



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

# PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA PARA LA CARBONO NEUTRALIDAD DE LOS CAMPUS UNIVERSITARIOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

EMILIO ROBINSON MÉNDEZ VALDÉS

PROFESOR GUÍA:  
LUIS VARGAS DÍAZ

PROFESORA COGUÍA:  
CLAUDIA MACLEAN BRAVO

COMISIÓN:  
REYNALDO CABEZAS CIFUENTES

SANTIAGO DE CHILE  
2021

## Planificación energética para la carbono neutralidad de los campus universitarios

El cambio climático es un problema que no solamente afecta a las generaciones actuales si no que estará probablemente hasta que se extinga la humanidad o hasta que hagamos algo para frenarlo y esto es algo que han entendido una serie de organismos nacionales e internacionales, entre ellos las universidades que en algunos países han creado alianzas para reportar y disminuir sus agentes contaminantes y en otros, como en Chile, que están tomando recién el desafío y poniendo manos a la obra.

En esta memoria de título se pretende crear Planes de Acción Climática tales que las huellas de carbono corporativas de el campus Beauchef de la Universidad de Chile y la Universidad de Magallanes disminuyan lo más posible y en el mejor de los casos se reduzcan a cero, con un enfoque en la energía consumida.

Para esto, primero se hace un análisis de las huellas de carbono que ambos campus han reportado, luego se estudian las matrices energéticas en las que está inserto cada uno de los campus y su huella de carbono, como es y cómo será en el futuro, para así explorar cómo sería la compensación de emisiones de  $CO_{2e}$  con la instalación de parques de generación de energía solar en el caso de la FCFM y eólica para la UMAG. Luego de esto, al no ser satisfactorio el resultado del campus Beauchef se analiza cómo puede disminuir su huella del alcance 3 con docencia remota y se exploran posibilidades de reducción de emisiones para el caso de la UMAG, esta vez de alcance 1 con la calefacción y de alcance 2 con eficiencia energética.

Para finalizar se grafica el resultado que supone la implementación de cada medida, para una fácil comprensión y se concluye que en el caso de la FCFM ésta no podría ser carbono neutral sin compra de bonos de carbono y la UMAG, al tener alto potencial eólico y una matriz energética no tan prometedora puede llegar a ser hasta carbono negativa. Por último se analiza el caso conjunto de ambos campus y se obtiene que para compensar la totalidad de la huella de la FCFM habría que aplicar cada una de las medidas de reducción y mitigación.

# Dedicatoria

Gracias a la vida que me ha dado tanto.

Me dio una familia que pese a estar fracturada tiene un centro sólidamente dispuesto por tres pilares apoyados en una especie de pirámide sin caras: unidos en un vértice sólido estable por la inercia, pero también por fuerzas de roce estático. Cada poste es uno por sí solo y la estructura se podría apoyar en dos de ellos, pero si se extrae una arista el centro de gravedad tiende a caer hacia ese lado.

Me dio amigos que pese a la distancia no pierden el contacto. Aguante ese bando de ameba, los cumpleaños del Santoro, el patio de comidas con el metralleta y FF y cómo olvidarme del superclásico de Tu Viejo contra Tu Vieja. Como dijo un personaje no tan querido de una serie muy querida “me gustaría que hubiera una manera de saber que estás en los viejos tiempos antes de dejarlos”.

Gracias Ramón por mantener el contacto a pesar de que nos veamos una vez cada dos años.

Gracias Reynaldo por darme la motivación para terminar de redactar este documento y de darte el tiempo de revisar incluso cuando los tiempos están estrechos. Gracias profe Luis por darme un tema que me interesa tanto y gracias Claudia por todo el apoyo que me brindaste a la distancia.

Gracias Lore por ese apañe mientras escribía; sin ti habría sido más monótono que disertación en primer año. Le diste color a mis mañanas y le diste sentido a las tardes. La mejor para pasar una cuarentena 10/10 volvería a tener un año de cuarentena contigo.

Gracias a todas esas personas que contestaron mi encuesta. Sin ustedes la encuesta no habría aportado para este trabajo: es por esto que como ustedes se tomaron el tiempo de contestarla, yo me tomo el tiempo de agradecer personalmente, desde los y las que pusieron su nombre completo hasta los connotados como Oziell (Golden boy), El Hombre, el Simisusio, FF, Avatar Aang (que cuando yo lo necesité no desapareció) (gracias Avatar Aang), Peligro y Pipeño. Lista completa: Christopher Marin, Daniel, Diego Céspedes, Antonia Labarca Sánchez, Miguel, Mariela Contreras Lizama, Nicolás Barrera, Tonka Simunovic, Andrés Herrera, Javier Prado Ceroni, Benjamín Mendoza Velásquez, Valeria, Lorna Cid, Valeria Vallejos Franciscangeli, Scarleth Betancurt, Agustoncio Gonzalez, Claudio Carvallo, Ignacio Cuellar, Constanza Andrade, Catalina, Pablo, Terry, Josefa Rojas, Paula Pinto, Oziel, Javier Pismante, Isidora Mancilla, Ignacio Gajardo (nunca e ido a la facultad, ¿Qué pongo abajo? D: ), Pedro Pablo Rodríguez, Benjamín Castro, Edgardo merino, Pascal Griott, Alvaro, Leslie Cardneas, Gabriel Guajardo Orrego, Benjamín Galaz, María la del Barrio, Ignacio Ancatripai, Diego Hurtado, Antonia Gonzalez, Shenlok, Francisco Sanhuesa Matamala, Karina, Francisca, Matías Méndez Zenteno, Lisa Peña, Felipe Dupouy, Constanza Aray, Luis Felipe escares garay, Pablo de la Fuente, Ricardo, Tomás Bustamante, Amaranta, Jaime Madariaga, Ricardo Silva, Cata, Jerónimo Sota, Rodrigo Alborno, Fabián, Paula, Samuel Farias, Luis Jimenez Verdugo, Vicente Torelli, Arturo Troncoso, Andrés Montoya, Valentina Urrea, Lorena Olivares Jorquera, Lukas Pavez, José Guerrero, Leonardo Garrido, Ignacio Ortiz, Louise, Diego Araya, Carlos Aravena Abadal, Oscar Henríquez, Sebastián Urbina, Javiera Correa, Fernando Jerez Ibarra, Romina Sepúlveda, Joaquín Cubelli, Juan Quilapi, Jael Villalobos, Martín Fuentealba, Coni, Juan Pablo Jara, Jorge Isla, Javier, Alejandra Toro, Néstor Henríquez, Nicolás Ramírez, Camila Toloza, Ignacio Araya P., Andres Ojeda, Atías Aedo, Fran Zepeda, Luckas Diaz

# Agradecimientos

Renjifo, Benjamin, Macarena Avilés, Keila, Joaquín, Sicely, Catalina Leppe, Felipe Vergara M., Francisca Herrera, Lissett Celle, Javiera Jiménez Rojas, Andrés Arriagada, Marcelo Benitez Marquez, Daniel S, Waldo, Matías “El Hombre” Araya Satriani, Carolina Chiu, Maximiliano Guardiola, Andrés González, Matías Sepúlveda Godoy, Matías Martínez Perez, Matias Villena, Eduardo el Simisucio aka Pelao Bastardo Maldito, Paulina Soto, Valentina León Miranda, Martina Navarro, Daniela, Jose Vera, Sebastian Arevalo Caceres, Pablo Carlete, Christian Briceño, Fabian, Peligro, Alondra, Larry Caverga, Vale Norambuena, Gerard Cathalifaud Salazar, Francisca Cona Flores, Joaquin Herrera S, F, Benjamín Irrarázabal, Antonio López, Jerko Raffo, Karla, Gabriel Jaramillo Torrejón, Leonardo Meneses Yévenes, José Ignacio Moya, Bressler, Sebastian hernandez, René Argenmeyer, Aníbal López, Juan Pablo Baez, Eduardo Oñate Oyaneder, Cecilia Pilar, Diego, Consuelo, Alejandra Domínguez, Sofía Pinilla, Rodrigo, j, Tamara Carrasco Agurto, Francisca Contreras, Camilo, Victoria Iturra Urzúa, Avatar Aang, Diego F, Consuelo, Matías Vidal Valladares, Luis Inostroza, Nicolás Guzmán Placencia, Francisca, Alejandro Torres, Nicolas Cortes, Cristóbal Gallardo, Barbara Ulloa, Josefina Hernandez, Marcia Paredes, César, Nicolás, Javiera, Javiera, Almendra Flores B, Jean Cherubini, Bárbara Contreras Bustamante, Ignacio León, Malu, Daniel, Sebastián Ricardo Montenegro Mansilla, Pablo Villar Mascaró, Bárbara Goncalves, Diego Canales, Sebastian Avendaño, Kay, victoria, Gabriel Pereira Vilches, Matías Diddier Salinas Muñoz, Romina Corro, Benjamín Silva, Pablo Márquez, Sebastián Sabat Misle, Bernardita Pizarro, Valentina Gallardo, Brandon Alvarado G., Cristóbal Muñoz, Karla Paredes, Alvarito, El Mismísimo, Javier Marinkovic, Danitza B., Paz, Camila, Uwuowo, Ismael, Jocelyn Linares Rivas, Sr. Mojón, Le10, Francisca Leyton, Tomás Leyton, Nathalie, Luciano Mora, Bárbara Arellano, Félix, Natalie tapia, Javiera Baez :3, Constanza Carreño Ramírez, Rodrigo Arenas, Camila, Tamara, Juan Pablo Cerda, Jorge Sepúlveda Ruiz, Marianne Gudenschuager Ruiz, Maximiliano Valladares Gaete, Joaquin Moraga, Matias Pincheira, Patricia, Sebastian Garcia, Rocio Mondaca, Giulianna Pesce, Felipe Cárdenas, Felipe, Magdalena, Tomás Vásquez, Joaquín Figueroa Barrera, Gabriela, Felipe Escárate, David Alegria, Dani, Gustavo, Nicole Fruns, Rodrigo Isalvatore Moreno, Juanma G., Eduardo, Francisco, Bryan Ortiz Pizarro, Natalia, Esteban Muñoz, Catalina, Fernanda, Michael Scott, Diego Rivera, Daniela Lasso, Francisco Bustos, Benja, Sofía Gross, Camilo Escalante, Cristian Llull, Emiliano, Catalina Ramírez Lira, Ignacio Díaz Lara, Sebastián Sánchez, UwU, Vreni, Gabriel, Fabian Poblete, Jose Antonio Hernando Zegers, (no, gracias), Dilandinho, Tomás, josefina, nicolas, Simón Lourido, Samuel Giordano M., Matías Núñez, Simón Amigo, Andrés Medina, Sebastián Villalón Figueroa, Lucas Aravena H, Ignacio Ortego Brugueras, Francisca, Gonzalo Claro, Katherin Ramírez, Iván Fuentes, Luis Becerra, Sofía Agosto, Joaquin, Samuel Jorquera, Nicolás Santibáñez, Felipe Méndez, Benjamín Vargas Palavecino, Jorge Cantillana, Alan Cáceres, Ulises Faúndez uwu, Julio Albornoz, a, Emiliano Salazar Lizana, Martín Cox Kuntsmann, Isaac Cho, Tatiana, Amigo Francisco, Alonso, Angelo Muñoz, Felipe Valdevenito, Gabriel Covarrubias Maureira, Cristóbal Alarcón Iturra, Vicente Maldonado, Enzo Olivares, Fernando Torres, Cristóbal Jiménez Vásquez, Gabriela, Ignacia Segovia, Valeria Bustamante, Ricardo Contreras, Belén Muñoz Bravo, Felipe Lucero, Martin Rubio, Daniela Mora, Rosario molinari, Lore, Paulina Espinoza, Agustín Soto, Matías Rojas, Gabriela Tala, Don Roberto González Vidal, Consuelo, Beltrán Cubillos, Sebastián Borquez, Lissett Rebolledo, Karin, Ale Rubio, Camila Maire, Benjamín, Karina, Camila Toloza, Daniel O., Mirko Kacic, Carola Lohidoy Lee, Constanza Pamiez, Valentina del Picó B., Cristian Lillo, Paolo Martiniello, Gabo, Pipeño (Felipe Leal, si lo encuentras muy poco serio), Javiera Abrigo López, Fernando Iturra, Fernanda Borja, Felipe Montecinos, Maomi x), Francisco Almeida, Emma Mado Bustos, Salomé Huerta Álvarez, Francis Tapia, Keila Silva Ojeda, Jose Williams, Alejandra Alarcón, Rodrigo Rojas, J y Kitsu Sandoval.

Gracias al que lea estas páginas.

