además, tener esta información visible ya sea como gráfico o como tabla es muy útil para ir corroborando que tan altos son los índices de claridad en comparación con los registrados a nivel mundial.

Para entender de mejor manera como se ejecuta el programa en el caso de velocidad constante se tiene el siguiente diagrama de flujo que sintetiza su funcionamiento. En donde “i” representa la posición de un punto de la ruta, y “j” representa la posición de una cara en la cisterna, ambos iniciando desde un valor cero.

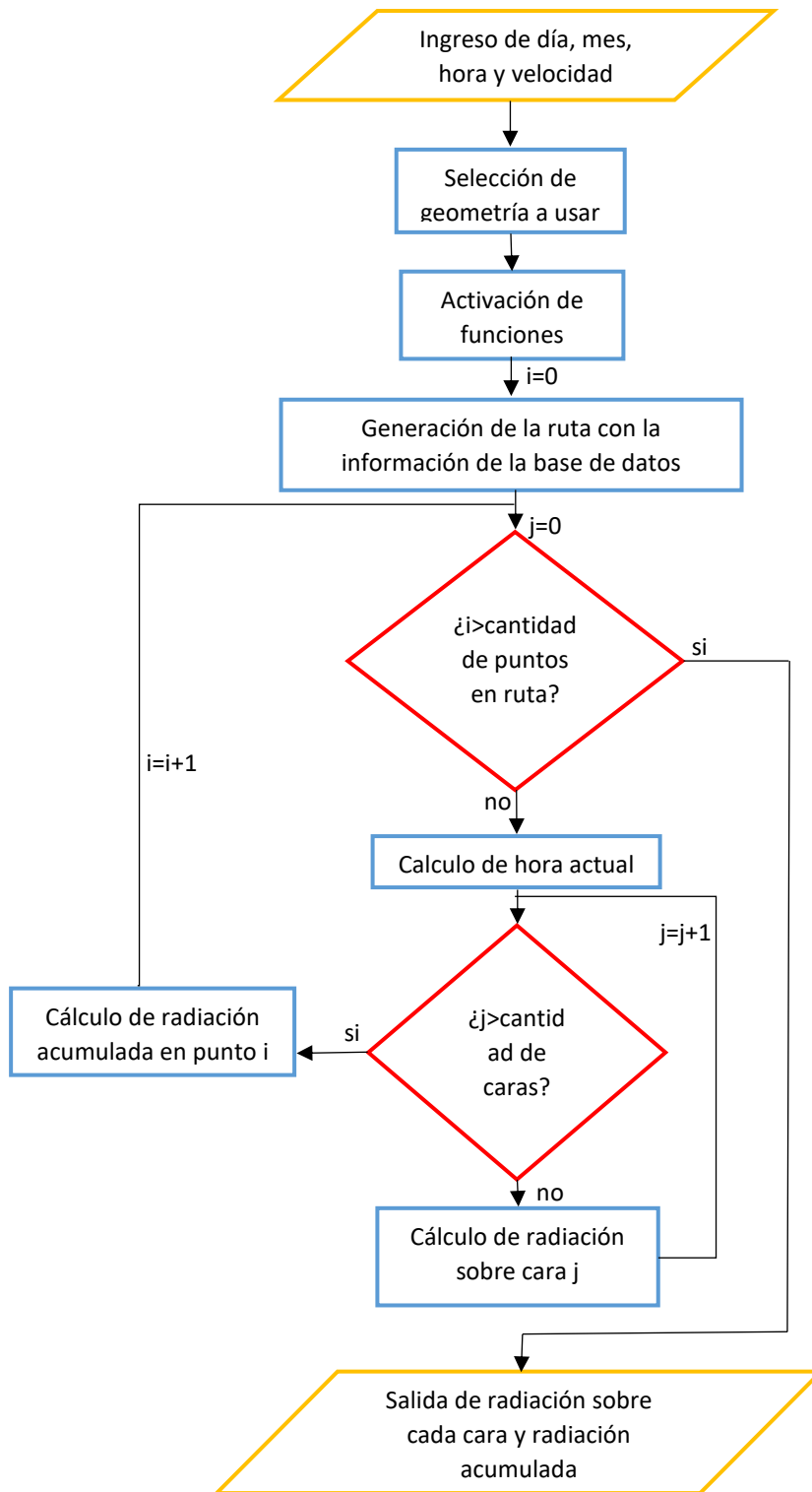


Figura 4-11: Diagrama de flujo del algoritmo funcionando a velocidad constante

4.4.2. Velocidad variable.

El modo en el cual opera esta versión es bastante similar a la anterior, lo único que cambia es la influencia que tiene la velocidad en el cálculo de todas las funciones del programa.

Lo primero que se puede notar es que el modo de calcular la cantidad de puntos a evaluar en el caso anterior falla aquí, pues como se puede observar en la ecuación 4-4, la velocidad debe ser fija para que se pueda obtener un resultado. Por lo que se hace necesario determinar una forma diferente para encontrar cuáles serán los puntos a evaluar.

Antes de todo, hay que explicar la manera en la cual se calculará la velocidad. La rapidez con la que se mueve un móvil siempre oscila en un cierto rango dependiendo de las restricciones viales que posea la ruta, por ende, no es posible describirla de forma determinista mediante una función estándar. En vez de eso se aplica un modelo probabilístico basado en la aplicación de números al azar. En base a un valor promedio que debe ser ingresado, y a cotas superiores e inferiores se tendrá un espectro de posibles velocidades, entonces, en cada punto a analizar, la velocidad en tal locación se obtendrá con una función probabilística que escoge aleatoriamente un valor de rapidez dentro del conjunto de posibles velocidades.

Ahora bien, para calcular los puntos a estudiar se procede de la siguiente manera. Sea un cierto punto en donde ya se conoce la velocidad aleatoria asignada, la distancia recorrida por el móvil en un lapso de 5 minutos será simplemente multiplicar el valor de la rapidez por el tiempo. No obstante, eso presenta un problema, pues no es posible garantizar que una vez que el camión se traslada dicha distancia quede situado en alguno de los 13434 puntos discretizados. Por lo tanto, se busca el valor más cercano al calculado y se deja ese punto como el destino siguiente del móvil. Luego se extrae toda la información de dicho punto que se encuentra contenida en la base de datos y se procede con el siguiente punto. De esta manera, al igual que en el caso de velocidad constante, se obtiene el listado de puntos con el cual se va a trabajar antes de que se empiecen a calcular las distintas funciones dentro del programa, la única diferencia es que en este caso los puntos no necesariamente estarán equiespaciados.

Hay que tener en cuenta además, que en este escenario como resultado de salida también se tiene una lista con la velocidad obtenida en cada punto estudiado, para conocer el comportamiento que tuvo el camión durante la simulación.

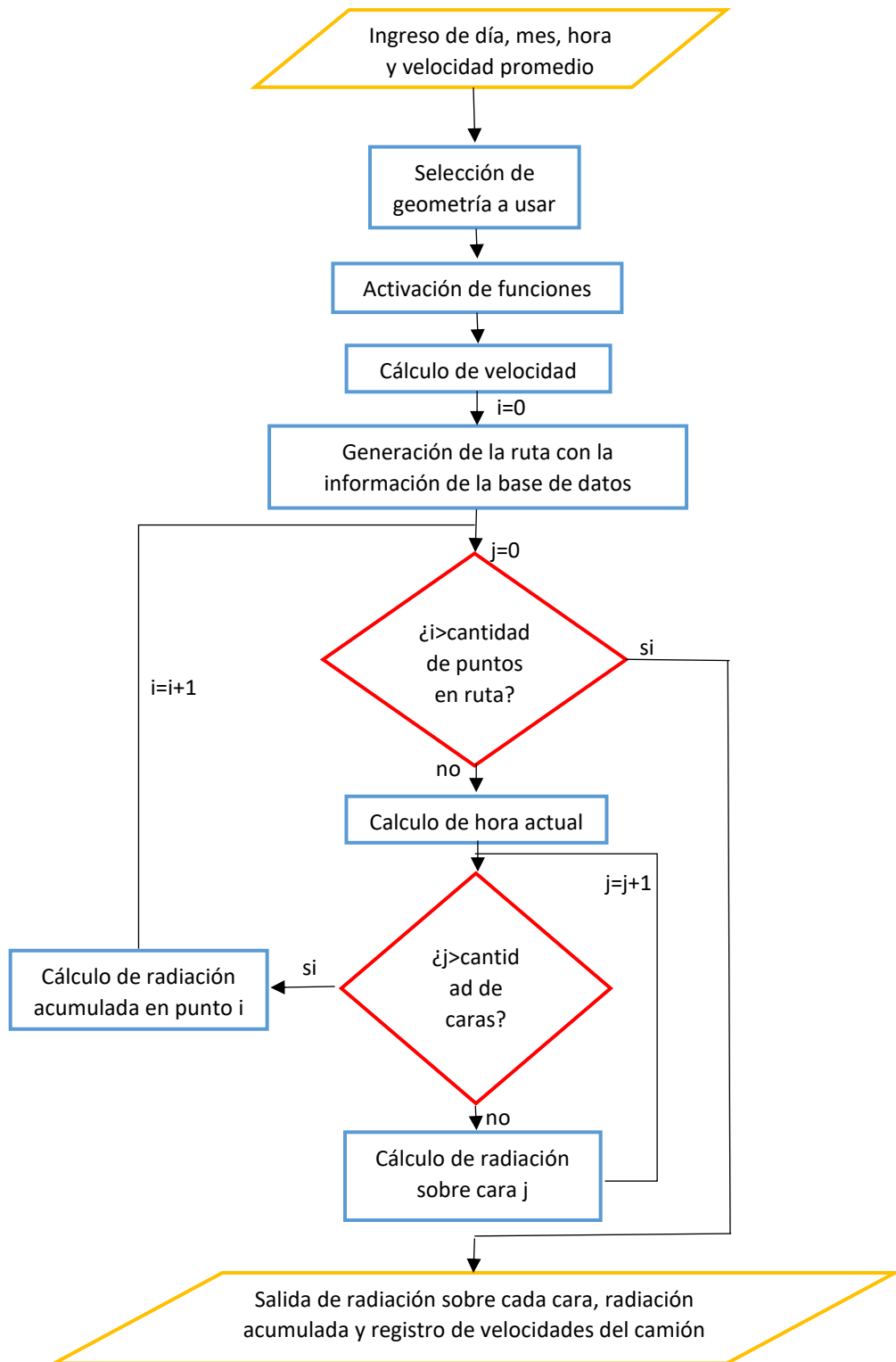


Figura 4-12: Diagrama de flujo del algoritmo funcionando a velocidad variable

4.4.3. Itinerario de viaje.

Este es el caso más complejo de programar, pero también el más realista, ya que aquí es posible simular detenciones del vehículo durante ciertos periodos de tiempo. Lo que se ajusta bastante a la realidad, pues es normal que el conductor deba detenerse cada cierto periodo de conducción para descansar.

La forma en la cual se generará el itinerario de viaje del camión es en función de la hora. Se deberá agregar como dato de entrada el parámetro de rapidez al igual que la versión de velocidad constante. No obstante, en el caso del itinerario no se asignará un valor fijo a este parámetro, sino que se definirá una función por tramos. En esta función, para ciertas horas el camión tendrá una velocidad promedio v_1 previamente ingresada, en torno a la cual se generarán valores de velocidad aleatorios que rondan en torno a dicho promedio. Durante otro segmento de horas el vehículo poseerá otra velocidad promedio v_2 que también fue ingresada, en base a la cual se calcularán valores de rapidez al azar, y así sucesivamente con todos los tramos horarios que se utilicen. Por lo tanto, la velocidad pasa a ser función de la hora.

La dependencia de la velocidad con la hora imposibilita que se pueda generar una lista previa de los puntos a utilizar. Esto porque la manera en la que se generaba dicha lista en los modelos anteriores era que, en base a la velocidad que tenía el móvil, se estimaba el siguiente punto en función de la distancia que recorrería en un viaje de 5 minutos, y posterior a esto se ingresaba al loop de cálculo de radiación dentro del cual se iba modificando la hora. Esta dependencia velocidad-hora obliga a que el cálculo de velocidad y, por ende, la generación de la lista de puntos se realice dentro del loop de cálculo de radiación.

Lo mencionado anteriormente produce que este código deba ser estructurado de manera diferente a los otros dos casos anteriores. Con respecto a los datos de entrada, se procede de forma similar al caso de velocidad constante solo que ahora no se le asigna un valor preciso, sino que se establece una función con diferentes velocidades promedios en función de la hora del día. Luego se crean listas vacías para contener todos los parámetros del archivo de datos (coordenadas, orientación, distancia recorrida y datos de radiación). Posterior a esto se ingresa al loop en donde se calculará la hora y luego la velocidad. Con este último dato es posible encontrar el punto a evaluar dentro de la ruta y automáticamente se ingresan los datos correspondientes al punto en las listas vacías que se crearon previamente. Teniendo esta

información, se procede a calcular las funciones de radiación para el punto en todas las caras de la cisterna, y una vez terminado se guarda la información en las listas correspondientes. Luego de que esto se haya realizado se procede a repetir todos los pasos anteriores para el siguiente punto del loop.

Como no se conocen en primera instancia la cantidad de puntos a discretizar, se empleará un comando *while* cuya condición de funcionamiento será que la distancia recorrida sea menor a la distancia total de la ruta. Una vez que esto se deja de cumplir se cierra el loop y se entregan los resultados correspondientes en formato Excel, al igual que en los casos anteriores.

Los entregables de este modelo son idénticos a los del caso anterior. Junto a los registros de energía acumulada e instantánea de la cisterna, se adjuntará un registro para la evolución del índice de claridad y otro que contenga los valores de las velocidades del camión en los distintos puntos evaluados dentro de la ruta.

Entonces, según lo mencionado anteriormente el diagrama de flujo de la ejecución del programa queda ilustrado en la figura 4-13. Considerando que d.a. y d.r. corresponden a la distancia acumulada y distancia recorrida respectivamente, en donde la primera variable comenzará con un valor de cero.