““You miss 100% of the shots you  
don’t take – Wayne Gretzky”  
- Michael Scott”  
- Emilio Méndez

# TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos .....	1
1.2.1	Objetivo general.....	1
1.2.2	Objetivos específicos .....	2
1.3	Alcances .....	2
2	Marco teórico.....	3
2.1	Institucionalidad climática .....	3
2.1.1	Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC).....	3
2.1.2	Ministerio del Medio Ambiente (MMA) .....	3
2.1.3	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC).....	3
2.2	Gases de efecto invernadero.....	4
2.3	Efecto invernadero .....	4
2.4	Huella de Carbono.....	5
2.4.1	Cálculo de la HdC .....	5
2.5	Generación de energía.....	8
2.5.1	Solar fotovoltaica .....	8
2.5.2	Generación eólica.....	10
2.5.3	Generación térmica .....	13
2.6	Tarificación eléctrica.....	14
2.6.1	Cálculo de la tarifa AT3.....	15
2.6.2	Cálculo de la tarifa AT4.3.....	16
2.7	Captación.....	17
2.8	Energía geotérmica.....	18
2.8.1	Geotermia de alta entalpía.....	18
2.8.2	Geotermia de baja entalpía.....	21
3	Universidades y Cambio Climático .....	24
3.1	Proyectos interesantes .....	24
3.1.1	El caso de la UTEM.....	25
4	Metodología.....	27
5	Los casos de estudio .....	27
5.1	Antecedentes de la FCFM de la Universidad de Chile .....	28

5.1.1	Medición de la huella de carbono .....	28
5.1.2	Su demanda eléctrica .....	30
5.2	Antecedentes de la Universidad de Magallanes .....	32
5.2.1	Medición de la huella de carbono .....	32
5.2.2	Su demanda eléctrica .....	33
6	Emisiones por alcance 2 .....	35
6.1	El SEN.....	35
6.1.1	Huella de Carbono en el SEN .....	38
6.2	El SEM .....	39
6.3	El Recurso renovable.....	41
6.3.1	Laguna Carén .....	41
6.3.2	Punta Arenas .....	42
6.4	¿Instalación de ERNC? .....	44
7	Otros métodos de reducción de emisiones.....	51
7.1	Docencia remota.....	51
7.2	Geotermia .....	53
7.3	Eficiencia energética .....	54
7.4	Bonos de carbono .....	55
7.5	Opción de cambio de tarifa con miras al ahorro monetario .....	57
8	Caminos a seguir.....	59
8.1	FCFM .....	59
8.1.1	Opción base.....	59
8.1.2	Opciones de disminución con docencia remota.....	60
8.2	UMAG.....	61
8.2.1	Alcance 2.....	62
8.2.2	Geotermia.....	63
8.2.3	Caso combinado.....	63
8.3	Situación cooperativa .....	64
8.3.1	Caso base.....	64
8.3.2	Mediante alcance 2.....	65
8.3.3	Mix de propuestas .....	67
8.4	Tabla de resumen.....	67
9	Análisis y discusión .....	70
10	Conclusiones.....	72
11	Trabajo futuro .....	73

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 esquema metodológico del GHG Protocol .....	6
Ilustración 2 curva de generación genérica de un panel fotovoltaico .....	10
Ilustración 3 ejemplo curva de Shear. Elaboración propia con valores inventados. De esta imagen se debe rescatar la forma que toma la curva y las rotulaciones. ....	12
Ilustración 4 ejemplo curva de potencia del aerogenerador Enercon E-33 300 kW .....	13
Ilustración 5 carta de operación de un generador sincrónico .....	14
Ilustración 6 esquemático de sistema geotermal de alta entalpía.....	16
Ilustración 7 esquemas de generación para plantas de geotermia de alta entalpía.....	20
Ilustración 8 sistema geotérmico de baja entalpía horizontal, disposición de la canalización básica ....	21
Ilustración 9 sistema geotérmico de baja entalpía horizontal, disposición de la canalización en serie ..	21
Ilustración 10 sistema geotérmico de baja entalpía horizontal, disposición de la canalización en paralelo .....	22
Ilustración 11 sistema geotérmico de baja entalpía en configuración de canalización vertical abierta. ....	22
Ilustración 12 sistema geotérmico de baja entalpía en configuración de canalización vertical cerrada. ....	23
Ilustración 13 metodología a seguir .....	27
Ilustración 14 repartición de la huella de carbono de la FCFM por alcance, en porcentaje .....	29
Ilustración 15 repartición de la huella de carbono de la FCFM por fuente, en porcentaje .....	29
Ilustración 16 gráfico del consumo eléctrico del campus Beauchef y la proyección a futuro.....	31
Ilustración 17 repartición de la huella de carbono de la UMAG por alcance, en porcentaje .....	33
Ilustración 18 gráfico circular de la capacidad instalada en el SEN, por tecnología .....	35
Ilustración 19 gráfico de torta con la generación de energía en el SEN, por tecnología .....	36
Ilustración 20 evolución de la potencia instalada de carbón en el SEN por escenarios, proyección del CEN.....	37
Ilustración 21 comparación de generación de energía, por tecnología ante los escenarios de descarbonización 11.....	38
Ilustración 22 evolución de la huella de carbono en el SEN en un escenario acelerado .....	39
Ilustración 23 gráfico de torta de la matriz de generación instalada en el SEM.....	40
Ilustración 24 perfil de viento en el terreno donde está emplazado el campus de la UMAG .....	42
Ilustración 25 perfil de elevación de la rugosidad del terreno, cercanías de la UMAG .....	43
Ilustración 26 curva de Shear en Punta Arenas.....	44
Ilustración 27 proyección de emisiones por alcance 2 de la FCFM .....	45
Ilustración 28 curva de generación de la turbina ATB Riva Calzoni .....	47
Ilustración 29 generación normalizada de energía con altura de buje de 56 metros .....	48
Ilustración 30 potencia normalizada de generación con altura de buje de 76 metros.....	48
Ilustración 31 disposición de los aeros para un parque en terreno de la UMAG.....	49
Ilustración 32 precios de mercado para bonos de carbono .....	56
Ilustración 33 evolución de la huella de carbono de la FCFM sin acciones de mitigación .....	59
Ilustración 34 evolución de la huella de carbono en la FCFM quitando un día de la semana.....	60
Ilustración 35 evolución de la huella de carbono en la FCFM con presencialidad optativa.....	60
Ilustración 36 evolución de la huella de carbono en la FCFM con un día menos en la semana y presencialidad optativa.....	61



Ilustración 37 evolución de la huella de carbono en la UMAG con la instalación de un aerogenerador .....	62
Ilustración 38 evolución de la huella de carbono en la UMAG con la instalación de 3 aerogeneradores .....	62
Ilustración 39 evolución de la huella de carbono en la UMAG con geotermia .....	63
Ilustración 40 evolución de la huella de carbono en la UMAG con geotermia y generación eólica .....	64
Ilustración 41 evolución de la huella de carbono conjunta, caso base.....	65
Ilustración 42 evolución de la huella de carbono conjunta con generación eólica .....	66
Ilustración 43 posiciones de los aeros en un parque de 2,5 MW .....	66
Ilustración 44 evolución de la huella de carbono conjunta considerando todas las propuestas.....	68

## Índice de Tablas

Tabla 1 cargos por energía y potencia a las tarifas de cliente regulado.....	25
Tabla 2 desglose de los alcances en que se midió la huella de carbono de la FCFM en 2019 .....	28
Tabla 3 desglose de los alcances en la medición de la huella de carbono de la FCFM.....	30
Tabla 4 consumo de electricidad de cada unidad administrativa dependiente de la FCFM y su porcentaje relativo .....	30
Tabla 5 consumo histórico de electricidad del campus Beauchef .....	31
Tabla 6 emisiones por alcance en el último reporte de huella de GEI UMag.....	32
Tabla 7 principales aportes ala huella de carbono de la UMAG, por alcance .....	33
Tabla 8 demanda eléctrica en la UMAG, calculada.....	34
Tabla 9 cantidades de potencia instalada por tecnología en el SEN .....	36
Tabla 10 cantidades de energía generada en el SEN, por tecnología .....	36
Tabla 11 capacidad instalada por tecnología en el SEM .....	40
Tabla 12 radiación recibida en el terreno de Laguna Carén .....	41
Tabla 13 potencia instalada necesaria de un parque solar para compensar la huella de la FCFM .....	45
Tabla 14 energía necesaria para compensar la huella de la UMAG .....	46
Tabla 15 datos del aerogenerador escogido para modelar compensaciones de alcance 2 de la UMAG .....	46
Tabla 16 valores esperados de generación y factor de planta para la instalación eólica .....	48
Tabla 17 reducción de emisiones por movilización de la comunidad con docencia remota en la FCFM .....	52
Tabla 18 composición del gas natural.....	53
Tabla 19 precio de las emisiones, en bonos de carbono; por alcance y total.....	52
Tabla 20 comparación enter los pagos con distintas tarifas - UMAG .....	53
Tabla 21 resumen de planes en miras a la carbono neutralidad.....	68

# 1 Introducción

## 1.1 Motivación

El mundo se está calentando de acuerdo a la evidencia del Intergovernmental Panel on Climate Change (2018), la cual se basa en observaciones y modelos teóricos, como los usados por Wilson & Mitchell (1987) y por Sherwood, Bony, & Dufresne (2014). De los modelos y las mediciones se estima un calentamiento global de 0,8 a 1,2 grados Celsius en 2019, desde los niveles preindustriales (en promedio) y de 1,5 grados entre 2030 y 2052 (IPCC, 2019). Todos somos responsables de que esta situación empeore (siga en aumento la temperatura) o se detenga, aunque no todos de la misma manera. Esto en el sentido de que no en todos los países se emite gases de efecto invernadero (GEI) de la misma manera, por ejemplo, Chile en 2014 emitió 82,5 megatoneladas de dióxido de carbono equivalente, mientras que España emitió 234 megatoneladas y China 10 gigatoneladas (Banco Mundial, 2020). Si bien Chile tiene bajas emisiones de CO<sub>2</sub> comparadas con países industrializados, ello no disminuye la carga ética de tener que mitigar nuestras emisiones de GEI y, en particular en el caso de los ingenieros eléctricos, nos interpela a limpiar la matriz energética chilena, para avanzar en el camino de la carbono neutralidad. Esto se ve complicado en un escenario energético en el que la matriz energética se compone en un 53% de generación con fuentes fósiles y 47% de energías renovables (ER) y energías renovables no convencionales (ERN) en abril de 2020 (Coordinador Eléctrico Nacional, 2020). Es interesante notar, eso sí, que no es que se esté limpiando la matriz, si no que entran a competir centrales renovables manteniéndose, e incluso aumentando la capacidad de generación de fuentes térmicas (CEN, 2020). Para las instituciones de educación superior y los centros de investigación en general es una obligación moral el disminuir su huella de carbono, puesto que son los principales defensores del cambio climático antropogénico. Alrededor del mundo existen universidades que han logrado en distinta medida implementar acciones en pos de esta reducción de su huella de carbono, lo que nos trae al contexto local, en el que la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (FCFM) (FCFM, 2019) y la Universidad de Magallanes (Umag) (La Prensa Austral, 2019) han declarado su intención de reducir a cero las emisiones netas de dióxido de carbono, en conjunto con otras medidas, para fomentar la sustentabilidad y consciencia por el cambio climático en sus comunidades y entornos.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

La finalidad del presente trabajo es crear planes que permitan que la FCFM de la Universidad de Chile y la Universidad de Magallanes puedan ser carbono neutrales en los plazos propuestos en las declaraciones de emergencia climática hechas por las autoridades; año 2050 para el campus Beaucheff y 2040 para el campus de la UMag. El eje principal en el que se enmarcará el presente trabajo de título serán las emisiones por consumo energético. Para ello, los objetivos específicos se desglosan en el punto siguiente.

## 1.2.2 Objetivos específicos

- Proponer la instalación de medios de generación de energía para disminuir la huella de carbono en el consumo eléctrico y/o disminuir el consumo de potencia en las horas de punta, en los empalmes que tengan potencia de punta contratada según la tarifa que le aplica.
- Proponer medidas de eficiencia energética detectadas en respuesta a auditorías energéticas a hacer en los capus.
- Observar el comportamiento de la huella de carbono en escenarios de compensación en conjunto o por separado de los campus.
- Recomendar un cambio de tarifa contratada con la distribuidora para generar ahorros en las cuentas de luz y así obtener fondos para implementar las medidas propuestas.

## 1.3 Alcances

En los siguientes puntos se detallan los límites en los cuales se enmarcará el trabajo, para lograr cumplir los objetivos en el plazo estipulado.

- Se evaluará la posibilidad de instalar medios de generación de energía solar fotovoltaica en las inmediaciones de la FCFM, eólica en las de la UMag y térmicas de ciclo abierto o ciclo cerrado en ambas en base a biomasa.
- Las auditorías se realizarán según la norma ISO 50.001 con los equipos que existan actualmente en las facultades y se estimará en base a constantes encontradas en la literatura los valores de transferencias energéticas de los equipos y estructuras en los que que no se pueda medir.
- La medición, reporte y detección de oportunidades de compensación y mitigación se harán mediante el GHG Protocol.
- Las tarifas eléctricas que se analizarán son las reconocidas por la norma chilena. También se considerará el cambio de cliente regulado a cliente libre, según las proyecciones de precios de energía para clientes regulados y clientes libres.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Institucionalidad climática

La institucionalidad climática se establece para monitorear el impacto que tiene el ser humano sobre su entorno, medirlo y plantear medidas para mitigarlo y/o revertirlo. En este sentido se han creado una serie de instituciones que velan por estos objetivos, sean ONGs como Greenpeace y la WWF, instituciones gubernamentales locales como ministerios o instituciones intergubernamentales como la WMO. En este trabajo de memoria de título interesarán tres organizaciones en particular: el IPCC, el MMA y la UNFCCC.