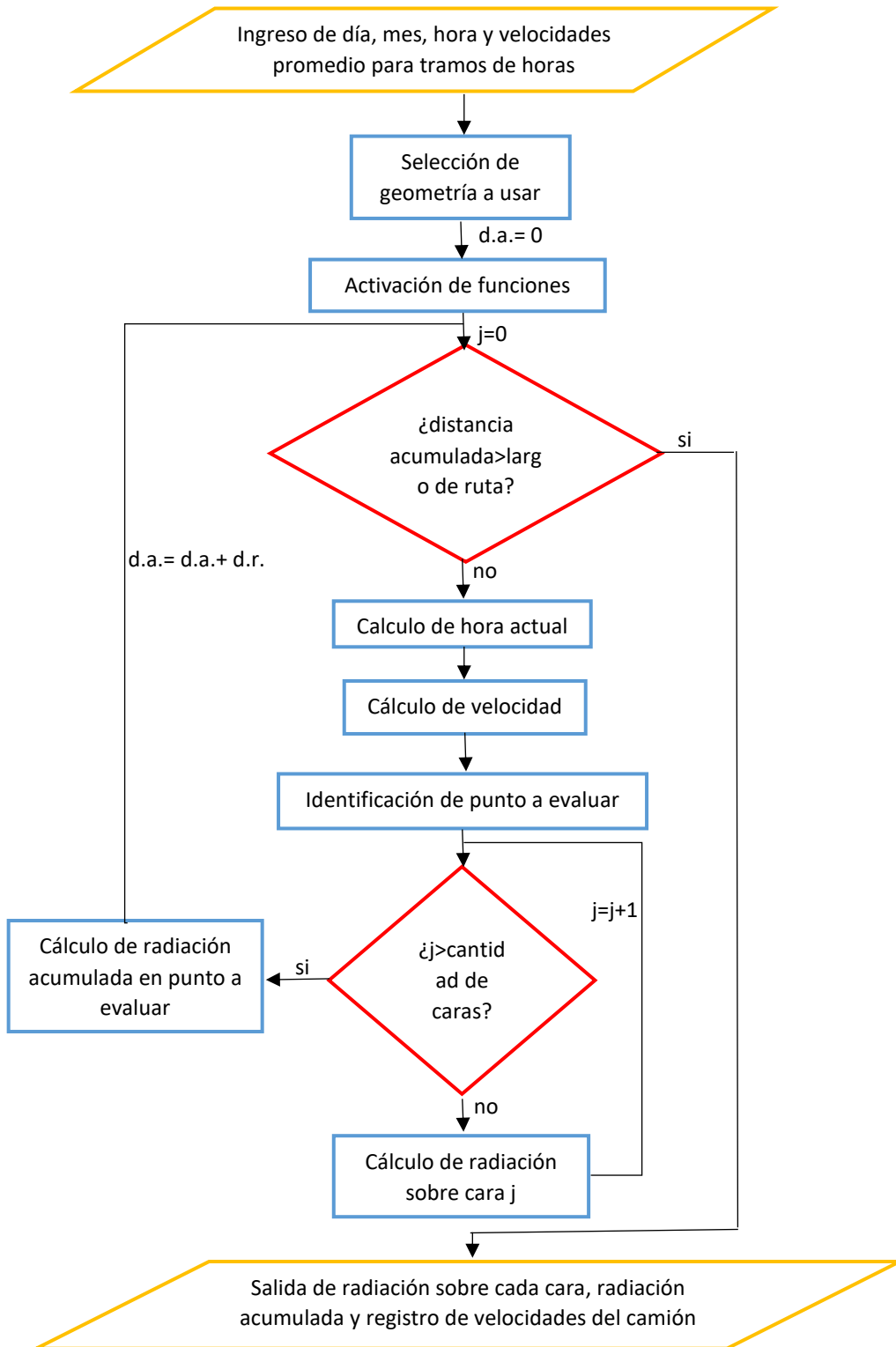


Figura 4-13: Diagrama de flujo del algoritmo funcionando como itinerario de viaje

4.4.4. Criterios adicionales de funcionamiento

Uno de los criterios más relevantes a tener en cuenta en las simulaciones a ejecutar es el grado de concordancia del cálculo de los índices de claridad con respecto al modelo de clima sintético a utilizar, especialmente cuando el camión se encuentre en la zona norte del país.

Como ya se mencionó, el índice de claridad promedio de la zona norte del país se encuentra muy cercano al máximo global registrado, con valores de 0.72 y 0.8 respectivamente. Considerando que el modelo de clima sintético empleado se basa en análisis estadísticos a nivel mundial, es necesario revisar que tan bien se ajustarán los datos calculados al modelo establecido.

Analizando la ecuación 3-16 para el índice de claridad máximo, es posible notar que existe una cota superior para su valor, la cual corresponde exactamente a 0.861.

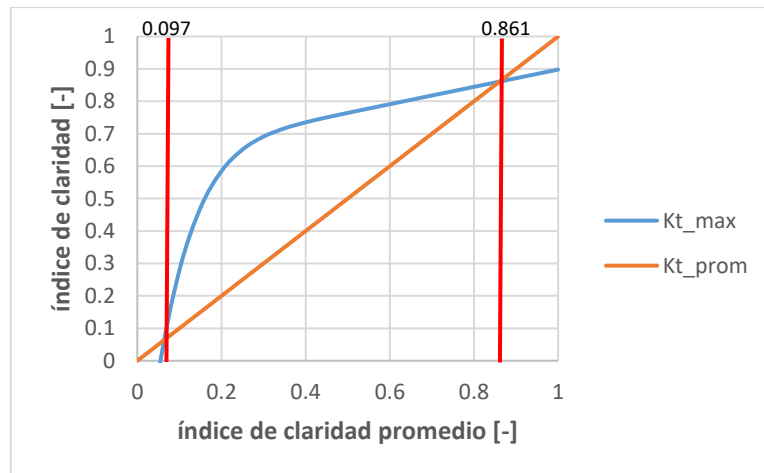


Gráfico 4-1: Rango de validez para el cálculo de \overline{K}_t

Para valores promedio superiores a esta cota, \overline{K}_t pasa a ser superior al máximo permisible tal como se muestra en el gráfico 4-1. Lo anterior genera discrepancias en los cálculos a realizar, y como consecuencia, el modelo de clima sintético diverge entregando resultados sin lógica. A causa de la posibilidad de que durante la simulación se genere un \overline{K}_t mayor a la cota permitida es que se deben evaluar las correcciones necesarias al modelo usado. Actualmente no existe un modelo de clima sintético adaptado para el clima de Chile, ni tampoco registros de índices de claridad que permitan estimar las cotas máximas de este parámetro en el territorio nacional.

Entonces, en ausencia de información disponible, la única manera para solucionar este problema es que cuando el valor promedio del índice de claridad sea superior al máximo predefinido por el estudio teórico, se iguale este último al promedio, tal como se ilustra en el gráfico 4-2. De esta forma se puede evitar la divergencia de los resultados a causa de la discrepancia entre los valores de este parámetro.

La otra cota que causa problemas es el límite inferior, en el cual $K_{t,max}$ empieza a adoptar valores negativos, lo cual no tiene sentido. No obstante, esto ocurre cuando $\bar{K}_t = 0.097$, por lo que no es necesario tomar medidas en este caso, pues debido a las características climáticas de Chile, es poco probable que el índice de claridad alcance este tipo de valores.

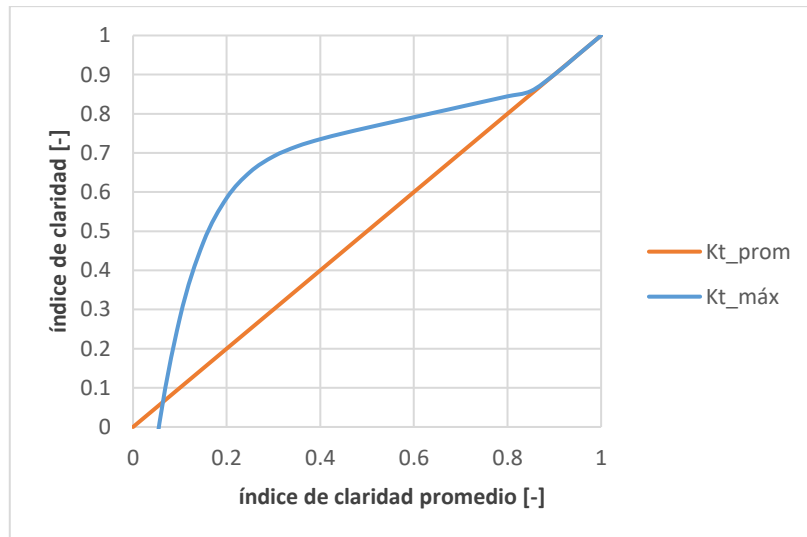


Gráfico 4-2: Modificación del rango de valores para $K_{t,max}$

Por lo tanto, la ecuación 3-16 se modifica de la siguiente manera.

$$K_{t,max} = \begin{cases} 0.631 + 0.267\bar{K}_t - 11.9 \cdot (0.75 - \bar{K}_t)^8, & \text{si } \bar{K}_t < 0.861 \\ \bar{K}_t, & \text{si } \bar{K}_t \geq 0.861 \end{cases} \quad (4-6)$$

El otro aspecto a considerar es la manera en la cual se calcula la radiación horaria difusa (I_d). De la ecuación 3-37 se extrae que este parámetro no se calcula como una fracción o porcentaje de la radiación horaria total (I), al contrario del caso diario (ecuaciones 3-30 a 3-33), sino que

se determina como un porcentaje de la radiación diaria difusa (H_d), dado por los ángulos de atardecer y ángulo horario.

La dependencia no directa de la radiación horaria difusa respecto de la total puede generar que se produzcan valores de I_d mayores que I , lo que a su vez ocasionaría valores de I_b negativos. Dentro de un mismo día, el factor que podría producir la situación antes mencionada es el comportamiento del ángulo horario, más en específico el factor $a + b\cos(h)$, pues es solo este valor el que diferencia las ecuaciones 3-34 y 3-37. Para horas cercanas al atardecer, h tiende a su valor máximo de 90° y por lo tanto $\cos(h)$ tiende a cero. Esto produce una reducción en el valor de la radiación horaria total para periodos del atardecer, lo cual tiene sentido. Sin embargo, I_d no contiene a este parámetro, y depende mayoritariamente del ángulo de atardecer, el cual es una magnitud fija para un día en particular. Entonces, para casos en donde H_d sea similar a H , lo cual ocurre para índices de claridad pequeños (inferiores a 0.4), existe la posibilidad de que durante el atardecer los valores calculados de I_d superen a I , y por más pequeña que sea esta diferencia se obtendrán valores negativos de radiación directa horaria, lo cual no tiene sentido físico.

Por lo tanto, se agrega en el programa la cláusula de que si la parte horaria difusa llega a superar a la total, se configure un valor de $I_b = 0$ e igualar las componentes difusa y total, es decir, $I = I_d$.

Capítulo 5

Estudio del caso base

Para los tres tipos de ejecución (velocidad constante, velocidad variable e itinerario de viaje) se empleará la misma ruta discretizada detallada anteriormente que une las localidades de Valparaíso y Calama. Además, es necesario determinar las velocidades que se usarán para la simulación. Para esto, hay que tener en cuenta que la normativa chilena restringe la velocidad de los vehículos en autopistas (caminos con dos o más pistas en un solo sentido) a $120 \left[\frac{km}{h} \right]$, debiendo reducir a $30 \left[\frac{km}{h} \right]$ cuando el móvil se encuentre en las cercanías de una escuela y sea horario de entrada o salida de los escolares. En base a lo anterior, asumir un valor de velocidad de $120 \left[\frac{km}{h} \right]$ sería algo exagerado, pues hay que considerar que se trata de simular la velocidad promedio a la cual se mueve el camión, y es evidente que este tendrá detenciones, o como mínimo reducciones de velocidad en zonas como curvas o las mismas escuelas. Por ende, es necesario disminuir este valor hacia uno más coherente que represente adecuadamente el movimiento promedio del móvil. Tomando como referencia que los buses interurbanos se trasladan a una velocidad cercana a los $100 \left[\frac{km}{h} \right]$, es aceptable asumir el supuesto de que un camión de carga se moverá a una rapidez similar. Entonces, se escogerá como velocidad de análisis un valor de $100 \left[\frac{km}{h} \right]$, y para comparar el comportamiento de las variables con otras simulaciones dentro de un mismo caso, se trabajará con velocidades de $90 \left[\frac{km}{h} \right]$ y $110 \left[\frac{km}{h} \right]$.

Se mostrarán los entregables obtenidos para los tres modos de ejecución en las secciones 5.1 y 5.2, luego en 5.3 se muestran los resultados obtenidos con el modelo de clima sintético basado en climas tropicales. Finalmente, se realizan 4 simulaciones de optimización en la sección 5.4 cuyo objetivo es extraer la ganancia energética de la cisterna del camión, y analizarla en diferentes escenarios para estudiar de mejor manera el comportamiento del fenómeno; y de

esta forma, poder implementar medidas para optimizar el viaje. Los análisis que se realizan en base a la información generada se detallan a continuación.

- **Dependencia de la velocidad:** como ya se mencionó, una de las variables a seleccionar es la velocidad, por ende, es de gran interés ver la cantidad de radiación captada por la cisterna en función de este parámetro. Para esto, dejando todas las otras variables de entrada constantes, se ira variando la velocidad en tres simulaciones diferentes. Una a $90 \left[\frac{km}{h} \right]$, $100 \left[\frac{km}{h} \right]$ y $110 \left[\frac{km}{h} \right]$ respectivamente, para determinar qué tan factible es viajar más rápido, pues el sentido común nos señala que mientras más rápido se viaje, menor será el tiempo de exposición del vehículo y, por ende, menor será la radiación absorbida. No obstante, es necesario determinar cuál es la disminución real de la radiación que incide en el camión para concluir si vale la pena trasladarse a velocidades tan altas.
- **Dependencia de la hora de salida:** otro parámetro diferente a considerar, es la hora en la cual el camión sale de Valparaíso. A causa de que el patrón de radiación solar no es constante durante el día, no da lo mismo viajar durante la noche o durante la mañana, es evidente que, para una misma velocidad de viaje, la cisterna absorberá más radiación si viaja en periodos cercanos al mediodía, en comparación con otros escenarios. Para cuantificar tales variaciones, se realizarán simulaciones manteniendo todas las variables de entrada constantes excepto la hora de salida, tal dato se irá variando desde las 0:00 hrs hasta las 23:00 hrs, a razón de una hora por cada simulación. Por lo tanto, se obtendrán 23 valores de radiación para estudiar su comportamiento bajo un análisis temporal.
- **Dependencia del número de caras:** a pesar de que este estudio no aporta información relevante para los propósitos del trabajo, si es de gran utilidad para optimizar la cantidad de operaciones que realiza el programa, a modo de aprovechar al máximo su funcionamiento sin necesidad de desperdiciar tiempo extra en su ejecución.
- **Dependencia estacional:** aquí ocurre un fenómeno análogo a lo que sucede con la situación día-noche, no es lo mismo transportar combustible en verano que en invierno. Es evidente que para épocas más calurosas la ganancia de calor será mayor, pero no basta con aceptar esto, es necesario cuantificar las fluctuaciones que se sufren por este cambio.

A modo de simplificación, para poder calcular el perímetro del área transversal de la cisterna, se procede a dividir el volumen total de esta por su largo, obteniendo el valor del área transversal, con este valor es posible calcular el perímetro de la cara transversal y posteriormente el área del manto cilíndrico de la cisterna.

No se considerará el aporte superficial de las caras semielípticas, ni tampoco su aporte al largo de la cisterna. Primero, porque la forma que tienen estas tapas complica en gran medida el cálculo de la energía captada, además la tapa frontal usualmente se encuentra ensombrecida por la cabina del camión, y la cara trasera recibe radiación principalmente a causa del albedo del piso (la cual representa un porcentaje pequeño del total) a causa de su ubicación respecto al Sol a lo largo del camino. Por otro lado, la razón por la cual se desprecia el aporte al largo de la cisterna que entregan las tapas, es porque su largo es bastante pequeño comparado con la extensión total del estanque, por lo tanto, se opta por despreciar en su totalidad la radiación incidente en la tapa frontal y trasera de la cisterna.

Entonces, para estimar el perímetro de la cisterna y el consecuente ancho de lado del polígono que reemplazará a esta geometría, se multiplica el valor del diámetro de la cisterna por π , y luego se divide este valor por la cantidad de caras que contenga el polígono, obteniendo de esta manera los distintos anchos de cara.

Los valores dimensionales de la cisterna con los cuales se trabajará se detallan a continuación.

Tabla 5-1: Dimensiones de la cisterna a evaluar

Largo [m]	Ancho [m]		
	8 caras	16 caras	32 caras
12.574	1.017	0.5085	0.2543

Cabe destacar que los valores calculados en la tabla 5-1 se obtienen a partir de las dimensiones de una cisterna estándar para transporte de LNG, cuyo plano dimensional ese encuentra en el anexo C.

5.1. Caso base de velocidad constante

Como ya se explicó, este es el caso más simple con respecto a las otras simulaciones, pues se considera que el camión se trasladará a la misma velocidad durante todo el trayecto. Este escenario obviamente es bastante irreal, pero sirve como una primera aproximación del valor del fenómeno a tratar.

A continuación, se muestra un caso que ejemplifica de manera más gráfica los entregables del programa para el caso de velocidad constante. Se tomará una simulación de viaje para un camión con 8 caras, que se mueve a $100 \left[\frac{km}{h} \right]$ en promedio, y que sale de su destino el 23 de septiembre a las 8:00.

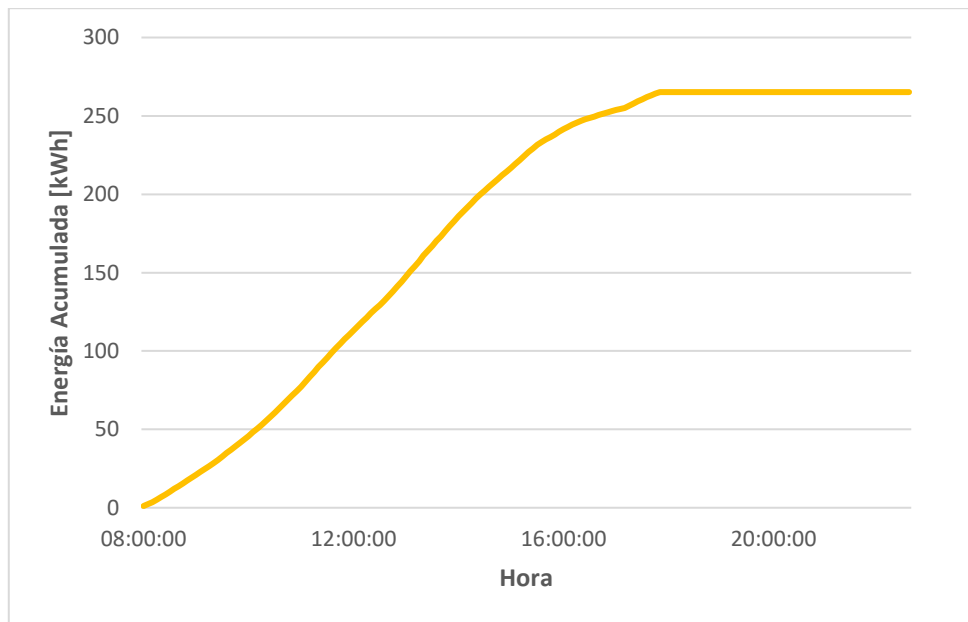


Gráfico 5-1: Energía acumulada sobre el camión durante el viaje

De acuerdo a la información suministrada por el gráfico 5-1, es posible determinar que la energía total que incide en el estanco durante todo el viaje corresponde a cerca de $270 [kWh]$ ($265.17[kWh]$ según el archivo Excel). Además, se puede notar que la captación de la radiación tiene un comportamiento casi lineal en un principio, y va decayendo asintóticamente a medida que se llega a la tarde, en donde a partir de las 18 horas aproximadamente, no se absorbe más radiación. Esto a causa de que a esa hora el Sol se encuentra “bajo el horizonte”,

por lo que ya no se recibe radiación de ningún tipo. No obstante, si se visualiza de mejor manera el gráfico, se puede apreciar una tendencia muy suave en donde la cantidad de radiación que incide en el camión va aumentando a una tasa cada vez más alta hasta llegar al mediodía, y luego a medida que el día transcurre, esta tasa de incidencia va disminuyendo de a poco hasta que, como ya se mencionó al llegar al atardecer, no incide más radiación sobre el tanque.

Hay que hacer notar el valor final de la energía que incide sobre la cisterna del camión. Evidentemente los 270[kWh] incidentes no serán totalmente absorbidos por el estanque, sino que, parte de esta energía se perderá a causa de la reflectividad de la cisterna, su capacidad aislante, entre otros. Sin embargo, un caso hipotético en donde el 50% de la radiación incidente fuera absorbida por el contenido de la cisterna, significaría una potencia promedio de 5.98[kW], pues el viaje duró 22.58 horas según el archivo Excel. Una analogía para esto es considerar que dentro del estanque del camión se encuentra un calefactor de 6[kW] funcionando a toda potencia durante todo el trayecto. Si bien, esta no es una situación real, las grandes cantidades de radiación incidente hacen necesario ejecutar un análisis térmico del combustible al interior de la cisterna, para determinar si se evapora o no parte de la carga.

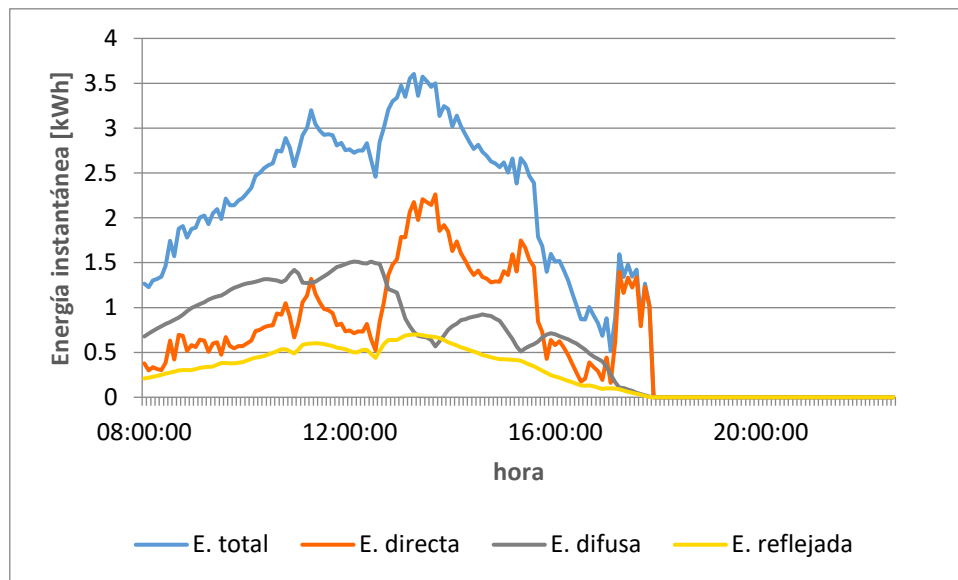


Gráfico 5-2: Energía instantánea sobre el camión clasificada según el tipo de radiación

El otro resultado que entrega el programa de simulación es un listado con los valores de radiación que incide sobre el tanque del camión en cada punto de la ruta discretizada para

lapsos de 5 minutos. Lo primero que se puede observar es que la curva de energía total sigue un comportamiento similar al del patrón de radiación solar durante el día, teniendo un máximo cerca del mediodía y disminuyendo su valor a medida que se acerca a las horas de amanecer y atardecer. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este gráfico se desarrolla a medida que el camión se mueve, de ahí que la forma de esta curva no se adapte totalmente al patrón solar, pues en cada punto de la ruta se tienen condiciones climáticas diferentes (índices de claridad) lo que se traduce necesariamente en resultados finales diferentes.

Con respecto a la radiación directa, se observa también un comportamiento parecido al patrón solar, no obstante, esta curva tiene peaks más pronunciados, lo que se debe fundamentalmente a la influencia de la orientación del camión. Este tipo de radiación se ve fuertemente determinada por la posición relativa entre los rayos solares y la superficie en cuestión, entonces a pesar de que se esté presente en un ambiente con alta radiación directa, si la superficie no está bien alineada con los rayos solares, la captación de energía será mínima. Por otro lado, se puede observar que en horas cercanas al atardecer se tiene un alza repentina de la radiación directa, siendo que de acuerdo a la teoría existente debería experimentarse una disminución sostenida hasta que el sol deje de iluminar en esa locación. Esto se debe principalmente a dos factores, por un lado, las condiciones de la zona norte son de consideración especial, los alrededores de esta locación destacan por tener altos índices de claridad (todos sobre 0.7 después de las 17:15 según el archivo Excel), lo que genera que incluso en horas cercanas al atardecer se experimenten radiaciones directas de alta magnitud a causa de la poca atenuación que esta experimenta. El segundo factor es obviamente la orientación del camión en la ruta. En la figura 5-1 se tienen 3 puntos A, B y C que representan la posición del camión a las 17:05, 17:10 y 17:15 respectivamente.

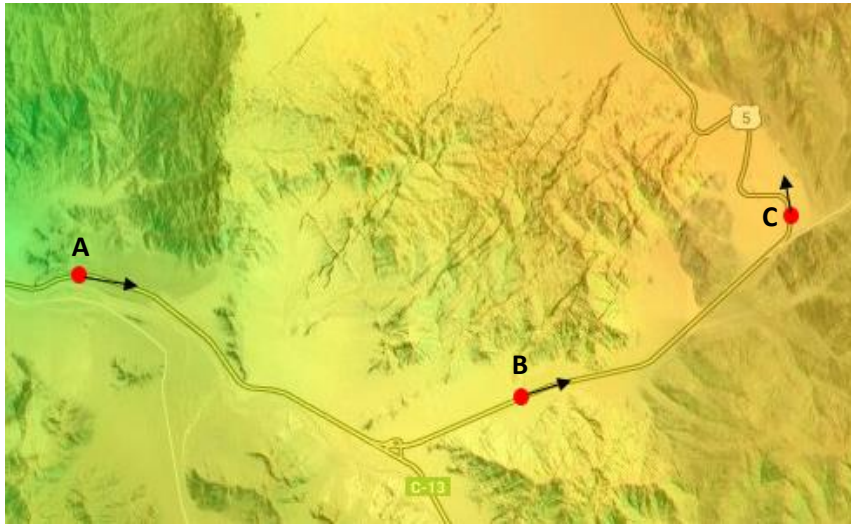


Figura 5-1: Mapa de parte de la ruta discretizada

Es a las 17:15 cuando la radiación directa genera un peak de energía, y como se puede observar, la dirección que mantiene el camión es fundamental para esto. En este punto el vehículo se mueve en sentido norte, por lo tanto, para horas del atardecer las caras que están a los costados de la cisterna reciben los rayos solares de forma casi perpendicular, produciendo un alto grado de incidencia. En cambio, cuando el camión se encuentra en las dos posiciones anteriores, este se encuentra viajando en sentido este, por lo que la radiación proveniente de forma directa impacta mayoritariamente sobre la placa trasera del camión, la cual no se ha discretizado y, por lo tanto, no se toma en cuenta para el cálculo de radiación del programa.

Con respecto al comportamiento de la radiación difusa, se tiene que a pesar de que también posee un comportamiento similar al del patrón solar, su gráfica es mucho más suavizada en comparación con la radiación directa. Esto se debe principalmente a que la orientación del camión tiene un rol despreciable, pues esta radiación proviene de todas direcciones, pasando a depender de forma más notoria del índice de claridad. Además, se muestra un comportamiento complementario con respecto a la radiación directa; cuando una sube su intensidad la otra baja y viceversa. Esto se debe a que la radiación difusa proviene de las nubes y otros gases de la atmósfera que absorben parte de la radiación proveniente del Sol. Entonces, para una mayor atenuación atmosférica (menor índice de claridad), mayor será la cantidad de radiación absorbida y re-emitida por estos gases hacia la superficie de estudio, es decir, en estas

situaciones la radiación directa disminuye por la atenuación, pero se favorece la generación de radiación difusa.

Finalmente, la radiación reflejada por el suelo o albedo es el aporte menos variable dentro de todo el espectro, esto a causa de que su valor es básicamente el producto del aporte radiativo de manera directa y difusa por un coeficiente de reflexividad que depende del tipo de suelo. Por ende, es simplemente la gráfica de radiación total atenuada a una menor escala. Se puede observar también que este valor representa el menor aporte de las tres componentes, contribuyendo con cerca del 19% de la radiación total que incide sobre la cisterna.

En base a este análisis, es posible deducir que en general, los tres tipos de radiación se ajustan de cierta forma al patrón solar estándar para una locación, incluso si consideramos que el camión se encuentra en estado de movimiento. Por lo que, se puede asumir que las condiciones climáticas no varían de manera muy fuerte a lo largo del trayecto. También se tiene que la radiación incidente sobre la cisterna se basa principalmente en el aporte directo y difuso, ya que el albedo proporciona un porcentaje bastante pequeño en comparación con las mencionadas anteriormente.

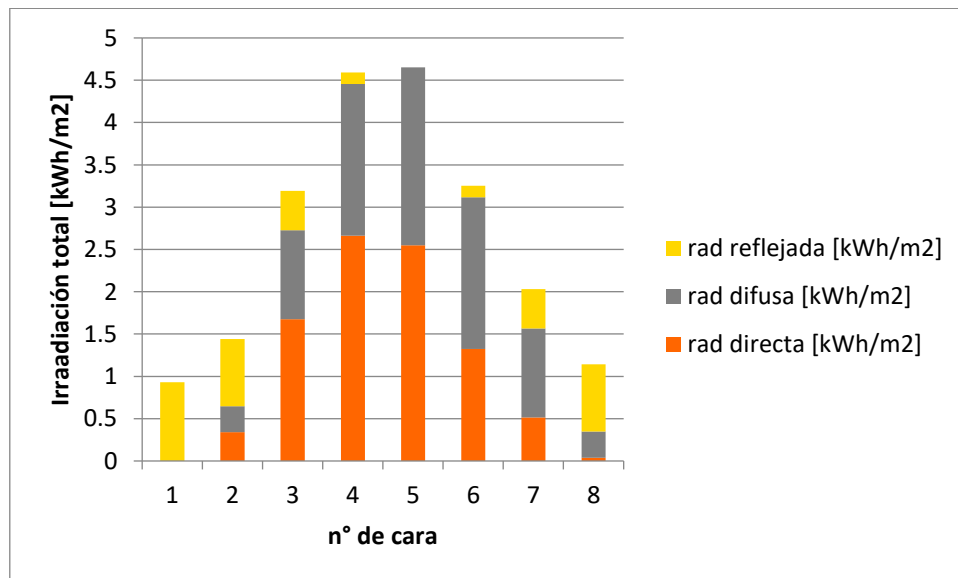


Gráfico 5-3: Distribución de la irradiación por cada cara del estanque

El tercer gráfico que entrega el programa es la radiación que incide sobre cada cara del polígono, y el tipo de aporte radiativo en cada caso. Cabe recordar que al momento de discretizar, la geometría se enumera desde la cara inferior y se cuenta en sentido horario, por lo tanto, la cara 1 representa la cara inferior y la cara 5 corresponderá a la superior.

Se puede observar que la superficie que recibe la mayor cantidad de radiación es la cara número 5, lo cual tiene sentido, porque esta superficie siempre se encuentra expuesta al Sol al estar orientada de forma horizontal y poseer un vector normal apuntando hacia arriba. Lo otro que se puede comentar respecto a esta cara es que no absorbe radiación reflejada, pues la cara no posee inclinación y por ende no puede incidir sobre ella la radiación proveniente del suelo. También el aporte directo y difuso son similares, y ambos encuentran su valor máximo en esta cara, mientras que la componente reflejada experimenta su mínimo aquí.

Un caso completamente contrario ocurre en la cara 1 (superficie cuyo vector normal apunta hacia el suelo). Aquí la única componente presente es la radiación reflejada, lo cual tiene sentido, pues el ángulo formado entre los rayos solares, ya sea provenientes del Sol o la atmósfera, y el vector normal de la superficie, siempre será mayor a 90° , por lo tanto, tales radiaciones nunca incidirán sobre esta cara.

Ahora, si se analiza el comportamiento global de la energía incidente y su variación respecto a la cara del polígono, se observa que el aporte directo y difuso aumentan a medida que nos acercamos a la cara superior, es decir, a medida que la inclinación se va acercando a cero, mientras que, por otro lado, la componente reflejada de la radiación total disminuye a medida que nos acercamos a la cara superior y tiene su máximo en la cara inferior. Esto a causa de que este tipo de radiación se ve favorecida en superficies que poseen una inclinación mayor a 90° , en otras palabras, se encuentran mirando hacia “abajo” con respecto a la trayectoria del Sol.