#### 2.1.1 Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC)

El IPCC es una organización compuesta por 195 países, que forman parte de Naciones Unidas o la Organización Mundial del Clima (WMO por su sigla en inglés) y fue “creado para proporcionar a los encargados de formular políticas evaluaciones científicas periódicas sobre el cambio climático, sus implicancias y posibles riesgos futuros, así como para presentar opciones de adaptación y mitigación” (IPCC, 2020).

Entre las publicaciones destacadas del IPCC y que son de particular interés para el presente trabajo de memoria de título se encuentran: Calentamiento Global de 1,5°C, Informe de Evaluación 5 Cambio Climático 2013: la Base Científica Física e Informe de Evaluación 5 Cambio Climático 2014: Mitigación del Cambio Climático.

#### 2.1.2 Ministerio del Medio Ambiente (MMA)

El MMA es la principal institución que vela por el medio ambiente en el país y esto lo hace mediante la regulación ambiental y sus organismos y programas que regulan y fiscalizan la integridad e impacto ambiental que tienen los nacionales y extranjeros en sus proyectos o actividades dentro del territorio chileno. Del MMA dependen instituciones como el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA), los que regulan la parte ambiental de los proyectos entrantes y fiscalizan el impacto que realmente tienen estos respectivamente. Importante destacar que los alcances de la operación de la SMA no está acotado a proyectos, si no que también fiscaliza organizaciones, empresas, eventos, etc.

#### 2.1.3 Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC)

La UNFCCC es un secretariado de Naciones Unidas que se preocupa del cambio climático. En particular, su objetivo es “estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero atmosféricos en un nivel que prevenga la interferencia del ser humano en el sistema climático, en un tiempo que permita a los ecosistemas adaptarse naturalmente y promueva el desarrollo sostenible” (Naciones Unidas Cambio Climático, 2020).

El secretariado principalmente regula las negociaciones entre países en los acuerdos por acciones a tomar para combatir el cambio climático y ayuda a la implementación de las medidas acordadas. En este sentido, es el encargado de velar por el cumplimiento del protocolo de Kyoto y del Acuerdo de París. Entre otros, también mantiene el registro de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC), organiza los espacios de negociación mencionados y tiene una funcionalidad “de bolsa” para los mercados internacionales de carbono.

## 2.2 Gases de efecto invernadero

Los Gases de Efecto Invernadero (GEI) son los principales forzantes del sistema climático terrestre. Estos son definidos como:

Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad ocasiona el efecto invernadero. (IPCC, 2018, p.193).

Los gases de efecto invernadero de por sí no son dañinos para el planeta, si no su exceso o su déficit. El principal problema con ellos es que desde la revolución industrial el hombre ha estado emitiendo una cantidad de GEI a una tasa superior a la que la biósfera puede manejar y esto hace que haya un superhábit de GEI en la atmósfera, ocasionando el efecto invernadero. La principal fuente de emanación de GEI en Chile (actualizado en 2016) es la industria energética, seguida de la agricultura, luego procesos industriales y uso de productos, seguido de cerca por el sector de residuos. El uso de la tierra y silvicultura se comporta como sumidero de GEI, teniendo un fuerte impacto en las emisiones netas a nivel nacional (Ministerio del Medio Ambiente, 2018). Ahora bien, dentro del sector energía se detecta un mayor porcentaje de emisiones en la subcategoría de industrias de la energía, que considera las emisiones generadas por quema de combustibles debido a la industria de generación de energía y las actividades de extracción de combustible (Ministerio del Medio Ambiente, 2017).

Entre los gases de efecto invernadero, se encuentran el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el metano ( $CH_4$ ), el óxido nitroso ( $N_2O$ ), los halocarbonos ( $HFCs$ ), los perfluoruro carbonos ( $PFCS$ ) y el hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ ), entre otros. En particular el listado anterior es el que se encuentra reconocido por el protocolo de Kyoto (United Nations, 1998), sin perjuicio que haya una lista más extensa, que incluya gases como el ozono ( $O_3$ ) y los clorofluoruro carbonos ( $CFCs$ ).

## 2.3 Efecto invernadero

El efecto invernadero es una especie de mecanismo que tiene la tierra para regular la temperatura en superficie. Este se define como sigue:

(...) Los gases de efecto invernadero, las nubes y (en pequeña medida) los aerosoles absorben la radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra y otras partes de la atmósfera. Estas sustancias emiten radiación infrarroja en todas las direcciones, pero, si todo lo demás es igual, la cantidad neta emitida al espacio es normalmente menor de lo que se habría emitido en ausencia de estos absorbedores debido a la disminución de la temperatura con la

altitud en la troposfera y el consiguiente debilitamiento de la emisión. Un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero aumenta la magnitud de este efecto (...). El cambio en la concentración de gases de efecto invernadero debido a las emisiones antropogénicas contribuye a un forzamiento radiactivo instantáneo. La temperatura de la superficie y la troposfera se calientan en respuesta a este forzamiento, restaurando gradualmente el equilibrio radiativo en la parte superior de la atmósfera. (IPCC, 2013).

En el fondo, la Tierra emite la radiación a cierta altura en la atmósfera, y este sector debe estar a cierta altura para poder radiar su energía. El problema con los GEI es que en una mayor concentración de la natural, elevan la altura a la que el planeta emite su radiación; como la atmósfera (al menos en esta sección) disminuye la temperatura a medida que se aumenta la altura, debe subir la temperatura de la tierra en superficie para lograr compensar esta diferencia de temperatura para la emisión de radiación a la nueva altura.

## 2.4 Huella de Carbono

La Huella de Carbono (HdC) es una herramienta que se tiene para cuantificar la emisión de GEI a la atmósfera por parte de una empresa, organización, ciudad, país, etcétera. Su nombre es *huella de carbono* porque se mide en unidades de masa de *dióxido de carbono equivalente* ( $CO_{2eq}$ ), es decir, al cuantificar las emisiones de GEI de una organización, estas son reportadas en toneladas, o kilogramos de  $CO_{2eq}$ . Las emisiones de  $CO_{2eq}$  se enuncian para mantener un monitoreo de estas y así tener estimaciones certeras de variación de la temperatura en el planeta por forzamiento radiativo, además de funcionar como insumo para la UNFCCC al verificar el avance hacia las metas definidas por los países al negociar reducciones o mitigación de emisiones de GEI.

### 2.4.1 Cálculo de la HdC

El cálculo de la huella de carbono de una organización o entidad consiste en el cálculo de las emisiones totales de GEI, convertidas a unidades de  $CO_{2eq}$ , para ser reportadas. Las emisiones pueden ser reportadas por varios motivos, entre los que se encuentran los programas gubernamentales, los mercados de carbono, el cálculo de HdC por iniciativa propia, aspiración a certificación de sustentabilidad en edificios, el cálculo para identificar oportunidades de mitigación, entre muchos otros.

Calcular la HdC de una empresa es todo un desafío, ya que las emisiones de GEI son, como su nombre lo indica, gaseosas, lo que dificulta el pesaje de ellas. Resulta complejo también saber qué gases son los emitidos por los procesos de la organización, por ejemplo, en la combustión de los derivados del petróleo no participan solamente los compuestos orgánicos que los componen, hay un número no determinado pero medianamente conocido de impurezas que son igualmente contaminantes, pero que no serían contabilizados en un simple balance químico de la combustión del compuesto que se cree que está mayormente presente en la sustancia. También está el problema de si la organización que está en proceso de calcular su huella de carbono tiene operaciones en conjunto con otras entidades y en qué medida le corresponde mitigar las emisiones de GEI que resulten de estas operaciones en conjunto. Es por esto que existen diversos protocolos y normas para la medición y reporte de la huella de carbono de empresas, organizaciones u otros; para facilitar la identificación de GEI a contabilizar y la cuantificación de estos GEI al calcular la huella de carbono.

El GreenHouse Gas Protocol (GHG Protocol) en su versión *corporate standard* y tal como indica el World Business Council for Sustainable Development & World Resources Institute (2004), es una de las guías que se tiene para reportar emisiones de GEI, considerando las razones de por qué se realiza el inventario de carbono; cómo definir las barreras organizacionales u operativas de operaciones en conjunto y cómo contabilizar las emisiones en estos casos; cómo definir la referencia del momento en que se empieza a contabilizar, o para comparar en caso de hacer el inventario por mitigación; da cuenta de cómo identificar y calcular las emisiones de GEI que se tiene; da una guía de cómo monitorear la calidad del inventario y de cómo contabilizar las reducciones de emisiones; y entrega un estándar para el reporte de emisiones de GEI. Además de esto da una guía de cómo verificar la veracidad del reporte y de cómo establecer metas de emisiones. Para esto se basa en 5 principios, de relevancia, completitud, consistencia, transparencia y exactitud (World Business Council for Sustainable Development, 2015).

La metodología que sigue el GHG Protocol es como se muestra en la ilustración 1.



Ilustración 1 esquema metodológico del GHG Protocol<sup>1</sup>

A continuación se explica cada uno de los pasos de la metodología presentada en la figura:

- **Definición de metas:** para comenzar el inventario de GEI y el reporte se debe tener claro qué se pretende lograr con el cálculo de la huella de carbono de la institución. Para esto se suele definir metas de reducción en porcentaje de emisiones totales, en niveles de emisiones por persona, emisiones por dólar gastado, o emisiones por dólar ganado.
- **Definición de límites:** los límites del inventario son importantes porque se define qué emisiones serán contabilizadas y cuáles no. Hace referencia a los límites de control operacional o económico que tiene la institución sobre las actividades en las que cuenta las emisiones. GHG Protocol señala que se debe contabilizar las emisiones de las actividades en el porcentaje en que dependa operacional o económicamente de la organización que calcula el inventario.
- **Año base:** Corresponde al año sobre el cual se compararán las emisiones que se cuentan en el inventario de emisiones. Se usa para reportar mitigación, por ejemplo: en comparación con las emisiones del año 2007 se ha reducido un 37% de las emisiones de GEI hasta el 2020. Es importante señalar que las emisiones del año

<sup>1</sup> Esquema de elaboración propia.

base se deben ajustar al incluir o eliminar de las actividades de la organización sumando (o restando) las emisiones estimadas que tuvo la actividad (o que habría tenido) en el año base.

- Tiempo de compleción: El tiempo de compleción del inventario tiene que ver con el tiempo en que se estima que dura el conteo de las emisiones de la institución que realiza el conteo. Suele ser de un año.
- Tiempo de compromiso: Es el tiempo que se declara que se medirá la huella de carbono y la medición se ajustará al Protocolo. Idealmente es el mayor tiempo posible.
- Uso de compensación: La compensación corresponde a una reducción en las emisiones del inventario de la organización debido a proyectos que se implementan. Por ejemplo, al instalar una planta de generación de Energía Renovable no Convencional y consumir electricidad de ahí hay una cantidad de energía que se dejó de producir por el sistema eléctrico al que se está conectado. Así, se puede restar del inventario esas emisiones que dejaron de emitir debido al proyecto. En compensación también cuenta la compra de bonos de carbono. Las emisiones en las que se deja de incurrir en un sistema eléctrico (como en el ejemplo anterior) y la fijación de carbono por bosques pueden ser transadas en mercados de carbono. En particular, la UNFCCC cuenta con una plataforma en la que es posible transar estos bonos de carbono, comprándoselos a proyectos que se realizan en países en vías de desarrollo para fomentar el desarrollo sostenible (UNFCCC, 2020).
- Seguimiento y reporte: El Protocolo señala que para que un inventario de emisiones pueda ser publicado, este debe ser verificado por un ente externo que certifique la veracidad de lo señalado. Al tener certificación de que lo declarado es real, el conteo de las emisiones de GEI puede ser usado en programas de reporte o de reducción de emisión de GEI.

Dentro del cálculo de la huella de carbono es importante reconocer el concepto de *alcance*. Los alcances para la cuantificación de la huella de carbono tienen que ver con la procedencia del GEI emitido y la responsabilidad en el sentido de *a quien pertenece* este gas emitido. Para diferenciar los alcances, estos se separan en tres subdivisiones:

- Alcance 1: dentro del alcance 1 están todas las emisiones de GEI que son responsabilidad directa de la empresa que hace el inventario de emisiones. Dentro del alcance 1 se incluyen por ejemplo los vehículos que posee la organización, la generación de energía, la quema de leña, de combustibles fósiles, etc;
- Alcance 2: las emisiones correspondientes al alcance 2 son todas las resultantes de la generación de la energía que compra la organización de la red. Por ejemplo, si una empresa compra toda su energía del sistema en un momento en que la generación solar FV es mayoritaria en el sistema, tendrá una huella de carbono menor que si esa misma energía la estuviera consumiendo de noche, que es cuando los paneles fotovoltaicos no están funcionando y entran a generar tecnologías térmicas; y
- Alcance 3: el alcance 3 es el más difícil de cuantificar, ya que corresponde a las emisiones indirectas que tiene una organización. Con emisiones indirectas se refiere a todas esas emisiones de GEI que son necesarias para que funcione la empresa, pero que no entran en el alcance 1 ni en el alcance 2. Ejemplos de emisiones por alcance 3 son emisiones en consecuencia de la movilización de personal en



transporte público o privado, las emanaciones de GEI de los residuos que son desechados como basura y un largo etcétera.

Cabe mencionar que la contabilización de las emisiones de GEI deben atenerse a los 5 principios del GHG protocol, por ejemplo, un viaje en taxi al año es probablemente mucho menos contaminante que movilizar 50 personas en un bus todos los días, que es donde entra el principio de relevancia, pero también es difícil conocer las emisiones que tiene este bus en sus viajes, porque habría que saber la composición de la gasolina que quema para moverse, la antigüedad del motor, el estado de los rodamientos y muchos detalles que son imposibles de saber a ciencia cierta. Es por esto que se usan métodos estandarizados de contabilización de emisiones.

Para la contabilización de emisiones existe una variedad de herramientas entre las que se encuentran la calculadora que proporciona GHG Protocol en su página web, está huellas Chile, se puede calcular haciendo las suposiciones necesarias, entre otros. Estas calculadoras sirven para cualquiera de los tres alcances, pero hay que tener en consideración que la exactitud que se logra es dependiente del conocimiento que se tiene del proceso o máquina que va a emitir y de la propia calculadora.

## **2.5 Generación de energía**

Como se mencionó en los objetivos específicos, se evaluará una serie de tecnologías para generar energía eléctrica para autoconsumo. Entre ellas habrá una solución solar, una eólica y al menos una térmica. A continuación se exponen algunos de los parámetros técnicos de cada uno.

### **2.5.1 Solar fotovoltaica**

La generación de energía con fuente fotovoltaica ha ido ganando terreno en la matriz energética del SEN (Comisión Nacional de Energía, 2019), llegando hasta un 11,5% de la capacidad instalada de la matriz energética (Energía Abierta, 2020), esto debido a que los costos de las tecnologías están siendo competitivos e incluso mejores que los de tecnologías convencionales (Dobrotkova, Surana, & Audinet, 2018).

El principio de funcionamiento de la tecnología solar fotovoltaica se basa en el efecto fotoeléctrico, que genera potencia en corriente continua. El efecto fotoeléctrico consiste en la excitación de electrones y huecos en una juntura de dos medios semiconductores dopados, uno con cargas negativas (aporta electrones) y el otro con carga positiva (aporta huecos). Esta juntura crea una celda fotovoltaica. Así, conectando los terminales para un circuito en los costados de esta celda, se puede aprovechar una porción de la radiación para convertirla en electricidad. Por extensión, se pueden conectar estas celdas entre sí, con lo que se arma un panel fotovoltaico. Los paneles FotoVoltaicos (FV) se pueden conectar entre sí para aumentar la capacidad instalada de la solución de generación de energía.

#### **2.5.1.1 Conexiones entre paneles FV**

Para enunciar cómo se deben conectar los paneles en una instalación de generación de energía debemos remitirnos a la naturaleza de las variables eléctricas que impone un panel fotovoltaico en un circuito. Primero que nada, los paneles FV se comportan como fuentes de corriente (por el efecto

fotoeléctrico), por lo que para conectarse en serie deben tener la misma consigna de corriente, si no, se viola la Ley de Voltajes de Kirchoff (Estévez, 2009). Esto se logra en la práctica utilizando paneles del mismo tipo (misma cantidad de celdas, mismos materiales, misma manufactura). Al conectar paneles solares en serie, y considerando que entre los terminales existe una diferencia de potencial, las tensiones de los paneles se suman (si están conectados de manera correcta), siendo la tensión resultante de esta suma igual a la que se podría medir entre los terminales de los paneles más alejados eléctricamente. Llamaremos *string* a esta serie de paneles fotovoltaicos conectados en serie. Para aumentar la corriente (y por consiguiente la potencia) del arreglo, se deben conectar la cantidad necesitada de estos strings en paralelo. Se debe tener en consideración que el número de paneles en los strings debe ser igual entre los arreglos en paralelo para respetar la Ley de Voltajes de Kirchoff. Así, al conectar  $n$  strings en paralelo, la corriente resultante del arreglo será  $I = n * i$ , donde  $I$  sería la corriente saliendo del arreglo,  $n$  el número de strings conectados en paralelo e  $i$  la corriente que genera un panel, lo que se justifica directamente de la Ley de Corrientes de Kirchoff (Estévez, 2009).

En cuanto a la conexión entre un arreglo fotovoltaico y un consumo de corriente alterna (o para ser conectado a la red) se debe intercalar un inversor entre el arreglo y el consumo. Este aparato, mediante técnicas de modulación generalmente (como PWM) convierte la señal de corriente continua de la salida del arreglo FV en una señal alterna en sincronía con la red.

#### 2.5.1.2 Potencia en un panel FV

La potencia en un panel solar se calcula igual que en cualquier equipo eléctrico, con la fórmula enunciada a continuación.

$$P = V * I$$

Donde  $P$  corresponde a la potencia generada,  $V$  el voltaje entre terminales e  $I$  la corriente saliente del panel. Cabe destacar que la potencia máxima que genera un panel solar está limitada por las características físicas de sus celdas. En general, su curva de generación se ve como se muestra en la ilustración 2.

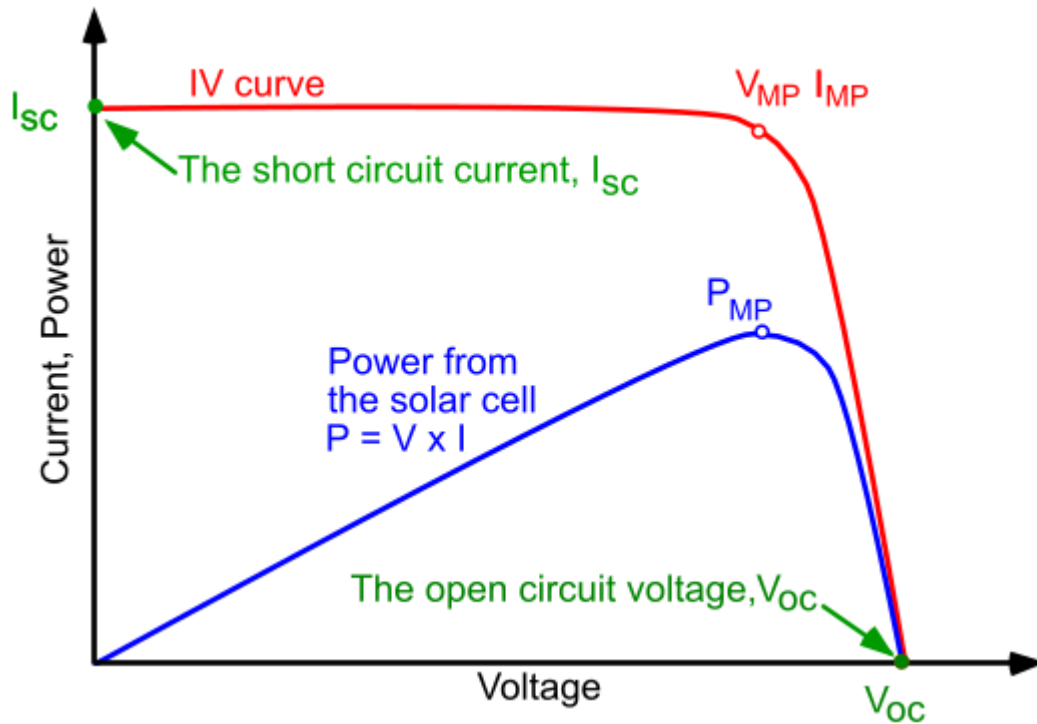


Ilustración 2 curva de generación genérica de un panel fotovoltaico<sup>2</sup>

En la figura anterior se muestra la curva genérica de generación de un panel solar fotovoltaico, donde  $I_{MPP}$  corresponde a la corriente de máxima potencia,  $I_{SC}$  es la corriente de cortocircuito,  $MPP$  es el punto de máxima potencia,  $P_{MPP}$  es la máxima potencia generable,  $V_{MPP}$  es el voltaje en el punto de máxima potencia y  $V_{OC}$  la tensión en circuito abierto. Alteraciones a la curva se comentan a continuación:

- Al disminuir la intensidad de la luz incidente en los paneles, disminuye el valor de  $I_{SC}$  y por consiguiente la corriente generada por los paneles. La intensidad de luz incidente puede disminuir por sombras en el panel, puede disminuir por suciedad, o por la inclinación del panel con respecto al plano perpendicular con el sol.
- Al aumentar la temperatura de los paneles solares, disminuye el voltaje de circuito abierto y con el el voltaje de operación. Esto puede deberse a la temperatura ambiente y al aumento de temperatura por disipación de potencia por parte de las resistencias internas de los paneles (Zaini, y otros, 2015).
- Los inversores modernos cuentan con seguidores del punto de máxima potencia, por lo que cambian la consigna de voltaje y corriente mediante electrónica para aprovechar el máximo de potencia instantánea que se puede obtener del panel.

## 2.5.2 Generación eólica

La generación de energía eólica consiste en el aprovechamiento de la energía cinética del viento para generar electricidad. Éstas tecnologías se instalaron por primera vez en el SIC el año 2007

<sup>2</sup> Del recurso online *IV Curve* (PVEducation, 2017)

(Revista Electricidad, 2007) y ha ido tomando fuerza dentro del mercado eléctrico chileno. La principal ventaja que tiene la generación eólica con respecto a la solar es que en el territorio nacional se puede distribuir de mejor manera: desde cierta latitud, los días al durar menos, reciben menos radiación solar, lo que hace a la generación solar menos atractiva. No así el recurso eólico, que depende de los distintos vientos que existen en el planeta (a mayor escala, vientos Alíseos, ondas de Rossby y las celdas de Hadley y las de Ferrel) y de la rotación de la tierra, que desplaza los vientos de este a oeste por las fuerzas de Coriolis.

No se ahondará en el principio de funcionamiento más que enunciar que no es posible extraer toda la energía que arrastra el viento por restricciones físicas, como la conservación de momentum aplicada al caudal de aire que cruza el área barrida por el rotor del aerogenerador y que impone un límite teórico de la conversión de energía llamado límite de Betz que corresponde aproximadamente al 57% de la energía contenida en la masa de aire. Este límite puede calcularse con las ecuación de balance de energía y de conservación de momentum, las que no se especificarán en este marco teórico.

#### 2.5.2.1 El recurso eólico

El insumo que usan los aerogeneradores para producir energía eléctrica es el viento. El viento está presente en todo el planeta y se da por diferencias en la presión de masas de aire cercanas, así, no hay localidades que sean no interesantes a priori.

Hay muchas maneras de conocer el recurso eólico en una zona, aunque las más confiables y que se suelen usar para justificar proyectos de generación de energía son bastante costosos. Dentro de las no tan costosas está la utilización de modelos meteorológicos, como la utilización del explorador eólico. Dentro de las más confiables está la medición del recurso con SoDAR, LiDAR o directamente con una torre de prospección. Con instrumentos de medición, o con la instalación de la torre, se puede confeccionar la curva de Shear, que corresponde a un perfil vertical del viento. Un ejemplo de curva de Shear se muestra en la ilustración 3.

### 2.5.2.2 Potencia en un aerogenerador

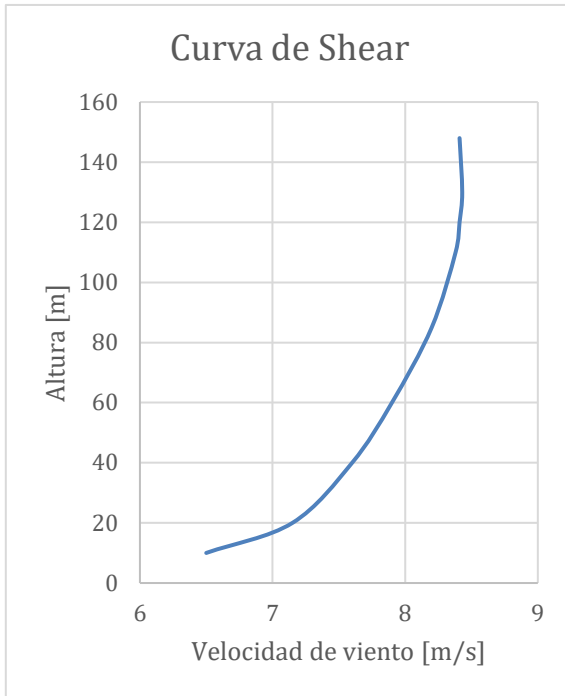


Ilustración 3 ejemplo curva de Shear. Elaboración propia con valores inventados. De esta imagen se debe rescatar la forma que toma la curva y las rotulaciones.