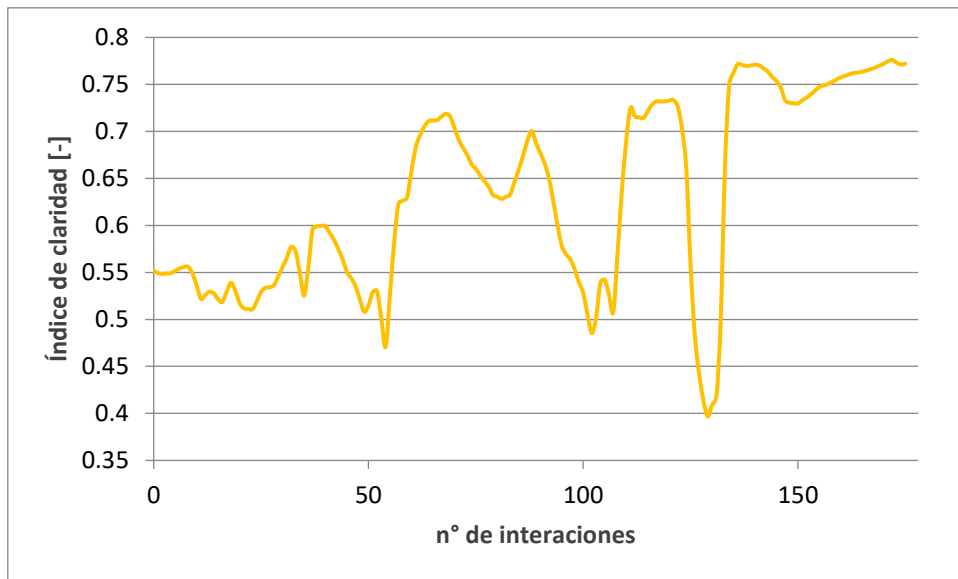


Gráfico 5-4: Evolución del índice de claridad en el trayecto

El último parámetro que entrega el programa seteado bajo velocidad constante es el comportamiento del índice de claridad a medida que el camión se desplaza.

En primera instancia se aprecia que, a pesar de su naturaleza oscilante, existe una tendencia de crecimiento de esta variable a medida que el camión se desplaza hacia el Norte. No obstante, es evidente la presencia de ciertos peaks, principalmente bajas precipitadas en ciertos puntos de la ruta. Para analizar esto en más detalle se busca en la hoja Excel que entrega el programa los registros de índices de claridad calculados para encontrar los puntos en los cuales ocurre el descenso precipitado de este parámetro. Al realizar esto, se encuentra que el valor mínimo del índice de claridad registrado corresponde a 0.396795 en el punto de coordenadas -25.16562 para latitud y -70.4482 para longitud.

Como se puede observar en la figura 5-2, el punto de menor índice de claridad está ubicado en una zona cercana al mar, en donde a pesar de la latitud se presencian bajos niveles de radiación, lo cual puede verse gráficamente en el indicador de intensidad de radiación que presenta la imagen. Este valor puede contrastarse con el nodo cuyo índice de claridad es de 0.660742, el cual se encuentra bastante cerca del punto anterior (a cuatro puntos discretizados de distancia o en otras palabras, 20 minutos) y presenta un K_t cuyo valor es casi el doble que el mínimo registrado.

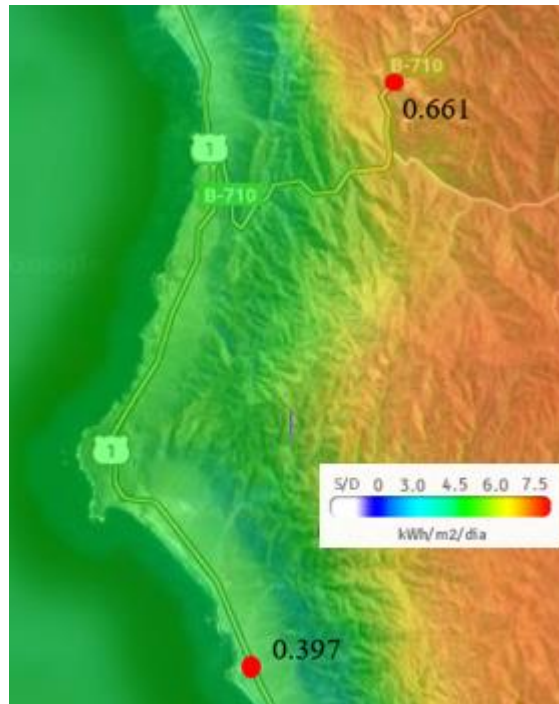


Figura 5-2: Mapa de parte costera de la ruta discretizada

Si se revisan los otros mínimos locales, también es posible notar que tales puntos se encuentran en general cercanos a la costa, en donde se presencian los menores valores de radiación.

Es posible explicar el comportamiento anómalo que presenta esta curva, afirmando que en general el comportamiento es ascendente a medida que el camión se traslada hacia el norte. Se registran además altos valores de K_t , los cuales se alcanzan al llegar a las zonas cercanas a Calama, llegando a valores por sobre 0.75 lo que se encuentra muy por encima de los valores registrados en el resto de los países.

Por otro lado, los descensos atípicos que sufre la curva se deben a que en esos instantes el móvil se encuentra en zonas cercanas a la costa, en donde existen niveles de humedad más altos que atenúan la radiación incidente, provocando un descenso considerablemente de esta. Esto se traduce en índices de claridad más bajos para dichos puntos. A medida que el móvil se aleja de la zona costera y vuelve a incorporarse a una ruta más ligada al continente se observa que el parámetro estudiado crece rápidamente hasta llegar a valores que son propios de la latitud estudiada.

5.2. Caso de velocidad variable

En este caso se tienen dos opciones, la primera de velocidad variable consiste en calcular valores aleatorios de rapidez a partir de un cierto promedio, el cual se pide como input del programa. Mientras que, la segunda opción correspondiente a un itinerario de viaje es una adaptación del caso de velocidad variable; la única diferencia es que se pide como dato de entrada fijar velocidades para ciertos rangos de tiempo. En particular se escogió como intervalos los rangos:

- Desde 6:00 hasta 12:00
- Desde 12:00 hasta 18:00
- Desde 18:00 hasta 0:00
- Desde 0:00 hasta 6:00

En cada uno de estos cuatro lapsos de tiempo se fija una velocidad promedio en torno a la cual se producen los valores aleatorios. La ventaja principal de esta versión es que es posible simular periodos de tiempo en donde el camión se encuentre detenido.

En ambas versiones, además de la información generada en las hojas Excel y los cuatros gráficos adjuntos, se agrega otra hoja Excel que muestra la velocidad del camión en cada punto de la ruta, junto con su gráfico respectivo.

5.2.1. Rango de velocidades a partir de un valor promedio

Es difícil estimar el intervalo de velocidades en el cual se moverá el móvil. Estudios realizados para determinar la velocidad de los vehículos en las carreteras basan sus análisis en una gran cantidad de factores dentro de los cuales se encuentran la cantidad y grado de curvatura de las diferentes curvas de la pista, la cantidad de vehículos estimada en el trayecto, las restricciones de velocidad, entre otros.

Como tales análisis se escapan del objetivo de este trabajo, se asume una variación apropiada para la velocidad del móvil correspondiente a $15 \left[\frac{km}{h} \right]$. Por lo tanto, el rango en el cual se moverá la rapidez es el siguiente

$$velocidad \in [v_{prom} - 15, v_{prom} + 15]$$

Se realizará una simulación al igual que para la versión de velocidad constante, desplegando los gráficos respectivos y analizándolos. Sin embargo, se evaluará con parámetros de entrada diferentes, para poder estudiar los cambios que la variación de parámetros genera en los resultados. Por lo tanto, se estudian los resultados de una simulación para un camión con 32 caras, que se mueve a $90 \left[\frac{km}{h} \right]$ como velocidad promedio, y que sale de su destino un 3 de febrero a las 16:30.

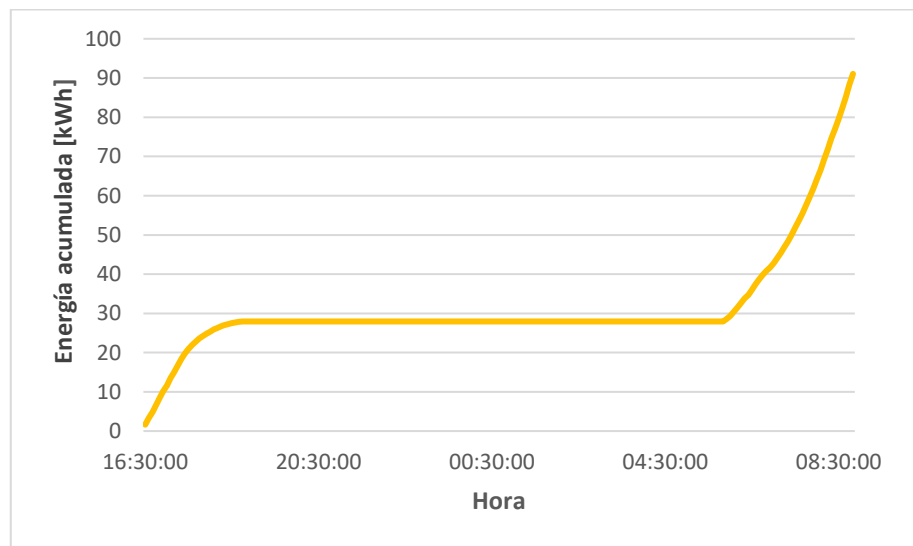


Gráfico 5-5: Energía acumulada sobre la cisterna

Se observa que también hay un comportamiento de crecimiento, pero en el periodo de tiempo correspondiente a la noche este valor se estanca, lo cual es coherente, pues durante la noche la radiación que llega a la superficie terrestre es prácticamente nula. Por otro lado, considerando que la simulación se realizó en febrero, uno de los meses más calurosos del año, se podría pensar que la energía que se acumula en el camión debería ser mayor que el caso de velocidad constante (simulación realizada en septiembre). No obstante, el valor en este caso es casi un tercio del registrado para la simulación anterior. Esto se debe tal como se mencionó, a que el camión viaja mayoritariamente por la noche, pues su hora de llegada a la ciudad de Calama es a las 8:50 horas según el archivo Excel.

Lo anterior da un primer indicio sobre la importancia de la hora de salida en la cantidad de radiación captada por el camión.

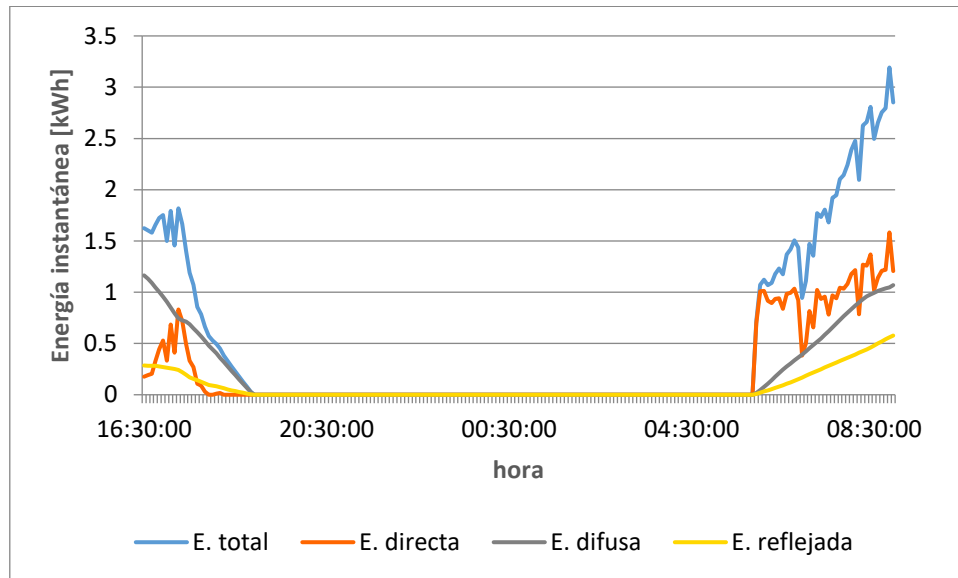


Gráfico 5-6: Energía instantánea sobre el camión clasificada según el tipo de radiación

Al igual que en el gráfico anterior, se aprecia que en las horas de noche ningún tipo de radiación aporta calor al camión.

La radiación difusa vuelve a tener una curva bastante suave al no depender de la orientación del camión. Por otro lado, la radiación directa y reflejada presentan un comportamiento similar si se les compara con el gráfico obtenido para la simulación a velocidad constante. En el caso de la componente directa, se observa que en las horas del amanecer se genera una alza inmediata y de gran magnitud, para luego decrecer abruptamente y volver a retomar un ritmo de crecimiento sostenido con peaks menores. Con el análisis realizado hasta ahora no es posible dar una explicación sobre este comportamiento, por lo que es necesario verificar cuales son los puntos en donde ocurre este ascenso y descenso repentino de radiación directa.

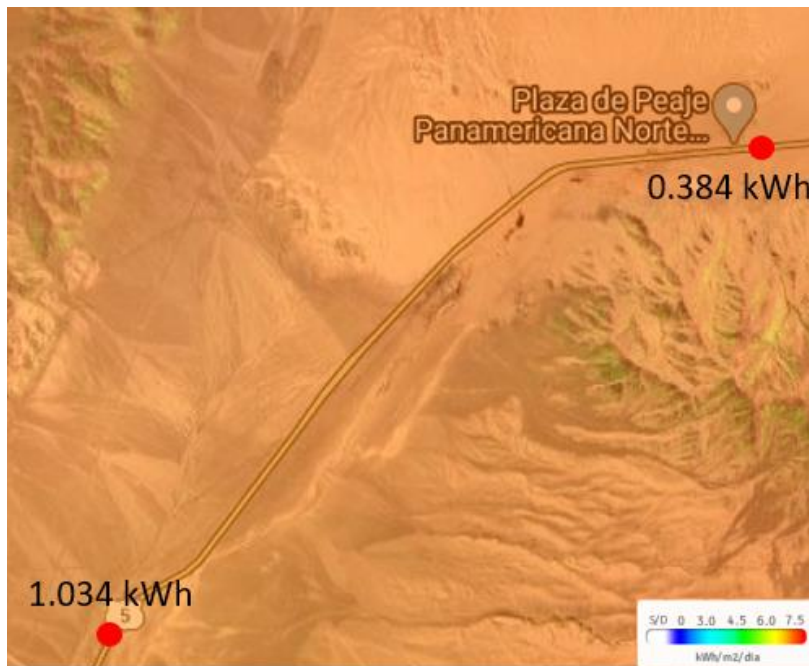


Figura 5-3: Mapa de zona con alto nivel de radiación de la ruta

Los dos puntos en la imagen representan el primer alza ($1.034[kWh]$) y el primer descenso abrupto ($0.384[kWh]$) después del amanecer.

A simple vista no se encuentra la explicación por medio del índice de claridad o latitud, ya que ambos puntos se encuentran en niveles de radiación similar, y ambos están lejos de la costa, por lo que su índice de claridad debería ser similar, y de hecho lo son con valores de 0.7334 para el punto de máximo local de radiación y 0.7354 para el mínimo local de radiación. Entonces, se procede a estudiar la orientación del camión. Observando con detención, es notorio que para el máximo local el camión tiene dirección norte y para el mínimo local este se mueve en dirección este aproximadamente, siendo entonces la orientación la causa del descenso abrupto.

Posterior a este punto mínimo, el camión seguirá en una dirección semejante al noreste, por lo cual la radiación directa pasa a estar determinada por la hora del día y el valor de los índices de claridad, en lugar de la orientación, pues esta última no cambiará notoriamente en lo que queda de ruta.