Los aerogeneradores son las torres que se ven en cada parque de generación eólica. Sus mástiles se fijan en una fundación, y en el tope de la obra está la góndola, con la máquina generadora dentro y el rotor girando en uno de sus costados, con las palas que reciben el viento y giran de acuerdo a su magnitud. La máquina que está dentro de la góndola es una máquina asincrónica, esto significa que no tiene una frecuencia fija de rotación, haciéndola imposible de conectar a la red sin antes una variación de esta frecuencia. Pese a ser una máquina asincrónica, su consigna de generación no está definida por el deslizamiento (diferencia porcentual entre la velocidad del rotor y la del flujo magnético sincrónico del estator), si no que depende de controles internos del aerogenerador. Un ejemplo de curva de generación de un aerogenerador se puede ver en la ilustración 4. En este caso se ha usado la curva de potencia de la turbina Enercon E-82 2,3 MW. Como se ve en la ilustración 4, los aerogeneradores no producen energía para ciertos rangos de velocidades de viento que son entre 0 y 3 metros por segundo y desde los 24 m/s

aproximadamente en adelante. Estos rangos definen las llamadas *velocidad de cut-in* y *velocidad de cut-out*, respectivamente. Se nota un rango donde la potencia aumenta cúbicamente con la velocidad de viento. Esta función se modela con la ecuación siguiente.

$$P = \frac{1}{2} A \rho v^3 C(\lambda, \beta)$$

En la ecuación anterior  $A$  equivale al área de barrido de las palas,  $\rho$  es la densidad del viento,  $v$  es la velocidad del viento y  $C(\lambda, \beta)$  corresponde a un parámetro dependiente de un factor de seguimiento del MPP en la turbina eólica  $\lambda$  y del ángulo de pitch  $\beta$ . El ángulo de pitch es el ángulo de rotación de las aspas, lo que hace que capturen en mayor o menor medida el viento incidente y así proteger al aerogenerador de rotar a velocidades peligrosas. Después de la curva ascendente de potencia tenemos el valle de potencia máxima antes de llegar a la velocidad de *cut-off*. Este valle existe por el parámetro  $C(\lambda, \beta)$ , que con técnicas de control automático ajusta el ángulo de pitch.

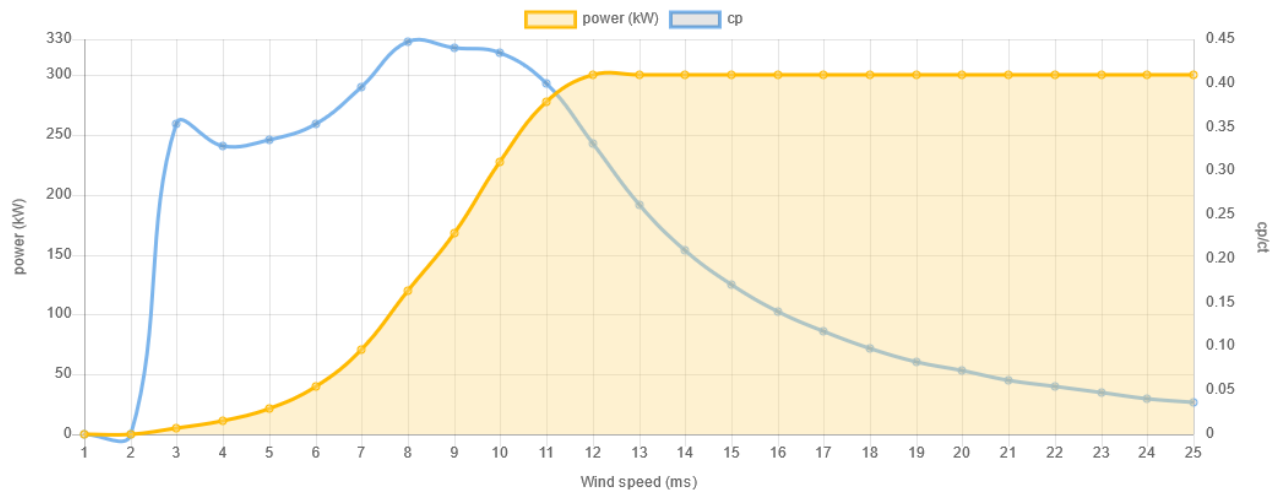


Ilustración 4 ejemplo curva de potencia del aerogenerador Enercon E-33 300 kW<sup>3</sup>

### 2.5.3 Generación térmica

La generación de energía con fuentes térmicas es el más común de ver en Chile, con el 53% de la matriz energética instalada (CEN, 2020). Las máquinas térmicas son sumamente útiles para un sistema eléctrico que funciona con corriente alterna, ya que, al tener suficiente cantidad de éstas se logra una inercia tal que las variaciones rápidas en la demanda se pueden absorber sin necesidad de tener máquinas de respaldo que reaccionen con control rápido de frecuencia. En Chile las primeras máquinas térmicas fueron a carbón. Luego las máquinas de gas a ciclo abierto tuvieron un crecimiento explosivo cuando se construyeron los gasoductos desde Argentina, hasta que los argentinos decidieron dejar de exportar gas natural hacia Chile, con lo que muchas de éstas tuvieron que adaptarse. Además de estos dos tipos aparecen las máquinas a diésel, que son las más contaminantes de todas y las que funcionan con el combustible más caro, pero también son las más rápidas en tomar o botar carga, por lo que han podido entrar al SI.

Las máquinas térmicas para generación de energía son máquinas sincrónicas y aunque no se detallará el principio de funcionamiento de éstas, se puede ver en la ilustración 5 la carta de operación de un generador sincrónico.

<sup>3</sup> Del recurso online *Enercon E-33 / 300* (Bauer & Matysik, 2019)

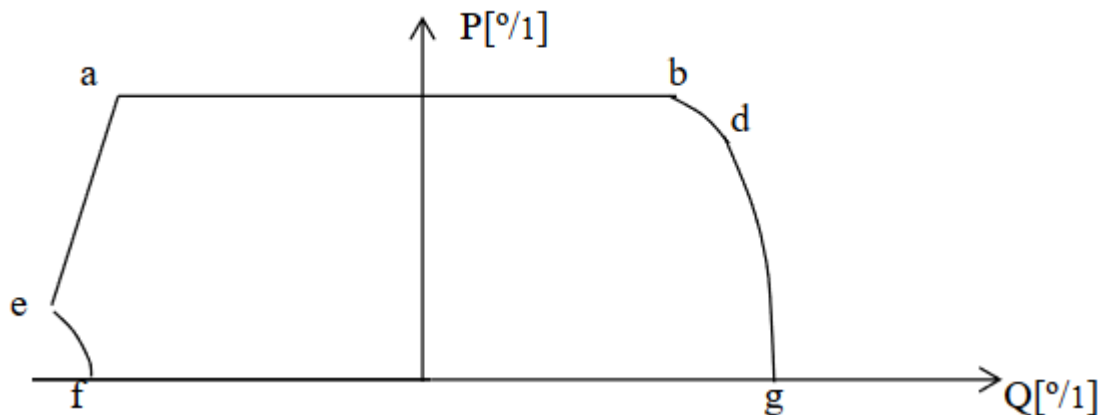


Ilustración 5 carta de operación de un generador síncrono<sup>4</sup>

En la figura se notan una serie de límites, los que corresponden más que nada a aspectos máximos y mínimos en excitación del rotor, potencia activa máxima generable por la máquina y la recta en a corresponde a un límite de estabilidad.

### 2.5.3.1 Biomasa

Llamamos biomasa a todo residuo orgánico, generalmente sólido cuya función es ser quemado para aprovechar la energía almacenada en sus enlaces químicos. En particular interesa la basura de la que se puede aprovechar el gas metano emanado para hacer funcionar una máquina térmica.

## 2.6 Tarificación eléctrica

Las tarifas eléctricas dan cuenta de lo que cuesta consumir electricidad al cliente final. En Chile hay dos opciones en general para pagar la cuenta de luz: cliente regulado y cliente libre. Los clientes regulados son aquellos que tienen una potencia instalada menor o igual a 500 kW, mientras que los clientes libres deben tener un mínimo de 5 MW instalados. Los clientes con potencias instaladas entre 500 kW y 5 MW tienen la opción de escoger a qué sistema de pagos se acogen con su distribuidora.

Existen 11 tipos de tarifas que se le cobra a clientes regulados, como enuncia la CGE en su página web (Compañía General de Electricidad, s.f.). Dentro de la tarificación hay una serie de cobros, que son:

- Cargo fijo mensual: Se cobra todos los meses, independiente del consumo.
- Cargo por arriendo: Se cobra el uso del medidor de energía, si es de propiedad de la distribuidora.
- Cargo por energía base: Se obtiene multiplicando la lectura de energía para el mes del cliente por el valor de la energía.

<sup>4</sup> De los apuntes de Jorge Romo – conversión electromecánica (Romo, 2015)

- Cargo por energía adicional: La energía consumida sobre un cierto límite se cobra a distinto precio. Un ejemplo de esto es el cobro por energía adicional de invierno, cuyo límite es de 430 kWh.
- Cargo por potencia contratada: Se calcula multiplicando la potencia contratada por el precio del kW en alta o baja tensión.
- Cargo por demanda máxima: Calculado multiplicando la energía máxima de facturación por el precio unitario de la potencia.
- Cargo por potencia en horas de punta:
- Cargo por potencia en horas fuera de punta:

Un resumen de las tarifas y los cargos que suponen se muestra en la tabla 1. Cabe mencionar que la diferencia entre una tarifa AT y una BT es que el empalme está conectado a 400 Volt o menos cuando se paga BT y sobre 400 Volt paga AT.

Tabla 1 cargos por energía y potencia a las tarifas de cliente regulado

	Cargo fijo mensual	Energía base	Energía adicional	Potencia contratada	Demanda máxima	Potencia en punta	Potencia fuera de punta
BT1							
BT2 / AT2							
BT3 / AT3							
BT4.1 / AT4.1						Contratada	Contratada
BT4.2 / AT4.2						Medida	Contratada
BT4.3 / AT4.3						Medida	Medida

Los precios de energía y potencia a los que se someten los clientes libres dependen de la negociación con la distribuidora.

En particular, en el presente escrito interesan las tarifas AT3 y AT4.3, las que se calculan con el método detallado a continuación.

### 2.6.1 Cálculo de la tarifa AT3

La tarifa AT3, como se enuncia en la tabla 1, cobra un cargo fijo mensual, arriendo de medidor, cobro por energía consumida y por demanda máxima (con el bemol de ser demanda



máxima en punta o fuera del horario de punta); antes de proceder al cálculo en sí hay que hacer el siguiente cálculo previo:

$$P [kW] = \text{Max} \left\{ \begin{array}{c} D_{40} \\ \text{Max} \left\{ \begin{array}{c} D_{max} \text{ del mes} \\ D_p \end{array} \right\} \end{array} \right\}$$

Donde:

- $P$  es la potencia a cobrar;
- $D_{40}$  es el 40% del mayor de los cargos por  $D_{max}$  de los últimos 12 meses; y
- $D_p$  es el promedio de las 2 demandas más altas en meses punta (abril a septiembre de los últimos 12 meses, incluido el mes de facturación).

Así, y dependiendo de el horario de consumo de la potencia máxima, el consumo se calcula con la fórmula:

$$\$ = C_f + C_E \times E + C_{ppp} \times P + CSP \times E$$

Donde:

- $C_f$  corresponde al cobro por cargo fijo;
- $C_E$  es el cobro por energía;
- $E$  es la energía consumida en el período;
- $C_{ppp}$  es cargo por potencia presente en punta ó por potencia parcialmente en punta;
- y
- $CSP$  corresponde al cargo por servicio público.

### 2.6.2 Cálculo de la tarifa AT4.3

Para este caso, considera un cobro por potencia distinto en invierno y verano; también se ajusta la potencia haciendo un cálculo para verificar el cobro y es el siguiente.

$$P_{hp} [kW] = \begin{cases} D_{mm} & \rightarrow \text{entre abril y septiembre} \\ P_{dm} & \rightarrow \text{entre octubre y marzo} \end{cases}$$

$$P_s [kW] = P_{2dmax}$$

Donde:

- $P_{hp}$  es la potencia en horas de punta;
- $D_{mm}$  es la demanda máxima del mes;
- $P_{dm}$  es el promedio de las 2 demandas más altas registradas durante las horas punta del período anterior;
- $P_s$  corresponde a la potencia suministrada; y

- $P_{2dmax}$  es el promedio de las 2 demandas más altas de los últimos 12 meses.

Finalmente, para calcular la tarifa se sigue la siguiente fórmula.

$$\$ = C_f + C_e \times E + C_{pc} \times P_s + C_{php} \times P_{hp} + CSP \times E$$

Donde:

- $C_{pc}$  es el cobro por potencia contratada; y
- $C_{php}$  es el cobro por potencia en hora de punta.

## 2.7 Captación

Una buena manera de disminuir la huella de carbono de una institución, o de una persona natural es la captación de carbono mediante el plantado de especies que capturan el dióxido de carbono atmosférico y lo fijan en el terreno y/o lo usan para crecer: convirtiendo el dióxido de carbono en glucosa mediante fotosíntesis. Para el presente trabajo de memoria no es importante en sí la captación, pero se declara como una buena manera de disminuir emisiones de  $CO_{2eq}$  por sobre los métodos convencionales, que consideran reducciones de consumo eléctrico, huella de transporte y quema de especies.

En particular, la cantidad de  $CO_{2eq}$  fijada por una planta, o por un conjunto de plantas se puede calcular de una serie de maneras:

- Haciendo una estimación de lo que fija, con valores representativos para la especie en un lapso determinado.
- Calculando en base a estimaciones del crecimiento de las especies en un lapso determinado. Éste método supone la estimación de la cantidad de  $CO_{2eq}$  fijada según la composición propia de la especie.
- Tomando mediciones en terreno de la planta y estimando según su función alométrica, que es la variación de dimensiones relativas de una parte del cuerpo para con el organismo completo (Gayon, 2006).