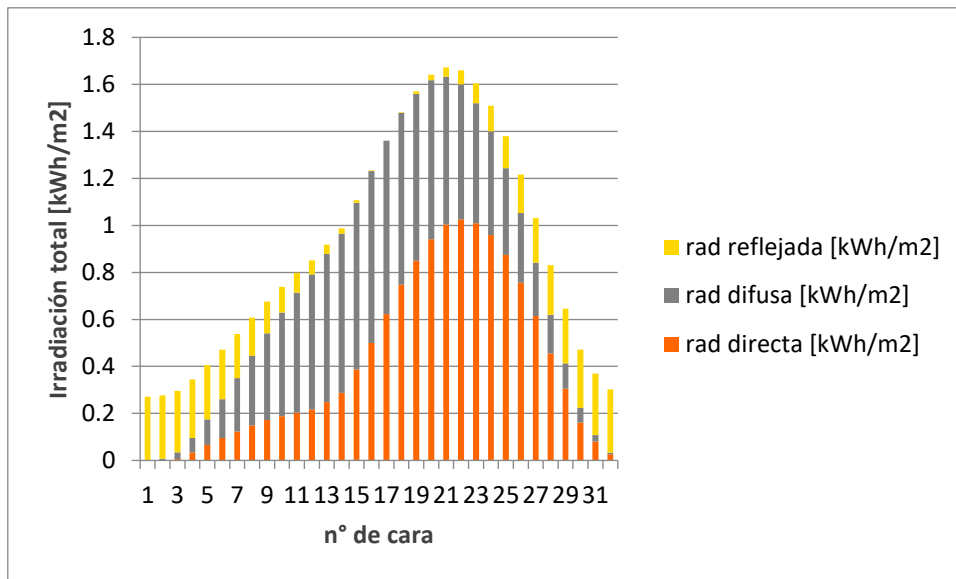


Gráfico 5-7: Distribución de la irradiación por cada cara del estanque

Observando el gráfico 5-7, al igual que para el generado en el caso de velocidad constante, se aprecia que la cara inferior (cara 1) solo presenta aporte de radiación reflejada, y la cara superior (cara 17) solo recibe aporte de energía difuso y directo, lo cual una vez más corrobora el modelo teórico que se está usando.

Por otro lado, se infiere de inmediato que el comportamiento es diferente al caso anterior en cuanto a la cara que posee máxima incidencia energética. Para el caso de velocidad constante, se muestra que la radiación máxima incide sobre la cara superior del camión, mientras que, para este caso, el máximo se desplaza hacia las caras más orientadas hacia la derecha.

La razón de esto radica en el periodo de viaje del camión. Para esta simulación, su tiempo de viaje es desde las 16:30 hasta las 8:55 del día siguiente, esto quiere decir que durante su viaje el camión “presencia” al Sol cuando este se oculta y durante un lapso de tiempo más largo después del amanecer. En ningún momento del viaje el Sol está ubicado exactamente sobre la cisterna, lo que explica que la máxima radiación no se encuentre en la cara superior, sino que se localice en uno de los costados de la cisterna.

El hecho de que la mayor cantidad de radiación incidente se concentre en la parte derecha se debe a que, el peak de radiación instantánea ocurre durante la mañana llegando a Calama. En tal momento, el camión se encuentra viajando en dirección norte o noreste, por lo tanto, son

las caras del lado derecho del camión (desde la 18 hasta la 32) las que reciben mayor incidencia de radiación, pues las del lado izquierdo se encuentran generando sombra.

El índice de claridad del estudio no vale la pena volverlo a analizar, pues se evidencia el mismo comportamiento que el caso anterior, solamente que en esta ocasión los valores disminuyen moviendo la curva hacia abajo, pero manteniendo su forma original.

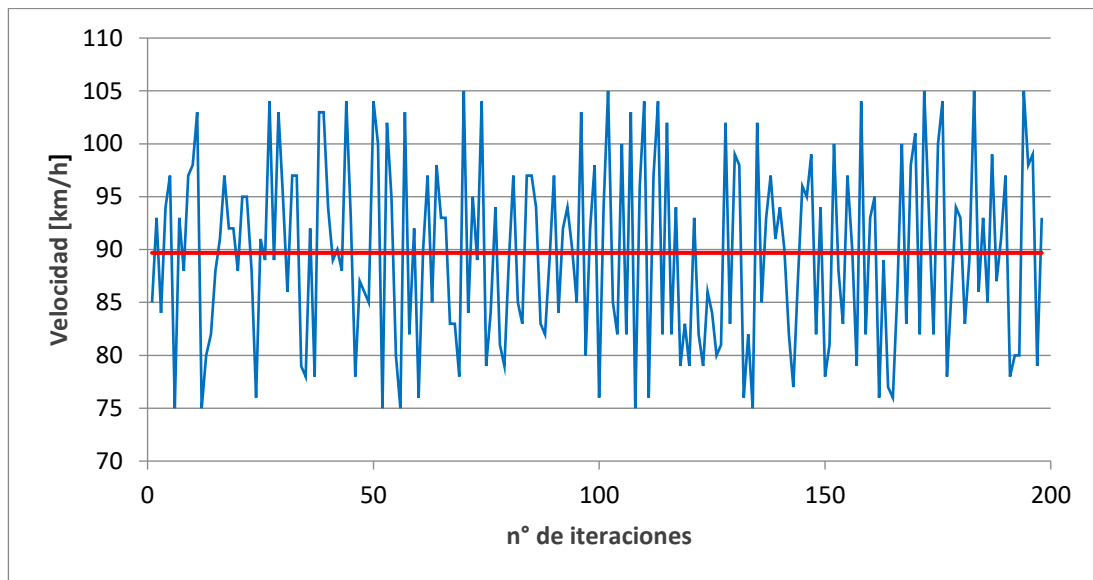


Gráfico 5-8: Distribución de velocidades en la ruta

Este gráfico es el nuevo ítem que incorpora la versión de velocidad variable. Se entrega en forma de hoja Excel con la velocidad en cada punto discretizado y un gráfico como el adjunto que muestra la información de forma visual.

Este es un panorama más realista que el anterior, ya que toma en cuenta que la rapidez del vehículo variará a lo largo de la ruta, ya sea porque pase por curvas, restricciones de velocidad, entre otras razones. Se puede observar que a pesar de la distribución aleatoria de la variable velocidad a lo largo de la ruta, en promedio se sigue teniendo un valor cercano al ingresado como input ($89.68 \left[\frac{km}{h} \right]$ para ser exactos). Por ende, se puede deducir, que esta versión presenta una mejora desde el punto de vista de una representación más exacta del fenómeno, pues a partir de un valor promedio se generan una serie de velocidades que producen variabilidad en el movimiento del camión, generando un resultado más realista y por ende confiable de la simulación.

5.2.2. Itinerario de viaje

Este es el escenario más confiable de los tres, pues incorpora una nueva actualización que permite cambiar la velocidad promedio del camión en función de la hora del día.

Para este caso en particular, se realizará una simulación considerando un periodo en el cual el conductor dormirá (velocidad nula) correspondiente al lapso entre las 0:00 y las 6:00. Para el resto del tiempo se escogen velocidades en función del posible valor promedio que se pudiera tener. Para el intervalo entre las 6:00 y las 12:00 el camión se moverá a $110 \left[\frac{km}{h} \right]$, ya que en este periodo de tiempo usualmente hay menos tráfico en las rutas. Mientras que, para los periodos entre las 12:00 y 18:00, y las 18:00 y 0:00 se utilizarán velocidades promedio de 80 y $100 \left[\frac{km}{h} \right]$ respectivamente.

Para esta simulación se utilizará como día de prueba un 5 de mayo, cuya hora de salida será a las 13:00. En este caso se empleará una refinación de 16 caras, pues es la única alternativa que aún no se ha probado, y por ende debe testearse para revisar los resultados que entrega.

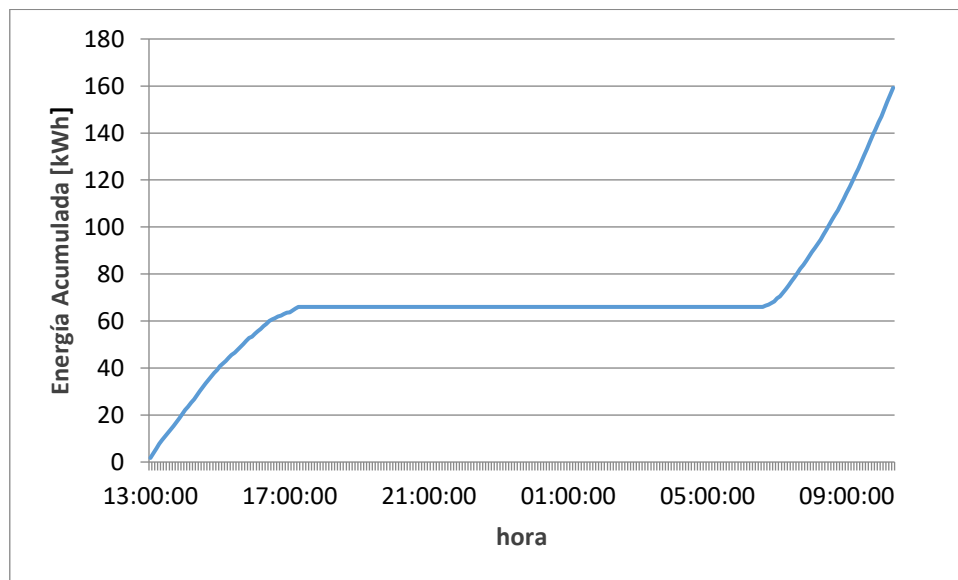


Gráfico 5-9: Energía acumulada sobre la cisterna durante el viaje

En este caso, tal como los otros analizados, la incidencia de energía posee un comportamiento similar a los otros gráficos, existe ganancia térmica durante el día con una tendencia hacia un comportamiento lineal, y durante la noche la radiación incidente es cero. No obstante, en este

caso se aprecia que la radiación incidente al final del camino, llega de una forma mucho más potente. La explicación para esto basándose en los estudios anteriores radica en la locación del camión en tal periodo de tiempo. Cuando se está cerca de la ciudad de Calama, el camión posee una inclinación considerable, en donde las caras de la cisterna quedan de forma casi perpendicular respecto a los rayos solares, por lo tanto, la radiación incidente será mayor. Además, esta zona tiene uno de los mayores índices de radiación solar a nivel mundial. Ambos factores combinados generan que la ganancia térmica sea aún mayor en este caso.

La potencia total que incide sobre la cisterna es de $159.21 [kWh]$, que es prácticamente la mitad de lo obtenido para la simulación a velocidad constante (septiembre). Esto refuerza nuevamente la importancia del tramo horario en el cual se ejecuta el viaje.

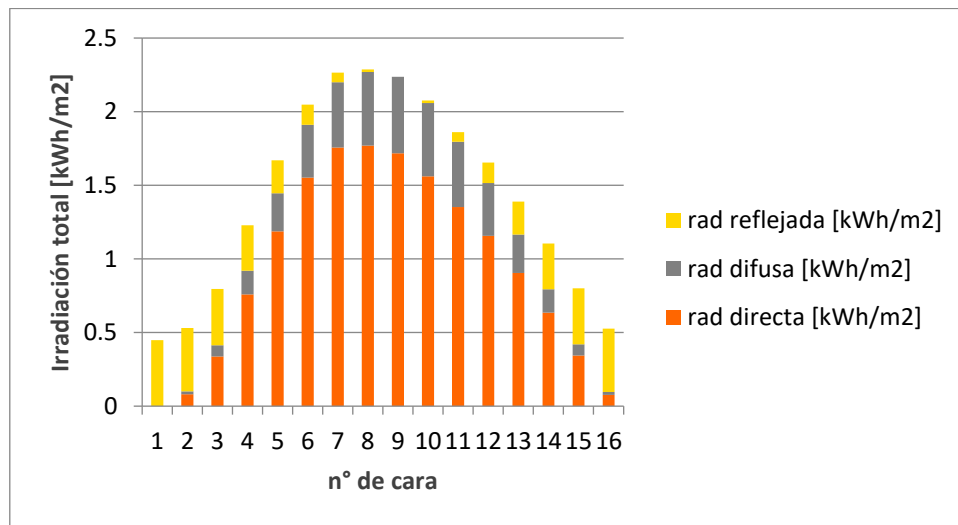


Gráfico 5-10: Irradiación por caras

El comportamiento del gráfico 5-10 es similar al generado para el caso de velocidad constante, siendo la parte superior de la cisterna en donde se encuentra el máximo de incidencia radiativa.

Se observa además que la radiación difusa produce un aporte muy pequeño en comparación con la radiación directa. Esto se debe en parte a que la fecha escogida (5 de mayo) se encuentra cerca del solsticio de invierno en el hemisferio Sur (21 de junio). Por ende, el ángulo de declinación del Sol está cerca de su máximo y, en consecuencia, el ángulo de altitud solar decrece, produciendo que el coeficiente de radiación sobre superficies inclinadas (R_b) aumente. Lo anterior genera que la proporción de radiación directa sea predominante en el cálculo total de radiación.

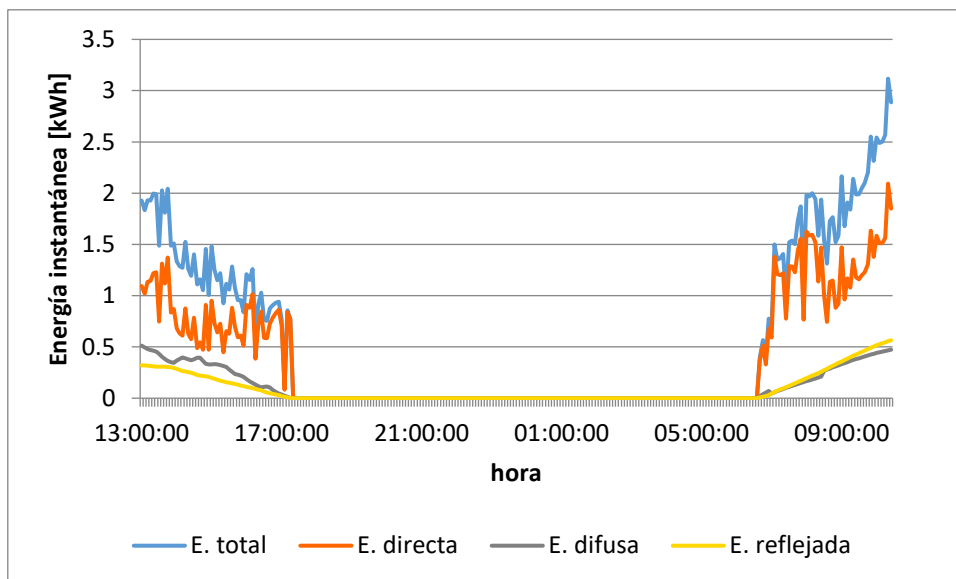


Gráfico 5-11: Energía instantánea para periodos de 5 minutos sobre la cisterna

Analizando el gráfico 5-11, se aprecia que después del amanecer los niveles de radiación, especialmente directa, son mayores que para el atardecer. Como ya se mencionó en las simulaciones anteriores, esto radica en que cerca de Calama los índices de claridad crecen abruptamente y la orientación del camión también favorece tal fenómeno. No obstante, hay otro factor a considerar. Si se observa la tabla 3-2 en la distribución de los índices de claridad, es posible ver que existe un cambio cuando \overline{K}_t se vuelve mayor a 0.55, lo que ocurre justamente para las horas después del amanecer. En este caso la fecha ya será 6 de mayo, y para índices de claridad promedio mayores a 0.55, el índice de claridad diario para el día 6, se ubica varias posiciones más atrás del día 5 en la tabla, con respecto a cuando \overline{K}_t es menor a 0.55. Lo anterior implicará obligatoriamente que el K_t para el 6 de mayo sea mayor cuando, \overline{K}_t es mayor a 0.55 que cuando es menor a este valor. Como consecuencia, la radiación para este día tendrá valores superiores al 5 de mayo, a causa de la posición de este día dentro de la tabla de distribución de los índices de claridad.

Lo anterior es un punto a considerar para futuras simulaciones. Cuando el índice de claridad supere el valor de 0.55, o sea inferior a 0.45, una distribución diferente de días se generará para el cálculo de K_t diario. Por ende, es probable que existan saltos en la magnitud de la radiación expuesta en los gráficos, los cuales habrá que analizar cuidadosamente y contrastar con mediciones reales del fenómeno.