Para el presente trabajo de memoria no representa un mayor aporte esta sección debido a la lejanía del tema con los objetivos específicos y el general. En todo caso, se reconoce una oportunidad de aporte cuantioso en la lucha contra las emisiones de GEI de una solución de este estilo para la FCFM debido a la gran extensión de terreno disponible por la Universidad en Laguna Carén. En caso de ser considerada se debe tener en mente el impacto ambiental de la solución; no puede haber una propuesta que se supone amigable con el medio ambiente y que pueda tener efectos adversos al bioma en donde se inserta.

Para mayor información se recomienda leer las publicaciones del Ministerio Para la Transición Ecológica del Gobierno de España “Guía para la estimación de absorciones de dióxido de carbono” (MITECO, 2019) y para el ámbito local “Funciones alométricas de contenido de

carbono para quillay, peumo, espino y litre”, publicación de una serie de investigadores de la Universidad Mayor (Cruz, Bascuñán, Velozo, & Rodrgz, 2015).

## 2.8 Energía geotérmica

La Geotermia corresponde al conjunto de fenómenos térmicos presentes al interior de la tierra, los cuales pueden ser aprovechados para climatización o para generación de energía. Ésta es considerada un tipo de Energía Renovable No Convencional porque (al menos a una escala humana) su operación no supone el agotamiento de la fuente generadora, que correspondería a la energía térmica almacenada en acuíferos o rocas subterráneas. Su energético primario es la temperatura interna de la corteza terrestre, la cual existe por transferencia mediante conducción desde el manto mediante estructuras rocosas internas.

Un sistema geotérmico se compone básicamente de tres componentes: primero, el **calor** contenido bajo suelo (excluyente) que puede presentarse contenido en un medio caliente en una roca o un fluido; un **fluido** para intercambio de calor entre el reservorio subterráneo y la instalación de aprovechamiento en la superficie; y la **permeabilidad** del medio subterráneo donde se hará la transferencia de calor. Cabe señalar que al faltar alguno de los elementos, igualmente es posible conseguir un sistema geotermal, mediante inyección de un fluido (usualmente agua) al tener un sistema geotérmico seco, o mediante *fracking* que corresponde a una técnica usualmente usada en la industria petrolera que consiste en inyectar un fluido a alta presión directamente a la roca para que esta se rompa y así poder obtener el resultado deseado; en el caso de la industria de hidrocarburos, para conseguir que el petróleo y/o gas natural contenido pueda fluir hacia la boca del pozo (Opaso, Toledo, & Yurisch, 2017), mientras que para la geotermia, el fracking sirve para permeabilizar la roca del reservorio subterráneo de calor.

El aprovechamiento de la energía geotérmica se puede dividir en dos grandes grupos: la geotermia de alta entalpía y la de baja entalpía.

### 2.8.1 Geotermia de alta entalpía

La geotermia de alta entalpía es la que aprovecha la energía almacenada en reservorios de alta presión y temperatura (sobre 150°C) y se suele usar para generación de energía. En el caso de la geotermia de alta entalpía se suelen usar reservorios profundos porque para alcanzar altas temperaturas se debe estar cerca de un cuerpo caliente, en particular, en Chile estos *puntos calientes* que servirían para generación de electricidad se distribuyen a lo largo de la Cordillera de Los Andes, siguiendo por lo general la cadena volcánica activa presente en este cuerpo montañoso (Aravena et. al, 2016). En la imagen de la ilustración 6 se puede notar un esquema de sistema geotermal tipo de alta entalpía para generación de energía eléctrica.

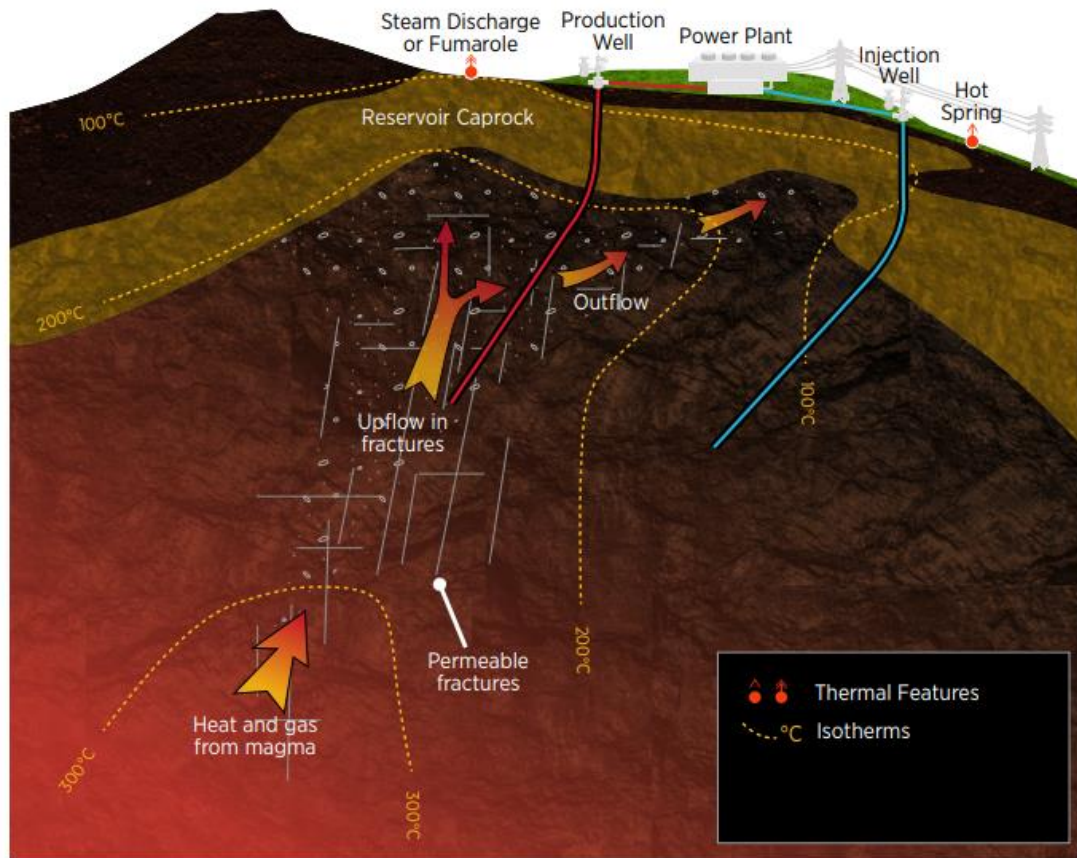


Ilustración 6 esquemático de sistema geotermal de alta entalpía<sup>5</sup>

La imagen anterior es interesante porque muestra (casi) todos los elementos que debiesen componer una planta de generación de electricidad en un sistema geotermal; se puede ver primero que toda la planta de generación, a la que están conectados los pozos de inyección y producción, que son los encargados de mover el fluido con el que se transmitirá la energía; se puede ver una línea de transmisión, conectando el proyecto con el sistema eléctrico al que le inyecta la energía; descargas naturales de agua (en forma de termas o geysers); y el sistema geotérmico. El sistema geotérmico es interesante porque de los tres elementos que lo debiesen componer hay “uno y medio”: se tiene la fuente de calor (abajo a la derecha), se tiene una porción del volumen de roca es suficientemente permeable para que se pueda mover agua libremente y otra que sería necesario permeabilizar mediante fracking y no se tiene el fluido para la transferencia de calor, el que sería proveído por la planta de generación mediante el pozo de inyección y extraído en el pozo de producción.

La generación de energía eléctrica mediante geotermia es especialmente beneficiosa para un sistema eléctrico con miras a la descarbonización, puesto que las unidades de generación utilizadas son máquinas sincrónicas conectadas al sistema, las que pueden aportar tanto energía como inercia al sistema interconectado. Las configuraciones que se usan para generación de

<sup>5</sup> Rescatada del informe GeoVision del departamento de energía del gobierno de los Estados Unidos (U.S. Department of Energy, 2019)

electricidad mediante geotermia dependen de la temperatura del reservorio, yendo entre los rangos (Tjörvi, Thorhallsson, & Steingrímsson, 2011):

- 320°C – 230°C: Sistema de condensación de vapor seco / Vapor intermitente
- 320°C – 200°C: Sistema de contrapresión de vapor intermitente
- 190°C – 120°C: Sistema binario o de dos fluidos

De los cuales se pueden ver esquemas en la ilustración 7.

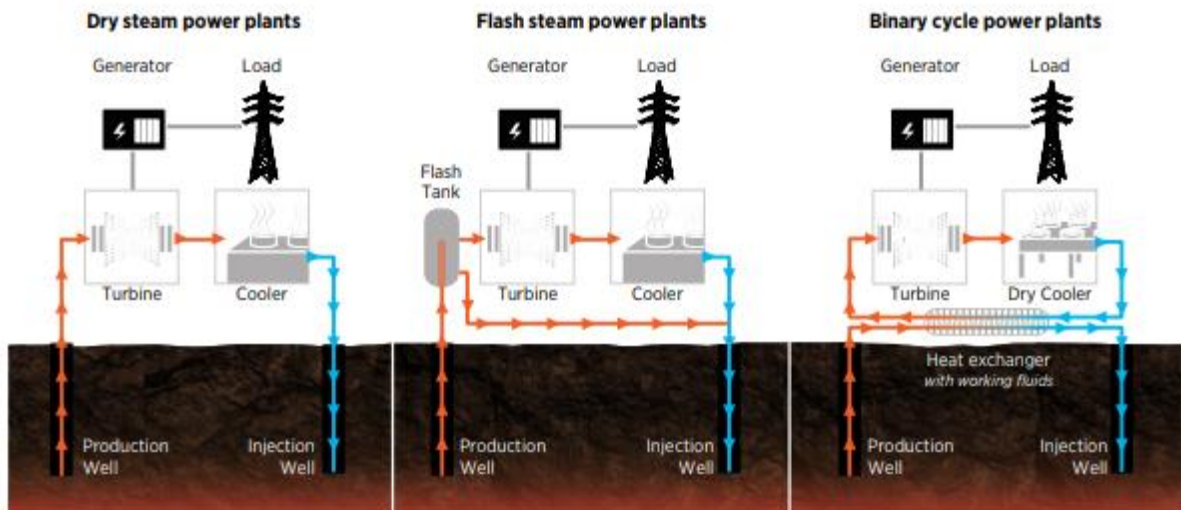


Ilustración 7 esquemas de generación para plantas de geotermia de alta entalpía

Actualmente en Chile existen 48 MWe<sup>6</sup> instalados en el SEN, en la planta de ENEL Cerro Pabellón, la cual está instalada en la comuna de Ollagüe (segunda región) y se puso en marcha en septiembre del año 2017, siendo la primera planta de generación eléctrica de Chile; Cerro Pabellón tiene hoy en día 33 MWe más en construcción. Además de Cerro Pabellón hay tres plantas proyectadas para inyectar energía al SEN, siendo ellas **Tinguiririca** de Energía Andina que se construiría en Tinguiririca (sexta región), con 100 MWe proyectados (Torres, 2019); **Mariposa** de Enerco que se construiría a unos 118 km de Talca (séptima región), con 200 MWe proyectados (ENERCO, 2020); y **Peumayén** de Transmark que hasta ahora está en fase de exploración, se ubicaría en la vecindad de las termas de Tolhuaca y las perforaciones iniciales sugieren pozos con potencial para turbinas de 9 a 12 MWe (Transmark, 2018).

<sup>6</sup> Mega Watts eléctricos

## 2.8.2 Geotermia de baja entalpía

La geotermia de baja entalpía corresponde a la que consigue su energía de reservorios con baja presión y temperatura (bajo los 120°C) y se suele usar para climatización. En el caso de la geotermia de baja entalpía se suelen usar reservorios profundos porque como las temperaturas usadas son más bajas, pueden ser encontradas en capas más superficiales de la corteza. Esta clasificación de geotermia suele tener dos subclasificaciones, la *geotermia de entalpía media* y la *geotermia de entalpía baja*, ambas usan los mismos métodos de explotación, pero se usan para motivos distintos, por ejemplo, un reservorio con temperatura suficiente para bombear fluido con 120 grados puede ser usado para secar bloques de concreto, mientras que temperaturas menores pueden ser usadas para mantener estable la temperatura de un estanque de peces para consumo.

Los métodos de extracción de calor de la tierra de la geotermia de baja entalpía se separan en dos categorías, pueden tener el circuito de fluido en configuración horizontal o verticales (Self, Reddy, & Rosen, 2012).

### 2.8.2.1 Geotermia de baja entalpía en configuración horizontal

La configuración horizontal del circuito térmico es común donde hay amplia disponibilidad del terreno. En este caso, la canalización del fluido se dispone horizontal en el terreno, a una profundidad somera y la correcta transferencia de calor del suelo para con la canalización depende de la extensión que tenga esta misma. Los tipos de disposición para la canalización pueden ser básica o con bucles en serie o paralelo. En las siguientes ilustraciones se muestra un bucle básico (ilustración 8), un bucle en serie (ilustración 9) y un bucle en paralelo (ilustración 10).