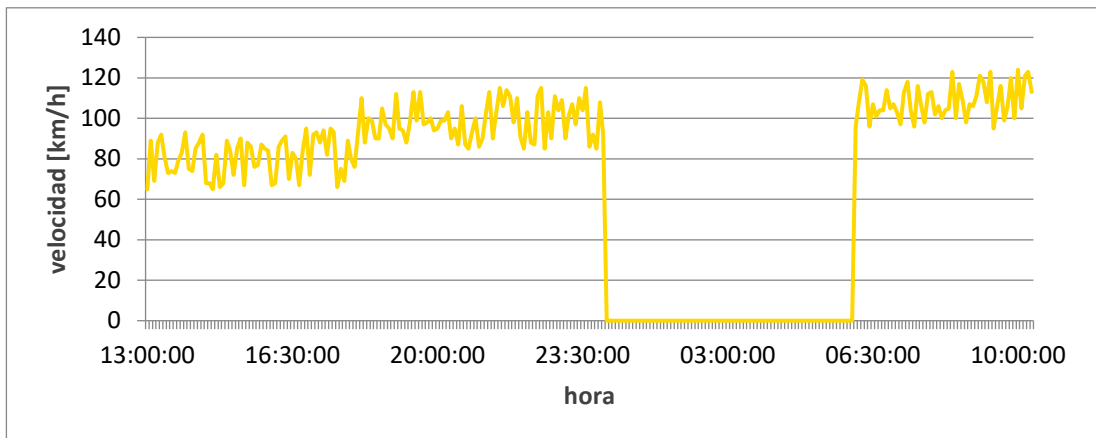


Gráfico 5-12: Distribución de velocidades a lo largo de la ruta

El gráfico 5-12 es la característica principal que distingue el itinerario de viaje del modelo a velocidad variable. La capacidad de poder configurar diferentes velocidades a lo largo del viaje, permite generar mayor veracidad a la simulación realizada.

Como se puede apreciar, hay un periodo de tiempo en el cual el camión se encuentra detenido, que para este caso es el periodo entre las 0:00 y 6:00 hrs. El mayor grado de variabilidad de la velocidad y la posibilidad de establecer paradas, generan que sea probable crear un itinerario de viaje con paradas en diferentes localidades en las cuales el camión se detendrá a entregar parte de la carga de la cisterna.

5.3. Modelo mejorado de distribución de índices de claridad

El hecho de utilizar un modelo creado en base al comportamiento promedio del clima a nivel global puede producir errores considerables. Por lo que se describe un modelo especial para zonas tropicales que tiene la ventaja de adecuarse a las peculiaridades del clima del norte de Chile.

Al comparar ambos modelos se aprecia que una de las principales ventajas del utilizado para zonas tropicales, es que este genera una distribución de frecuencia acumulada más cercana a lo que se trata de describir teóricamente en comparación con el modelo universal.

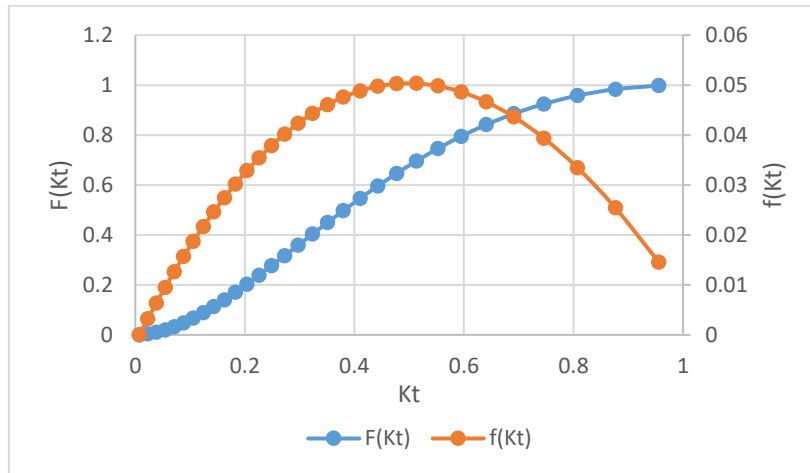


Gráfico 5-13: Frecuencia absoluta y acumulada para modelo de trópicos

En el gráfico 5-13 se puede apreciar que la curva correspondiente al modelo de trópicos es semejante a una curva S. Esto implica que la frecuencia de ocurrencia de días con un índice de claridad muy alto o muy bajo es poco probable, mientras que los índices de claridad de mayor ocurrencia para un mes se concentrarán en torno al valor central (0.4-0.6).

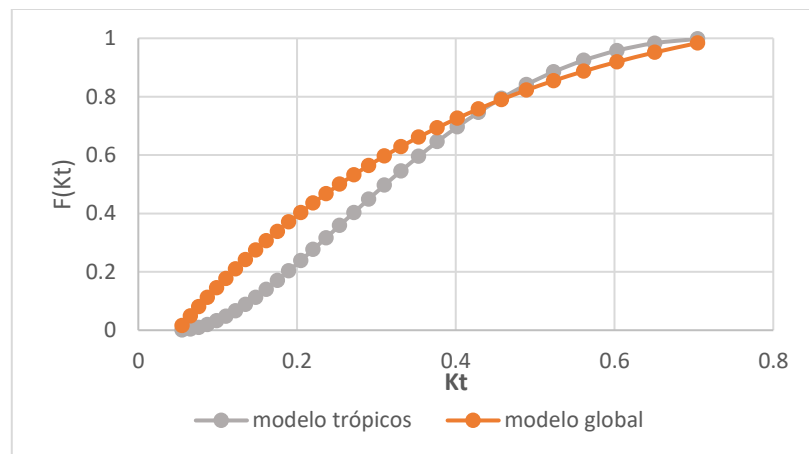


Gráfico 5-14: Comparación entre ambos modelos para $\bar{K}_t = 0.4$

En cambio, para el modelo global se aprecia que esto no sucede. Comparando ambos tipos de distribución para un $\bar{K}_t = 0.4$, se obtienen las curvas del gráfico 5-14. Se observa que para el caso del modelo universal se presentan sobreestimaciones de la frecuencia de ocurrencia de días con índices de claridad menores a 0.4. Lo anterior se debe a que este modelo, al simular

una climatología estándar de la Tierra debe considerar locaciones con alto nivel de nubosidad lo que aumenta la posibilidad de encontrar días con índices de claridad de bajo valor.

Esto produce problemas en la exactitud del cálculo de los índices de claridad, lo que se traduce en errores de cálculo de la radiación incidente. Por lo tanto, es necesario trabajar con una distribución de estos índices lo más cercana posible a los experimentados en una cierta zona, para evitar que el error se propague a cálculos futuros.

A causa de lo anterior, se realiza una simulación con este nuevo modelo de distribución de índices de claridad definido para zonas tropicales, con el fin de determinar el margen de error que existe entre ambos modelos para una simulación manteniendo los parámetros de entrada del programa constantes en ambos casos.

Para la siguiente simulación se utilizan como datos de entrada para el programa la fecha del 3 de marzo, la hora 10:00, una discretización de 16 caras y una velocidad constante de $100 \left[\frac{km}{h} \right]$.

Dentro de los resultados obtenidos en ambos casos, se tiene que para el caso de modelación de radiación global se obtiene una ganancia neta térmica de 209.35 [kWh], mientras que para el caso de modelo tropical la radiación incidente acumulada es de 161.03 [kWh], lo que se traduce en un error de un 23.1% en comparación con la simulación del modelo universal.

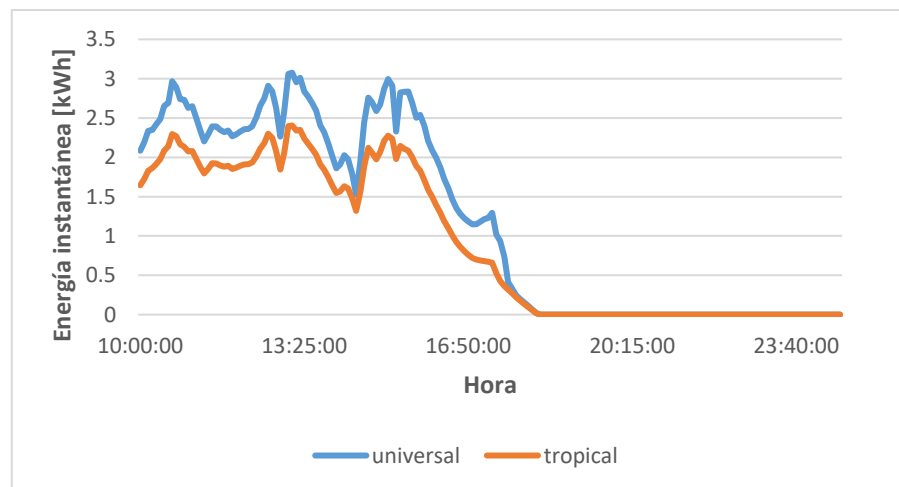


Gráfico 5-15: Comparación entre ambos modelos para el cálculo de la energía instantánea

La razón de la variación en la ganancia térmica total se ve reflejada en el gráfico 5-15. Se observa que la radiación instantánea es menor para la simulación tropical en toda la ruta.

Además, esta curva es más suavizada que la del caso global. Como el único parámetro que se cambió fue el índice de claridad, entonces estos deben ser más bajos para el caso tropical, causando una disminución en la obtención de la radiación incidente. Para corroborar esto, se analiza el comportamiento de este parámetro a lo largo de toda la ruta para ambos modelos ejecutados, y a su vez se contrastan con el índice de claridad promedio de la zona.

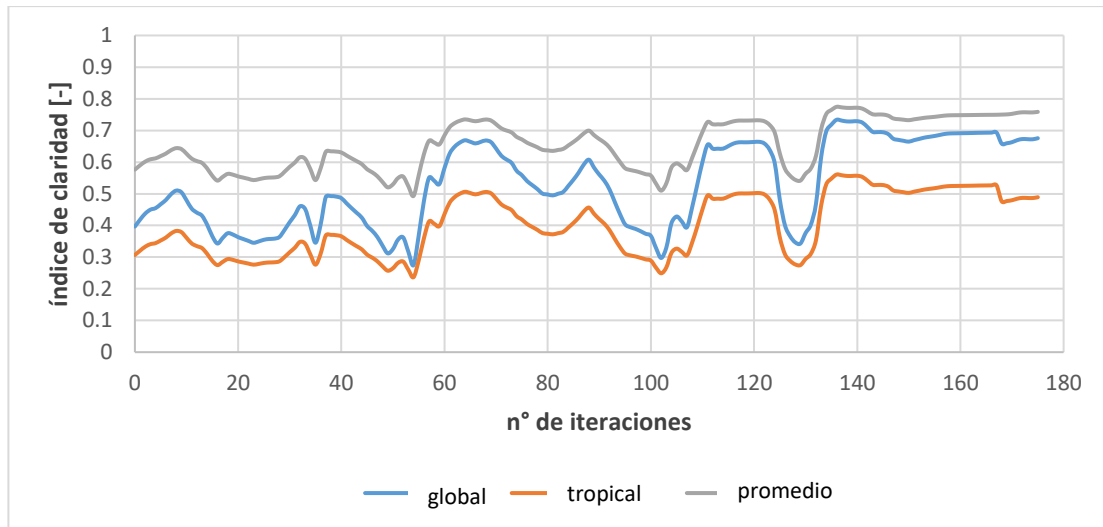


Gráfico 5-16: Comparación de los índices de claridad de ambos modelos

Del gráfico 5-16 se comprueba que efectivamente para las simulaciones con el modelo tropical los índices de claridad calculados son menores que para el modelo universal, lo que a su vez se traduce en valores de radiación incidente menores.

5.4. Simulaciones de optimización.

Los cuatro gráficos explicados y analizados anteriormente corresponden a los entregables del programa. Ahora bien, lo anterior solo fue una muestra breve de cuáles son las funciones primarias que tiene el programa, pero su objetivo principal va más allá de eso. Su finalidad es poder obtener información contundente y útil para optimizar el viaje del camión. Es por esto que a continuación se estudian diversas simulaciones generadas con el programa con el fin de determinar variables importantes que afecten la ganancia térmica de la cisterna, y de esta manera, poder reducir la cantidad de calor incidente sobre los estanques de estos camiones. Es necesario recalcar, además, que como aún se desconoce si el modelo tropical funciona mejor

que el universal, se trabajará con este último por motivos de tiempo, pues este se ejecuta más rápido que el modelo tropical.

Simulación 1: “Análisis de la dependencia del número de caras”

Se realizará una prueba para el día 3 de abril, con hora de salida a las 10:00 hrs y una velocidad promedio del camión equivalente a $100 \left[\frac{km}{h} \right]$. En este caso como lo ideal es conocer la dependencia del refinado de malla en los resultados, el modelo ideal a utilizar es el de velocidad constante. Ya que, si se tiene una misma velocidad en las diferentes simulaciones, se aseguran que los puntos discretizados de la ruta sean los mismos.

Se procede a realizar tres simulaciones con un refinamiento de 8, 16 y 32 caras, para de esta forma analizar que tanto cambian los resultados obtenidos y determinar cuál es el número óptimo de caras a ejecutar en el programa.

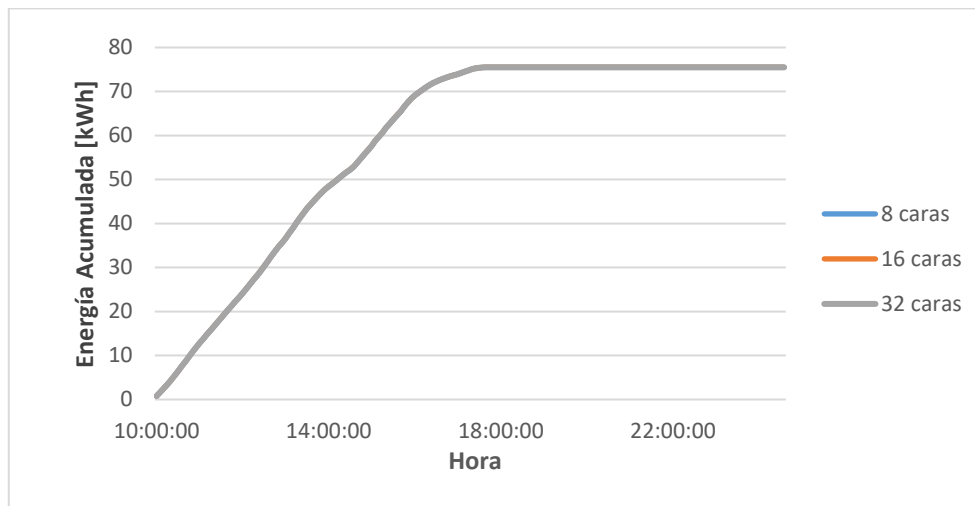


Gráfico 5-17: Comparación de la ganancia térmica en función de la refinación de la malla

En el gráfico 5-17 se aprecia el resultado de las tres simulaciones realizadas, y se puede notar que la diferencia entre los diferentes resultados obtenidos es prácticamente despreciable. Es por ello que se determina el refinamiento a usar en base al error presentado entre dos tipos de refinamiento. Se compararon los casos de 8 y 16 caras, y 16 y 32 caras, obteniéndose errores de 0.0481% y 0.0002% respectivamente. Por lo anterior, es que se decide trabajar con un refinado de 16 caras.

Simulación 2: “Análisis de la dependencia de la velocidad”

Para el 3 de abril con hora de salida a las 10:00 hrs y una refinación de cisterna correspondiente a 16 caras se obtiene el siguiente gráfico.