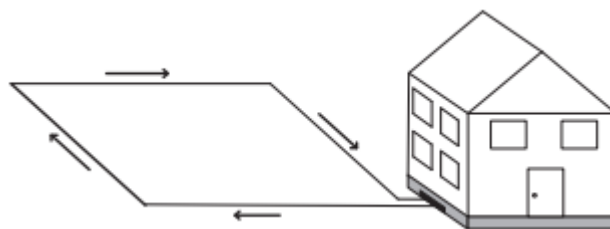


Ilustración 8 sistema geotérmico de baja entalpía horizontal, disposición de la canalización básica

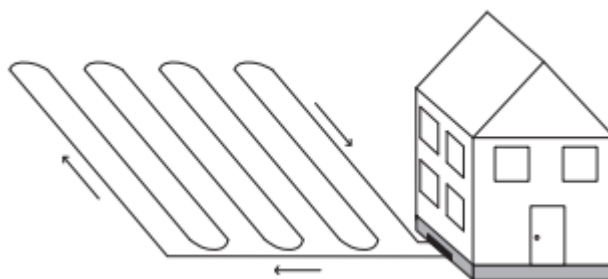


Ilustración 9 sistema geotérmico de baja entalpía horizontal, disposición de la canalización en serie

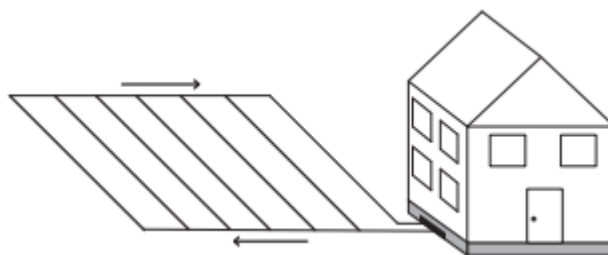


Ilustración 10 sistema geotérmico de baja entalpía horizontal, disposición de la canalización en paralelo

Es importante notar que estas soluciones de enterramiento del circuito del fluido en configuración horizontal juega un rol fundamental, puesto que si no está suficientemente enterrado, puede que no alcance una capa de tierra con suficiente inercia térmica para ser independiente de la temperatura ambiente.

### 2.8.2.2 Geotermia de baja entalpía en configuración vertical

La configuración vertical del circuito térmico es común donde hay no hay mucha disponibilidad del terreno y cuando se necesita alcanzar temperaturas mayores en el fluido. En este caso, la canalización se dispone verticalmente en el terreno, a una profundidad tal que se alcance la temperatura deseada; la correcta transferencia de calor del suelo para con la canalización depende de la extensión que tenga esta misma y la profundidad de enterramiento. Los tipos de disposición para la canalización pueden ser abierta o cerrada. En la ilustración 9 se muestra un un sistema geotérmico de canalización abierta (11) y un sistema con canalización cerrada (12).

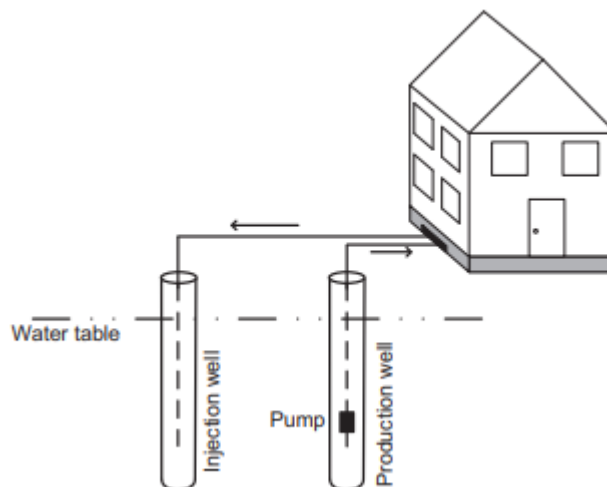


Ilustración 11 sistema geotérmico de baja entalpía en configuración de canalización vertical abierta

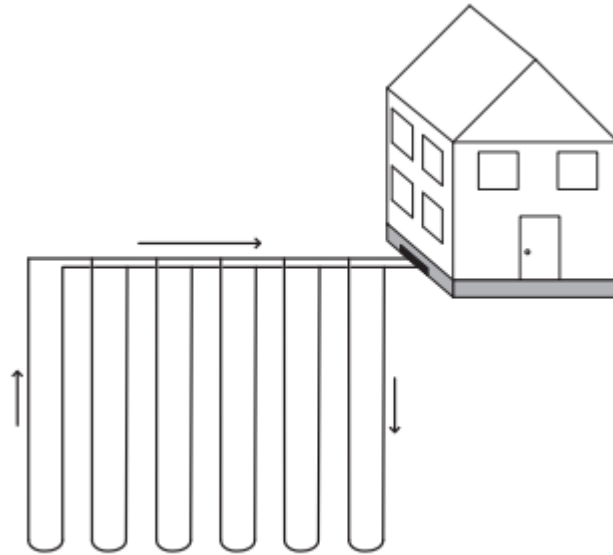


Ilustración 12 sistema geotérmico de baja entalpía en configuración de canalización vertical cerrada

La principal característica de este sistema es su parecido con los sistemas geotérmicos de alta entalpía, tanto en su concepción como en operación, inyectando hacia capas inferiores del suelo el fluido a calentar. Este método de instalación es especialmente conveniente si se necesita temperaturas mayores o más estables y/o cuando existe un reservorio acuífero en el subsuelo.

Los sistemas geotérmicos de baja entalpía son una buena solución de climatización y de calentamiento / enfriamiento de agua para proyectos a menor escala como sería uno evaluado por una vivienda particular o un edificio (departamentos, corporativo, educativo, etc). Al comparar ambas soluciones se puede ver que pese a que el sistema vertical suena más atractivo puesto que se pueden alcanzar temperaturas más estables, tiene un costo asociado más alto porque se debe perforar la tierra para insertar los canales donde va el fluido, mientras que las obras asociadas a un sistema horizontal se pueden concretar con solamente una retroexcavadora o incluso a pala.



## 3 Universidades y Cambio Climático

Las universidades son los principales frentes de acción contra el cambio climático. Esto porque en su mayoría funcionan como centros de investigación y al ser pequeñas comunidades funcionan como laboratorios para los grandes cambios en las sociedades que las rodean. Es por esto que se han estado creando organizaciones entre universidades como espacios de discusión y recopilación de buenas prácticas en el combate contra el cambio climático. Entre las agrupaciones importantes se encuentran:

- American College & University Presidents' Climate Commitment (ACUPCC): La ACUPCC se declara como un esfuerzo por abordar el desbalance en el sistema climático al que se compromete una red de universidades que han tomado compromisos institucionales para promover la investigación, educación y participación de la comunidad necesarios para avanzar hacia sociedades sustentables (Sustainable development, UN, 2017).
- Red Campus Sustentable: Como la red señala en su página web, su misión es consolidar las prácticas sustentables en su quehacer institucional y su visión es promover activamente la incorporación de herramientas, principios y valores de la sustentabilidad en la comunidad académica. (Red Campus Sustentable, 2020).
- Ranking Sustainability Tracking Assessment & Rating System (STARS): El STARS es un marco de referencia autocontenido para que universidades puedan medir su desempeño en temas de sustentabilidad (AASHE, 2019).

### 3.1 Proyectos interesantes

En el ranking STARS, las universidades reportan además de sus huellas de carbono, publican medidas que han tomado para hacer más sustentable sus campus. Es interesante eso sí la heterogeneidad en las universidades líderes en sustentabilidad, puesto que todas tienen planes distintos. Por ejemplo hay universidades (como las canadienses) que están conectadas a una red eléctrica casi 100% renovable (Hidro Québec, 2018), mientras que hay otras universidades que han hecho eficiencia energética durante toda su historia y para seguir compensando instalan generación para autoconsumo, y hay universidades que el sector energía no se toca y pese a consumir más electricidad el año de medición del año base y a tener, por consiguiente más emisiones por consumo de energía aún así están bien encaminadas (a los ojos de AASHE).

Dentro de los proyectos encontrados en la página web del ranking STARS se encontró una serie de proyectos interesantes, los que serán listados a continuación.

- Proyecto de aceras solares: la universidad de Thompson Rivers instaló 1,28 kW de aceras solares en las inmediaciones del campus (Thompson Rivers University, 2018).
- Uso de bombas de geotermia para la climatización de edificios.
- Planta de cogeneración en un vertedero.
- Sistemas automáticos de control de termostato en salas de clases y espacios comunes.

Además de los señalados anteriormente, se recomienda revisar las medidas realizadas por: la Universidad de Indiana Bloomington<sup>7</sup> (reducción de 9% de consumo eléctrico), American University<sup>8</sup> (reducción de 0,3% de consumo eléctrico), Bard College<sup>9</sup> (reducción de 2,9% de consumo), California State University Sacramento<sup>10</sup> (reducción de 4,4% de consumo eléctrico), California State University San Marcos<sup>11</sup> (reducción de 8,2% de consumo eléctrico), Universidad Central de Michigan<sup>12</sup> (reduccion de 44,3% de consumo eléctrico), Colorado College<sup>13</sup> (reducción de 12% de consumo eléctrico), Universidad de Dickinson<sup>14</sup> (reducción de 3,5% de consumo eléctrico), Universidad de Emory<sup>15</sup> (reducción de 3,5% de consumo eléctrico) y un largo etcétera. Cabe señalar que todas las universidades citadas tienen al menos la certificación gold en el ranking STARSy son de las pocas que incluyen reducción de consumo eléctrico total dentro de lo declarado.

### 3.1.1 El caso de la UTEM

La UTEM es un caso especial porque fue la primera universidad chilena en ser carbono neutral. Esto se logró haciendo un estudio exhaustivo de su huella de carbono, identificando las oportunidades que tenían en mitigación y comprando una cantidad de bonos de carbono en la bolsa de clima de Santiago (SCX).

Las medidas adoptadas por la UTEM, incluyen en primera medida, como ya se ha dicho la medición de la huella de carbono, lo que se ha hecho desde el año 2012, por lo que han podido

---

<sup>7</sup> <https://reports.aashe.org/institutions/indiana-university-bloomington-in/report/2020-02-26/OP/energy/OP-5/> - Reducción mediante mantenimiento de una máquina de cogeneración, mantenimiento de luminaria y competencia entre edificios sobre la consciencia energética.

<sup>8</sup> <https://reports.aashe.org/institutions/american-university-dc/report/2021-03-05/OP/energy/OP-5/> - Reducción mediante no uso de instalaciones en vacaciones de invierno, automatización de climatización en sus edificios y cambio a luces LED.

<sup>9</sup> <https://reports.aashe.org/institutions/bard-college-ny/report/2020-06-08/OP/energy/OP-5/> - Reducción de emisiones mediante concientización de la comunidad, uso de luces LED y automatización de la climatización, además de aplicación de la energía geotérmica de baja entalpía.

<sup>10</sup> <https://reports.aashe.org/institutions/california-state-university-sacramento-ca/report/2021-03-01/OP/energy/OP-5/> - Mantenición de temperatura dentro de edificios, climatización apagada en vacaciones y feriados, las puertas se mantienen cerradas para no perder temperatura, no se permiten calefactores ni ventiladores personales a menos que sea autorizado por el coordinador de energía y cambio de luminarias.

<sup>11</sup> <https://reports.aashe.org/institutions/california-state-university-san-marcos-ca/report/2020-12-18/OP/energy/OP-5/> - Educación energética y mantención de temperatura en espacios comunes.

<sup>12</sup> <https://reports.aashe.org/institutions/central-michigan-university-mi/report/2020-10-15/OP/energy/OP-5/> - Educación energética, campañas de concientización, sensores de movimiento para iluminación automática, instalación de paneles termosolares, otros no especificados.

<sup>13</sup> <https://reports.aashe.org/institutions/colorado-college-co/report/2021-03-05/OP/energy/OP-5/> - Temperatura estable y estándar para temporada cálida y fría en edificios, edificios académicos y administrativos funcionan de 6 am a 6 pm y recambio por luces LED.

<sup>14</sup> <https://reports.aashe.org/institutions/dickinson-college-pa/report/2021-03-05/OP/energy/OP-5/> - Temperatura estable y estándar para temporada cálida y fría en edificios, instalación de energía solar FV y aprovechamiento de iluminación con luz solar, recambio de luminaria y monitoreo de la energía centralizado.