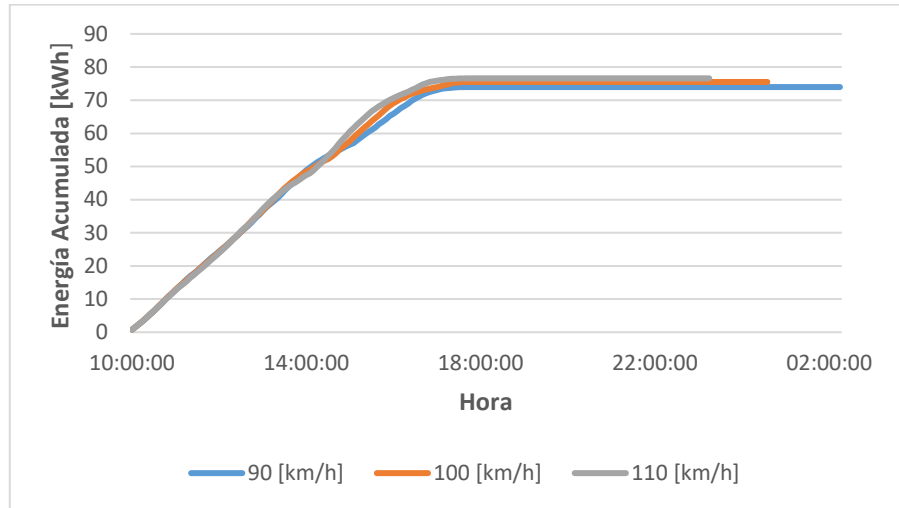


Gráfico 5-18: Comparación de la ganancia térmica en función de la velocidad del camión

Se observa que, contrario a lo que se podría pensar en un principio, para este caso, mientras más rápido se mueva el camión, mayor será la ganancia térmica de la cisterna. La razón de lo anterior radica en la ruta y el periodo de viaje. A medida que el camión avanza hacia el norte, la tendencia general es que los niveles de radiación van subiendo. Por lo que, mientras más rápido se mueva el móvil, más rápido llegará a las zonas de mayor radiación y, por ende, mayor será su ganancia térmica.

Es por lo anterior que, es necesario realizar este tipo de simulaciones para determinar efectivamente que tan favorable es fijar ciertos valores de velocidad para el transporte de combustible.

Simulación 3: “Dependencia de la hora de salida”

La simulación anterior muestra que junto con la velocidad del camión es importante considerar la hora de salida de este como parámetro de estudio. Es por esto, que se decide hacer un análisis especial para este factor. Bajo las mismas condiciones (salida un 3 de abril) se estudia la radiación incidente sobre camión en función de la hora de salida.

La simulación se realiza para velocidades de 90, 100 y 110 $\left[\frac{km}{h}\right]$ con una refinación de 16 caras.

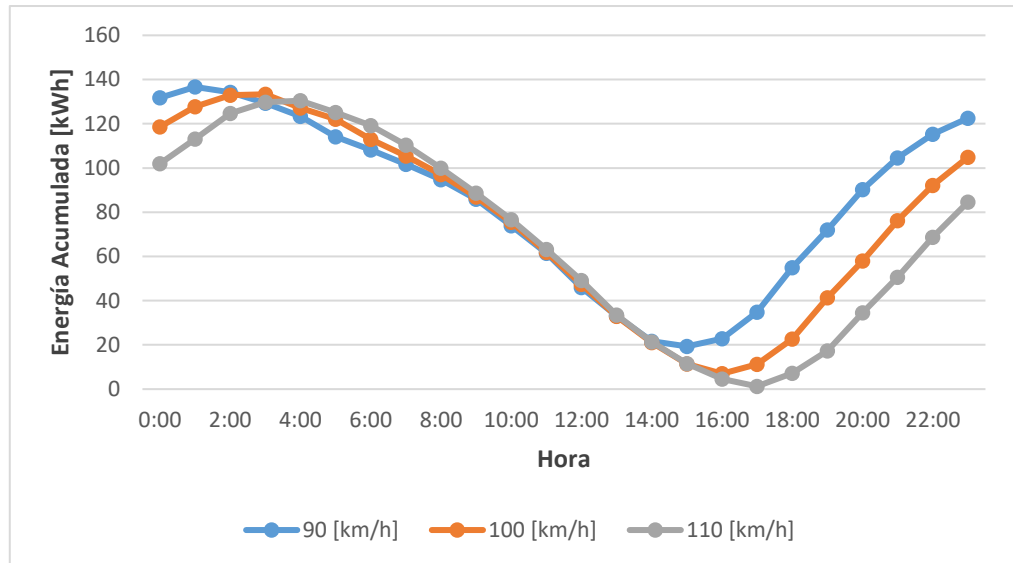


Gráfico 5-19: Dependencia horaria de la ganancia térmica en función de la hora de salida

A pesar de las diferencias entre las curvas generadas, la forma que toman es semejante a una senoide, causado por la naturaleza de las funciones que conforman el cálculo de radiación.

La máxima ganancia térmica para todos los casos se presenta cuando el camión sale entre las 2 y las 4 de la madrugada, pues durante todo el trayecto el camión estará expuesto al Sol, llegando a su destino en horas cercanas al atardecer. Por otro lado, si el camión sale de Valparaíso entre las 14 y las 18 horas, la ganancia térmica es mínima, debido a que el móvil viajará mayoritariamente en horas de la noche. Por ejemplo, para el caso en el que el camión se mueva a 110 $\left[\frac{km}{h}\right]$, la hora de salida puede disminuir la ganancia térmica desde 130.42 [kWh] si es que sale a las 4 de la madrugada hasta 1.26 [kWh], si cambia su hora de salida para las 17 horas, disminuyendo la radiación incidente en cerca de un 99%.

Más allá de la exactitud que puedan presentar estos resultados, la real relevancia de estos radica en el análisis del comportamiento de la curva, pues entrega de manera visual una herramienta que contribuye a la optimización del viaje, ayudando a la selección del momento de partida del camión.

Simulación 4: “Dependencia estacional”

El último análisis de interés realizado tiene relación con la ganancia térmica en función de la época del año en la cual realiza el viaje, más aún, la estación del año. En primera instancia, es fácil predecir que la mayor radiación incidente ocurrirá en el verano y la menor en invierno. No obstante, es interesante cuantificar estas diferencias entre estaciones.

La simulación se realiza para días representativos de cada estación, en particular se escoge el día central de cada estación. Además, se utiliza como parámetros de entrada una velocidad de $100 \left[\frac{km}{h} \right]$, refinamiento de 16 caras y hora de salida a las 10:00.

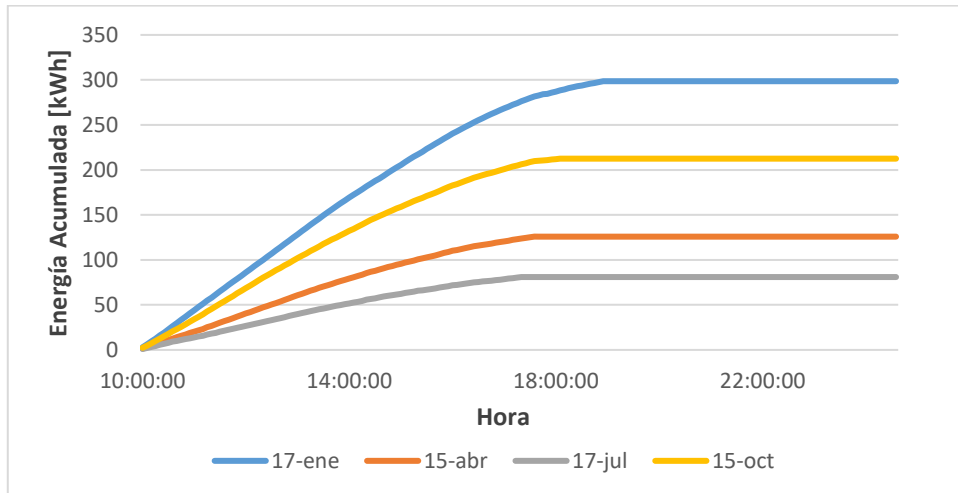


Gráfico 5-20: Dependencia estacional de la radiación incidente sobre el estanque

Se observa que, si el camión realiza el viaje un 17 de julio en lugar de un 17 de enero, la radiación que incide sobre este, baja desde 298.55 [kWh] hasta 80.95 [kWh], reduciendo su valor en cerca de 4 veces.

A pesar de que no se puede restringir el viaje de estos vehículos en las épocas de mayor radiación solar, la información expuesta en el gráfico anterior entrega datos cuantitativos que pueden servir para tomar resguardos extra en el transporte, tales como un menor grado de llenado o mayor protección para la cisterna.

Capítulo 6

Análisis cuantitativo y restricciones del modelo

6.1. Estudio del caso “Ergón”

Hasta ahora se ha realizado un análisis cualitativo del desempeño del programa, dando explicación al comportamiento de las curvas generadas en base a parámetros climáticos y geográficos. Ahora, es necesario evaluar los resultados cuantitativamente para determinar la precisión del programa y el margen de error existente.

Ergón es un vehículo impulsado por energía solar y construido por estudiantes de la Universidad Técnica Federico Santa María, que correrá en la Carrera Solar de Atacama (CSA). En la actualidad el equipo se encuentra en la construcción del tercer prototipo del vehículo tomando como referencia los modelos anteriores y diversos estudios que le han realizado a los vehículos. Dentro de estos estudios, se encuentra el detalle de un viaje realizado con el vehículo construido anteriormente, en la ruta Santiago-Arica utilizada en la CSA. Parte de la información recopilada en el viaje corresponde a mediciones de radiación en determinados puntos de la ruta con información de su posición y tiempo real.

Lo anterior es de gran utilidad para estudiar la precisión numérica del programa, pues es una de las pocas instancias en donde se posee información real de la radiación solar incidente sobre un objeto en movimiento.

Para poder hacer la comparación entre los valores medidos y simulados es necesario realizar un par de correcciones al programa. Primero, hay que ingresar una nueva ruta correspondiente a la realizada por el prototipo Ergón, agregando información correspondiente a la posición geográfica y dirección del vehículo en un punto dado de la ruta discretizada, junto con el registro solar mensual promedio para todos los puntos. La última modificación tiene relación

con la geometría del sistema a evaluar; el programa original simula las caras de una cisterna cilíndrica, pero en este caso la geometría se simplifica a un rectángulo con inclinación 0° , que corresponderá al piranómetro usado durante el viaje del vehículo.

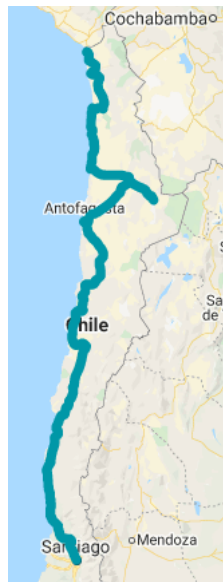


Figura 6-1: Ruta recorrida por el vehículo Ergón

Una vez realizados estos cambios, se puede comenzar a realizar las simulaciones para comparar los resultados considerando que los registros que entrega el piranómetro corresponden a irradiancia instantánea $\left[\frac{W}{m^2}\right]$, y como los datos calculados por el programa corresponden a la energía acumulada en un periodo de 5 minutos, es necesario dividir este valor por 300 para poder tener valores comparables.

Los datos de irradiancia solar recopilados durante el viaje antes mencionado se distribuyen en 6 tramos diferentes, en los cuales se dispone de la ubicación medida en kilómetros de ruta (se considera el kilómetro cero como Santiago), la irradiancia instantánea registrada en tal punto y la hora de salida para cada tramo. No obstante, se dispone de poca información con respecto a las velocidades del móvil. En las pocas ubicaciones en donde se tiene este tipo de información, se observa que la velocidad en estos casos es cercana a los $100 \left[\frac{km}{h}\right]$, por lo tanto, será este valor el que se utilizará en las simulaciones a realizar en el programa.

Considerando lo mencionado anteriormente, se comparan los datos registrados durante el viaje con las simulaciones realizadas para el modelo de clima sintético universal y el modelo para

climas tropicales. Esto se presenta en el anexo E, junto con la hora y distancia recorrida (posición en la ruta) al momento de la medición.

Para observar el desfase producido a lo largo de todos los puntos estudiados, en el gráfico 6-1 se desglosan los datos medidos y simulados con ambos modelos de clima sintético. En este caso, los datos de los 6 tramos se juntan en una sola curva para analizarlos todos a la vez.

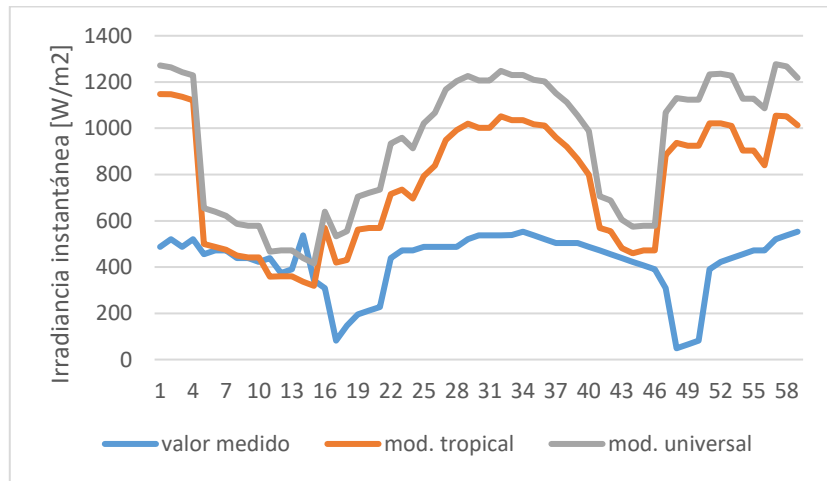


Gráfico 6-1: valores medidos y simulados de radiación instantánea

Se observa que hay una sobrevaluación por parte de ambos modelos de clima, aunque el modelo tropical tiende a generar mejores resultados. Esto a causa de que el modelo de clima sintético para zonas tropicales, en general produce valores menores de K_t , lo que implica registros menores de radiación. Si bien, en ciertas secciones las simulaciones tienden a acercarse bastante a los valores medidos, este comportamiento no es sostenido a lo largo de las comparaciones. Por lo que, a pesar de que los modelos empleados tiendan a representar en general el comportamiento de los puntos estudiados, no hay precisión numérica en los resultados obtenidos. En un principio, la explicación más razonable para entender este error es que el máximo refinamiento temporal empleado en el programa es la radiación horaria, obteniéndose la energía incidente para 5 minutos al dividir la radiación horaria entre 12, y adicionalmente en este escenario, este valor se vuelve a dividir en 300 para obtener datos de irradiación instantánea. Lo anterior presenta necesariamente la presencia de errores al asumir que la radiación se comportará de manera estable durante toda la hora sin presentar peaks. No obstante, es imposible corroborar esta hipótesis sin tener mediciones reales en periodos más

extensos, que sean comparables con los entregables del programa, sin la necesidad de que estos últimos deban ser escalados para realizar la comparación.

Si ahora analizamos cada uno de los 6 tramos por separado, como se trata de un conjunto de datos, se calcula el RMSE (*Root Mean Square Error*) para analizar el error obtenido con la implementación de cada modelo.

Se puede apreciar del gráfico 6-2 que el error calculado varía entre los distintos tramos, llegando a valores cercanos a los $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, lo que significa que el modelo computacional duplica o incluso triplica el valor de la radiación medida en ciertos puntos.

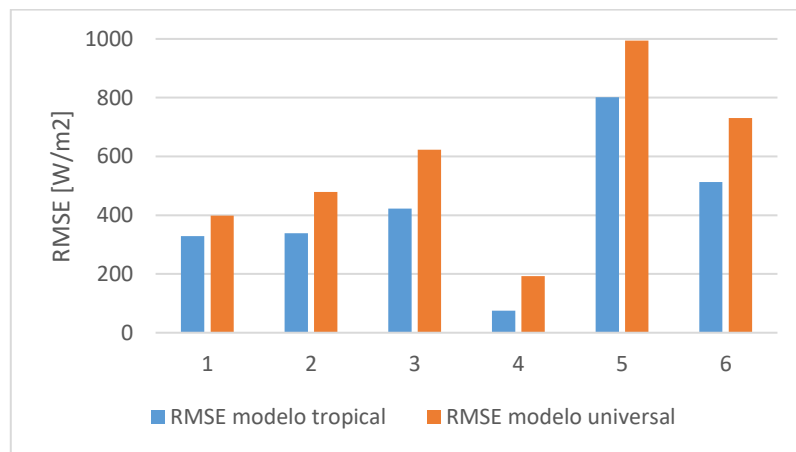


Gráfico 6-2: RMSE para modelos de clima sintético

Analizando los valores de $\overline{K_t}$ se observa que en el conjunto de los 6 tramos, el menor y mayor valor registrado son 0.516 y 0.773 respectivamente. Tal como se mencionó en el fundamento teórico, la secuencia de distribución de K_t para los días de un mes depende del valor que posea $\overline{K_t}$. Cuando este valor es mayor que 0.55 se obtiene una secuencia de distribución diferente, lo cual influye en el cálculo de radiación. Sin embargo, los únicos tramos en donde se aprecian valores de $\overline{K_t}$ mayores y menores que 0.55 a la vez es en los tramos 1 y 3, los cuales tienen errores no tan significativos como los tramos 5 y 6, dando a entender que los errores calculados no están completamente determinados por los cambios de las distribuciones de K_t , sino que hay otros parámetros que contribuyen a maximizar este error. Junto a esto, dentro de la información proporcionada en estos tramos, se señala que durante las mediciones del tramo 5 se estuvo en presencia de nubes durante todo el tiempo. Esto no pasa desapercibido, pues si analizamos el error calculado, es justamente el tramo 5 el que presenta el mayor error. Lo cual

señala que el programa no fue capaz de considerar la atenuación causada por la presencia de nubes, ya que en todo momento se sobreestima el valor de la radiación considerablemente.

6.2. Limitaciones del modelo actual y recomendaciones.

En base a los análisis realizados anteriormente, se observa que la magnitud de los errores obtenidos pone en duda la precisión del programa. No obstante, el propósito del modelo computacional es el cálculo de radiación neta en periodos de tiempo extensos y, por ende, es el comportamiento general de la radiación lo que importa y no sus valores puntuales. Hay que tener en cuenta que el comportamiento de la radiación terrestre a lo largo del día, si bien sigue una tendencia clara, está lleno de peaks inesperados causados por atenuaciones repentinas de la radiación. Pero, debido a la corta duración de estos, no se ve afectado de forma significativa el cálculo neto de radiación diaria. Por lo tanto, el tener valores instantáneos de irradiancia inexactos no implica necesariamente que el cálculo de radiación en periodos más largos también lo sea.

Considerando lo anterior, la mejor manera para validar el modelo de forma numérica es estudiando la radiación en vehículos sobre una ruta, tal como el caso analizado previamente. Pero en esta ocasión, con valores de radiación para periodos de tiempo determinados, media hora, por ejemplo. Para así estudiar la exactitud numérica de la captación continua de radiación, que es el parámetro realmente importante en este caso. Sin una comparación de este tipo es difícil poder concluir si el programa es o no es numéricamente preciso y, en consecuencia, su funcionamiento se vería limitado meramente a estimar el comportamiento cualitativo de la radiación durante el viaje, el cual hasta ahora es el único resultado seguro del programa.

Por lo tanto, en el futuro es necesario encontrar instancias en las cuales se pueda medir la radiación neta incidente en periodos de tiempo determinados (idealmente mayores a 30 minutos), con información adicional sobre la posición y hora en los puntos inicial y final del tramo. Cuidando además que el móvil tenga una distribución de velocidades lo más homogénea posible, para asegurar que el programa simule de manera confiable el movimiento del móvil.

Una vez que se pueda realizar la comparación entre el modelo y estos datos medidos, será posible analizar de manera más eficaz la influencia de parámetros como la distribución de índices de claridad o la elección de modelos de clima sintético en el error global del programa, para de esta manera evaluar e implementar posibles mejoras futuras al código de este.

Conclusiones

Lo expuesto a lo largo de este trabajo permite concluir que el programa simula de manera fidedigna el comportamiento de la radiación incidente sobre la cisterna del camión. Aspectos como la atenuación extra de la radiación en zonas costeras o la dependencia de la radiación directa incidente con la orientación del camión se veían reflejados de forma coherente en los resultados de la simulación, permitiendo un análisis energético más refinado en sub-rutas dentro de la ruta principal.

Lo anterior permite obtener datos útiles respecto a la influencia de ciertos parámetros sobre la radiación que incide en el camión a lo largo de su viaje. Por ejemplo, se pudo observar el comportamiento sinusoidal de la radiación incidente con respecto a la hora de salida del camión, lo cual evidencia la existencia de un mínimo óptimo de ganancia calórica. Y en efecto, este mínimo implica la reducción de la radiación incidente en un 99% si es que se llega a cambiar la hora de salida por las 17 horas en lugar de las 4 de la madrugada. Esto es de gran importancia, pues más allá de los valores numéricos que se puedan obtener, el conocer la dependencia entre las variables que intervienen permitirá desarrollar soluciones más confiables en cuanto a la optimización del viaje se refiere.

Ahora bien, analizando el programa desde el punto de vista numérico, los resultados ya no son tan satisfactorios. Al estudiarse datos de radiación medidos durante un viaje en vehículo en 6 tramos diferentes, se obtuvo un rango de errores que fluctúa desde los 74 hasta los 994 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$, dando a entender que no hay una concordancia o estabilidad al momento de realizar los cálculos numéricos. Sin embargo, es necesario recalcar que los datos medidos en el caso Ergón, no son del todo representativos para evaluar la precisión del modelo computacional. Es bien conocido que la irradiancia instantánea varía durante el transcurso del día, teniendo alzas y descensos pronunciados, los cuales no representan necesariamente el comportamiento regular de este parámetro. Por lo tanto, evaluar la precisión numérica del programa basándose en valores instantáneos de radiación, no ofrece una comparación muy adecuada, si consideramos que el objetivo de este programa es obtener valores de radiación para largos periodos de tiempo.

Es por ello, que dentro de las recomendaciones futuras para este trabajo se pone énfasis en la realización de nuevas pruebas con mediciones para periodos de tiempo más extensos. De esta manera, se contará con una base de datos más representativa del fenómeno que se busca estudiar, con los cuales se podrán sacar conclusiones más relevantes para la implementación de mejoras futuras. Estas deberían ir enfocadas principalmente en el análisis climatológico de la ruta, pues el esquema de cálculo de radiación se divide en dos partes principales. La primera, consistente en el cálculo de radiación extraterrestre que depende en su totalidad de la geometría del sitio escogido y, por ende, se trata de manera estandarizada para cualquier parte del globo; y la segunda parte que se basa en evaluar el grado de atenuación que sufren los rayos solares al pasar por la atmósfera, que dependerá a su vez del clima de la zona.

Finalmente, más allá de la validez cualitativa o invalidez cuantitativa actual de programa, la ventaja principal de este radica en su versatilidad y flexibilidad de funcionamiento. Dentro de las simulaciones del caso base y el análisis del caso Ergón, se debió realizar cambios en la geometría, velocidad y ruta estudiada, lo cual se pudo implementar de manera sencilla sin realizar cambios sustanciales en el código del programa. Además, la cantidad y tipo de información que se extrae como resultado de la simulación permite obtener datos que van desde la determinación de las zonas de una cierta geometría en donde incide más radiación, hasta la obtención de sub-rutas en donde la ganancia térmica sería máxima. Estos son datos sumamente relevantes para el estudio de radiación térmica en viajes largos, lo que convierte a este programa en una herramienta valiosa para análisis ligados a esta área.

Bibliografía

- [1] Eqbert, K., & Dev. Anand, M. (2017, agosto). Development of Reducing Boil Off Losses in LNG Transportation Using Polyamide as Supporting Material. *IAEME*, 8(8), 852–858.
- [2] Hasan, M. M. F., Zheng, A. M., & Karimi, I. A. (2009). Minimizing Boil-Off Losses in Liquefied Natural Gas Transportation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(21), 9571–9580. doi:10.1021/ie801975q
- [3] Ministerio de Fomento. (2011). *ADR-2011. Acuerdo Europeo sobre transporte Internacional de mercancías peligrosas por carretera* (1st. ed.). Recuperado de <https://www.ecosmep.com/ADR-2011/LibroADR.pdf>
- [4] Electronic Code of Federal Regulations. (s. f.-b). General Requirements for Shipments and Packagings. Recuperado 15 de mayo de 2019, de <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=ca0633b8aabc14099a0947b79eb372f4&mc=true&node=pt49.2.173&rgn=div5#sp49.2.173.g>
- [5] Boletín Oficial del Estado. (2014, 15 mayo). DIRECTIVA 2014/68/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 15 de mayo de 2014 relativa a la armonización de las legislaciones de los Estados miembros sobre la comercialización de equipos a presión. Recuperado 15 de mayo de 2019, de <https://www.boe.es/doue/2014/189/L00164-00259.pdf>
- [6] Fröhlich, C. (2006). Solar Irradiance Variability Since 1978. *Space Science Reviews*, 125(1-4), 53–65. doi:10.1007/s11214-006-9046-5
- [7] Kalogirou, S. (2009). *Solar Energy Engineering, Processes and Systems* (Ed. rev.). Barcelona, España: Elsevier.
- [8] Lacis, A. A., & Hansen, J. (1974). A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Earth's Atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(1), 118–133. doi:10.1175/1520-0469(1974)031<APFTAO>2.0.CO;2
- [9] Lockwood, D. J. (2015). Rayleigh and Mie Scattering. *Encyclopedia of Color Science and Technology*, 1–12. doi:10.1007/978-3-642-27851-8_\$218-1

- [10] Bhattacharjee, S. (2016). DLS and zeta potential – What they are and what they are not? *Journal of Controlled Release*, 235, 337–351. doi:10.1016/j.jconrel.2016.06.017.
- [11] Hollands, K., & Huget, R. (1983). A probability density function for the clearness index, with applications. *Solar Energy*, 30(3), 195–209. doi:10.1016/0038-092x(83)90149-4
- [12] Bendt, P., Collares-Pereira, M., & Rabl, A. (1981). The frequency distribution of daily insolation values. *Solar Energy*, 27(1), 1–5. doi:10.1016/0038-092x(81)90013-x
- [13] Santos, J., Pinazo, J., & Cañada, J. (2003). Methodology for generating daily clearness index values K_t starting from the monthly average daily value. Determining the daily sequence using stochastic models. *Renewable Energy*, 28(10), 1523–1544. doi:10.1016/s0960-1481(02)00217-3
- [14] Woyte, A., Belmans, R., & Nijs, J. (2007). Fluctuations in instantaneous clearness index: Analysis and statistics. *Solar Energy*, 81(2), 195–206. doi:10.1016/j.solener.2006.03.001
- [15] Saunier, G., Reddy, T., & Kumar, S. (1987). A monthly probability distribution function of daily global irradiation values appropriate for both tropical and temperate locations. *Solar Energy*, 38(3), 169–177. doi:10.1016/0038-092x(87)90015-6
- [16] Frid, S. E., & Lisitskaya, N. V. (2019). Cumulative frequency distributions of daily clearness index for temperate and high latitudes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1147, 012094. doi:10.1088/1742-6596/1147/1/012094
- [17] Collares-Pereira, M., & Rabl, A. (1979). The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy*, 22(2), 155–164. doi:10.1016/0038-092x(79)90100-2
- [18] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (Ed. rev.). New Jersey, United States: Wiley.
- [19] Molina, A., Falvey, M., & Rondanelli, R. (2017). A solar radiation database for Chile. *Scientific Reports*, 7(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13761-x>
- [20] Jimenez-Estevez, G., Palma-Behnke, R., Roman Latorre, R., & Moran, L. (2015). Heat and Dust: The Solar Energy Challenge in Chile. *IEEE Power and Energy Magazine*, 13(2), 71–77. doi:10.1109/mpe.2014.2380012

Anexos

Anexo A: Distribución de índices de claridad para un promedio de 0.55

K_t	$f(K_t)$
0.05	0
0.1	0.0171
0.15	0.0374
0.2	0.0614
0.25	0.0899
0.3	0.1236
0.35	0.1636
0.4	0.2109
0.45	0.2670
0.5	0.3334
0.55	0.4121
0.6	0.5054
0.65	0.6158
0.7	0.7467
0.75	0.9017

Anexo B: Discretización de la ruta Valparaíso-Calama para el estudio de radiación incidente.



Anexo D: Ángulos de inclinación y azimutal para una refinación de 16 y 32 caras.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
β	180	157.5	135	112.5	90	67.5	45	22.5	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5
z_s	90	90	90	90	90	90	90	90	90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
β	180	168.75	157.5	146.25	135	123.75	112.5	101.25	90	78.75	67.5	56.25	45	33.75	22.5	11.25
z_s	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90

	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
0	11.25	22.5	33.75	45	56.25	67.5	78.75	90	101.25	112.5	123.75	135	146.25	157.5	168.75	
90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90

Anexo E: Comparación de datos de viaje ERGON

Tramo 1				
km	Hora	I medida [W/m ²]	I modelo tropical [W/m ²]	I modelo universal [W/m ²]
19.5	12:42	487.8	1147.79	1271.52
36.4	12:52	520.32	1147.18	1263.66
59.2	13:05	487.8	1136.04	1243.21
65.3	13:09	520.32	1121.17	1228.75
140.6	13:55	455.28	500.11	655.14
159.9	14:06	471.54	487.67	639.26
168.5	14:11	471.54	474.35	621.24
176.1	14:16	439.02	449.48	586.22
196.7	14:28	439.02	441.9	579.05
202	14:31	422.76	441.9	579.05
246.9	14:58	439.02	359.07	466.57
263.1	15:08	373.98	360.68	472.38
265.3	15:09	390.24	360.68	472.38
275	15:15	536.58	336.71	438.74
292.1	15:25	341.46	318.79	415.83
314.8	15:39	308.94	569.28	639.73

Tramo 2				
km	Hora	I medida [W/m ²]	I modelo tropical [W/m ²]	I modelo universal [W/m ²]
334.8	8:00	81.83	419.59	532.37
360.7	8:16	146.34	430.56	555.43
405.3	8:42	195.12	562.65	705.13
413.6	8:47	211.38	569.14	720.74
452.4	9:11	227.64	568.98	735.4

Tramo 3				
km	hora	I medida [W/m ²]	I modelo tropical [W/m ²]	I modelo universal [W/m ²]
472.2	11:14	439.02	715.19	934.49
494.8	11:28	471.54	735.17	958.63
522	11:44	471.54	696.34	912.79
530.1	11:49	487.8	793.23	1021.94
540.3	11:55	487.8	838.27	1066.71
550.4	12:01	487.8	948.79	1167.65
572.3	12:14	487.8	992.46	1203.68
582.8	12:20	520.32	1019.86	1226.38
592.2	12:28	536.58	1002.11	1207.39
600.3	12:31	536.58	1002.11	1207.39
610.5	12:37	536.58	1052.21	1248.03
621.4	12:44	538.58	1035.07	1230.76
625	12:46	552.84	1035.07	1230.76
639.3	12:54	536.58	1016.53	1209.43
652.2	13:02	520.32	1011.09	1201.89
663.5	13:08	504.06	959.98	1150.97
673.9	13:15	504.06	920.04	1112.76
702.1	13:31	504.06	866.77	1055.16
711.6	13:37	487.8	799.19	987.64

Tramo 4				
km	hora	I medida [W/m ²]	I modelo tropical [W/m ²]	I modelo tropical [W/m ²]
722.3	15:00	471.54	568.51	705.44
731.5	15:06	455.28	554.68	687.38
753	15:18	439.02	481.8	604.79
769.9	15:29	422.76	459.79	573.85
777.2	15:33	406.5	471.42	578.43
777.9	15:33	390.24	471.42	578.43

Tramo 5 (día nublado)				
km	hora	I medida [W/m ²]	I modelo tropical [W/m ²]	I modelo universal [W/m ²]
811	10:00	308.94	883.83	1067.72
959	11:29	48.78	937.44	1130.71
963.3	11:31	65.04	924.79	1123.36
967.1	11:34	81.3	924.79	1123.36

Tramo 6				
km	Hora	I medida [W/m ²]	I modelo tropical [W/m ²]	I modelo universal [W/m ²]
1376	10:42	390.24	1021.58	1232.93
1388	10:49	422.76	1020.74	1235.56
1402	11:00	439.02	1009.67	1227.74
1415	11:08	455.28	904	1128.4
1418	11:10	471.54	904	1128.4
1430	11:17	471.54	840.38	1085.94
1488	11:52	520.32	1054.72	1277.21
1551	12:30	536.58	1051.72	1267.4
1604	13:02	552.84	1012.69	1217.7