<sup>15</sup> <https://reports.aashe.org/institutions/emory-university-ga/report/2021-03-05/OP/energy/OP-5/> - Participa en concursos de edificios eficientes, mantiene la temperatura estable en edificios, automatiza uso de energía en edificios, desconecta consumos en época de vacaciones, recambio de luminarias, aplica la técnica de estabilización de temperatura mediante techos verdes y climatización mediante geotermia. Cuenta con 1,5 millones de dólares en fondos para medidas de eficiencia energética.

hacer un seguimiento comprensivo de sus emisiones. En particular, las medidas en las que incurrió la UTEM para alcanzar la carbono neutralidad (en alcance 1 y 2, dicho sea de paso) fueron focalizadas en el alcance 2: hicieron el recambio de luminarias por paneles LED en salas de clases, medida que redujo 25% las emisiones de  $CO_{2eq}$  en el ítem de iluminación en salas de clases; remodelación de oficinas, reduciendo un 36% las emisiones en este punto; remodelación de salas de computación, reduciendo 45% de las emisiones en este punto; y renovado de baños, disminuyendo en 48% las emisiones en este punto, con lo que se pudo reducir un total de 8,41  $tCO_{2eq}$  en total, con respecto a la línea base (año 2015), y así reducir en un 0,22% las emisiones totales con respecto a las emisiones del año base (3.744,86  $tCO_{2eq}$ ) y un 1,18% de las emisiones de alcance 1 más las de alcance 2, que son las que fueron consideradas. Todo esto rescatado del informe de “Declaración de reducción de emisiones de GEI” para con Huella Chile (Huella Chile a, 2019).

Una parte interesante de este informe es su Tabla 7, donde muestra la variación de emisiones de GEI desagregadas por categorías, donde se puede ver la reducción o aumento de las emisiones contabilizadas; aquí se ve que pese a las medidas que se tomaron para disminuir la huella, se usó más energía de la red en el *año reducción* con respecto del *año base*, aumentando en un 30%. Otro punto rescatable de esta tabla es en el alcance 3, sobre *tratamiento y/o disposición de residuos*, en que declaran haber reducido en un 77% las emisiones de GEI; esta reducción no fue documentada cómo se hizo.

Como se ve en los párrafos anteriores, las emisiones no pudieron ser paliadas solamente con las medidas tomadas, por lo que salió a la bolsa de clima de Santiago para compensar el resto con bonos de carbono, donde se pagó por la adjudicación de las reducciones del Proyecto Santa Mería, proyecto de gestión de residuos por un total de 984  $tCO_{2eq}$ , neutralizando así sus emisiones por alcance 1 y alcance 2 (Huella Chile b, 2019).

## 4 Metodología

La preparación de los planes de carbono neutralidad la siguiente estructura.

Primero se analizan los sistemas eléctricos en los que están sumidos los campus para conseguir información de cómo serán las fluctuaciones de la Huella de Carbono (HdC) asociadas al alcance 2 con el tiempo. Después se hace un análisis de la demanda energética que tiene cada campus y cómo ha sido para hacer proyecciones de cómo será. Con la información de la demanda energética por campus y la huella sistémica se puede tener una proyección de la HdC que tendrán las casas de estudios por este concepto. Luego se estudia el potencial de generación de energía con fuentes renovables, emplazadas en dependencias de las universidades con las cuales se podría paliar las emisiones por alcance 2. El resto de las emisiones en las que se incurre (alcance 1 y 3) no se tocan, a excepción de la HdC asociada al transporte de estudiantes desde y hacia la FCFM y la HdC asociada a la quema de gas para climatización del campus de la UMAG. Gráficamente, la metodología se ve en el esquema de la ilustración 13.

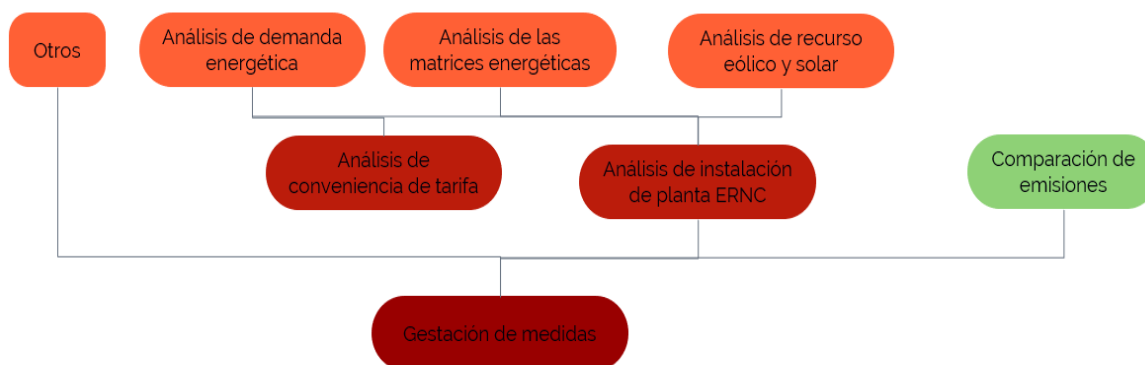


Ilustración 13 metodología a seguir

La gestión de medidas pretende disminuir por completo la HdC de los campus mediante la recomendación de la instalación de medios de generación de energía renovable. Cabe señalar que lo explicado tiene relación con lo directamente relacionado con los objetivos específicos. El *análisis de conveniencia de tarifa* pretende que la UMAG genere fondos para la realización de las medidas propuestas, mientras que el punto *otros* se incluye un análisis de cómo varía la HdC de la UMAG al sustituir la climatización con gas natural por geotérmica y cómo varía la HdC con la implementación de la docencia online en un año presencial.

## 5 Los casos de estudio

En la presente sección se analizan ambos casos de estudio: primero se hace una revisión de los últimos reportes de HdC de ambos campus y luego se estudia su demanda eléctrica, haciendo la proyección de los consumos hacia el futuro.

## 5.1 Antecedentes de la FCFM de la Universidad de Chile

La FCFM tiene una historia con la acción climática que parte el 2005 con el grupo organizado OIKOS, que eventualmente mutó en la Oficina de la Ingeniería para la Sustentabilidad (OIS) en 2013. La OIS busca “promover e integrar una cultura de Ingeniería para la Sustentabilidad en la FCFM como elemento potenciador de la formación de excelencia de nuestros ingenieros” (Oficina de Ingeniería para la Sustentabilidad, 2020) y para esto basa su trabajo en cuatro ejes: docencia, investigación, operaciones y organización del campus, y extensión (OIS, 2020). La OIS ha sido un actor fundamental en los temas que interesan a este trabajo de título, entre los que se encuentra la medición de la huella de carbono de la facultad.

### 5.1.1 Medición de la huella de carbono

La FCFM ha calculado tres veces su huella de carbono, una vez en 2013, otra vez en 2015 y la última en 2019. Este cálculo se ha dado por iniciativa primero de un estudiante y luego por la OIS, para tener claridad al momento de tomar decisiones orientadas a la mitigación y compensación de emisiones de GEI por parte de la Escuela (OIS, 2020). Para el cálculo de la última huella de carbono se consideraron las emisiones de GEI mostradas en la tabla 2, separadas por el alcance al que pertenecen, donde también se muestra la estimación de emisiones de  $CO_{2eq}$  estimadas para el período de estudio

Tabla 2 desglose de los alcances en que se midió la huella de carbono de la FCFM en 2019

	Fuente de emisión	Total de emisiones [tCO <sub>2eq</sub> ]
Alcance 1	Transporte (vehículos propios)	310
	Calefacción	
	Grupo electrógeno	
	Maquinaria	
Alcance 2	Emisiones por concepto de compra de electricidad de la red	2281
Alcance 3	Insumos (papel)	4.957
	Movilización comunidad	
	Generación de residuos	
Total		7548

En el reporte de la huella de carbono del año 2019 se calculó una totalidad de emisiones que llega a las 7.076 toneladas de dióxido de carbono equivalente, lo que se obtiene de sumar las emisiones de cada una de las fuentes descritas en la tabla 1. Gráficamente se pueden ver los porcentajes del total de emisiones por alcance en la ilustración 14, y separada por fuente en la ilustración 15.

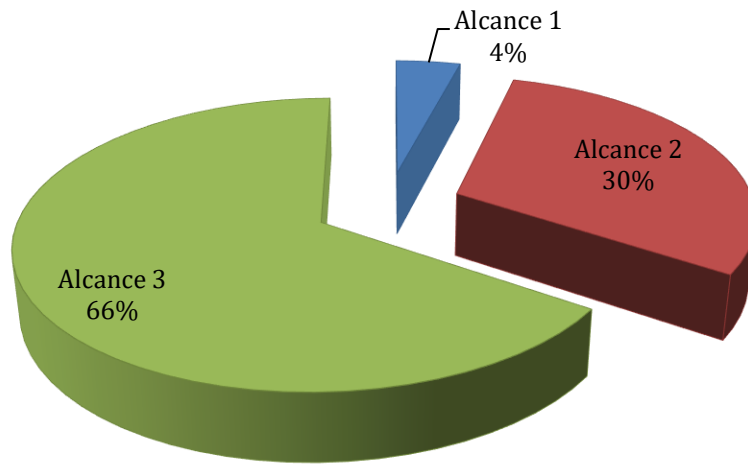


Ilustración 14 repartición de la huella de carbono de la FCFM por alcance, en porcentaje<sup>16</sup>

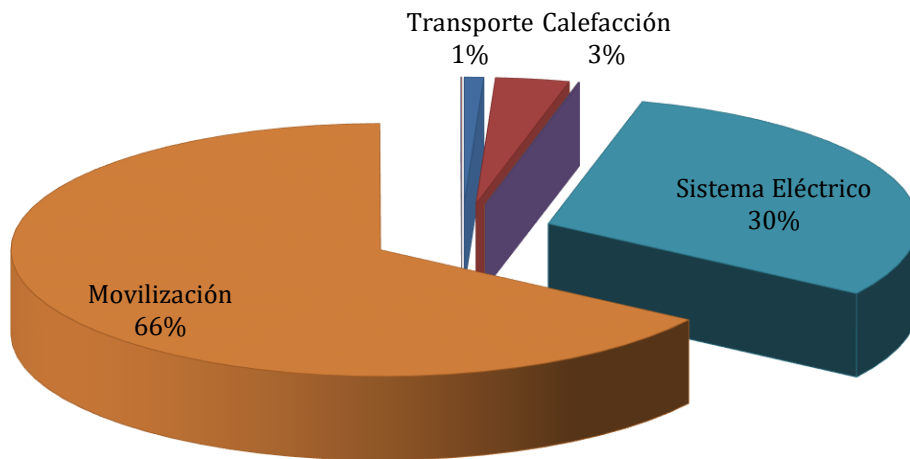


Ilustración 15 repartición de la huella de carbono de la FCFM por fuente, en porcentaje<sup>5</sup>

Actualmente la FCFM se encuentra en un proceso de estandarización del cálculo de huella de carbono, trabajo que está llevando a cabo la OIS en conjunto con un estudiante memorista. Entre los puntos que abarcan, se encuentra una estructuración de lo que se contará en cada alcance, que es lo que se muestra en la tabla 3.

---

<sup>16</sup> Del cálculo de Huella de carbono de la FCFM (OIS, 2020)

Tabla 3 desglose de los alcances en la medición de la huella de carbono de la FCFM

Alcance 1	Combustión en calderas, hornos y turbinas generadoras de electricidad
	Combustión en vehículos pertenecientes a la Facultad
	Emisiones de HFCs durante el uso de aire acondicionado y refrigeración
Alcance 2	Emisiones por concepto de compra de electricidad de la red
Alcance 3	Transporte de materiales y bienes adquiridos
	Huella de carbono de materiales y bienes adquiridos
	Transporte de combustibles adquiridos
	Viajes de docentes y alumnos financiados por la Facultad
	Movilización de la comunidad entre su residencia y la Facultad
	Transporte de residuos
	Emisiones de GEI de los residuos post deposición

### 5.1.2 Su demanda eléctrica

Los consumos eléctricos de la FCFM no se limitan a los incurridos dentro del campus, por instalaciones fuera de él, como son el observatorio en cerro Calán, los edificios del Departamento de Ingeniería Industrial (DII), otras instalaciones del Departamento de Ingeniería Mecánica (DIMEC), el IDIEM y NIC. Esto porque dependen administrativa y operacionalmente a la FCFM. Los consumos del 2019, desglosado por unidad administrativa correspondiente al medidor se muestran en la tabla 4.

Tabla 4 consumo de electricidad de cada unidad administrativa dependiente de la FCFM y su porcentaje relativo

Departamento / organismo	Consumo [kWh]	Porcentaje del total [%]	
Astronomía	428.634	3	10
DII	198.795	2	
IDIEM	374.616	4	
Facultad	157.480	1	
DIMEC	65.118	1	
NIC	183.060	2	
B851 oriente y poniente	4.323.777	35	90
Geología – Geofísica – Civil	1.556.954	13	
851 norte	2.388.154	20	
Química	1.230.954	10	
Torre Justicia – DIE – DFI	1.291.076	11	

Como se puede ver en la tabla, los consumos en medidores que están emplazados directamente en el campus y sus cercanías ascienden a un 90% de los consumos eléctricos, pero esto no es pretexto para no contabilizar a los demás, que de cualquier manera aunque 10% sea bajo no es para nada despreciable.

El consumo eléctrico histórico del campus se muestra en la tabla 5, que contiene datos entre 2011 y 2019<sup>17</sup>.

Tabla 5 consumo histórico de electricidad del campus Beauchef

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Consumo [MWh]	11.182	11.825	12.589	13.393	13.749	12.716	12.814	12.382	12.225

Para hacer la proyección del consumo eléctrico de la FCFM se supone un aumento o disminución de consumo de un 5% anual, lo que gráficamente se ve en la ilustración 16.

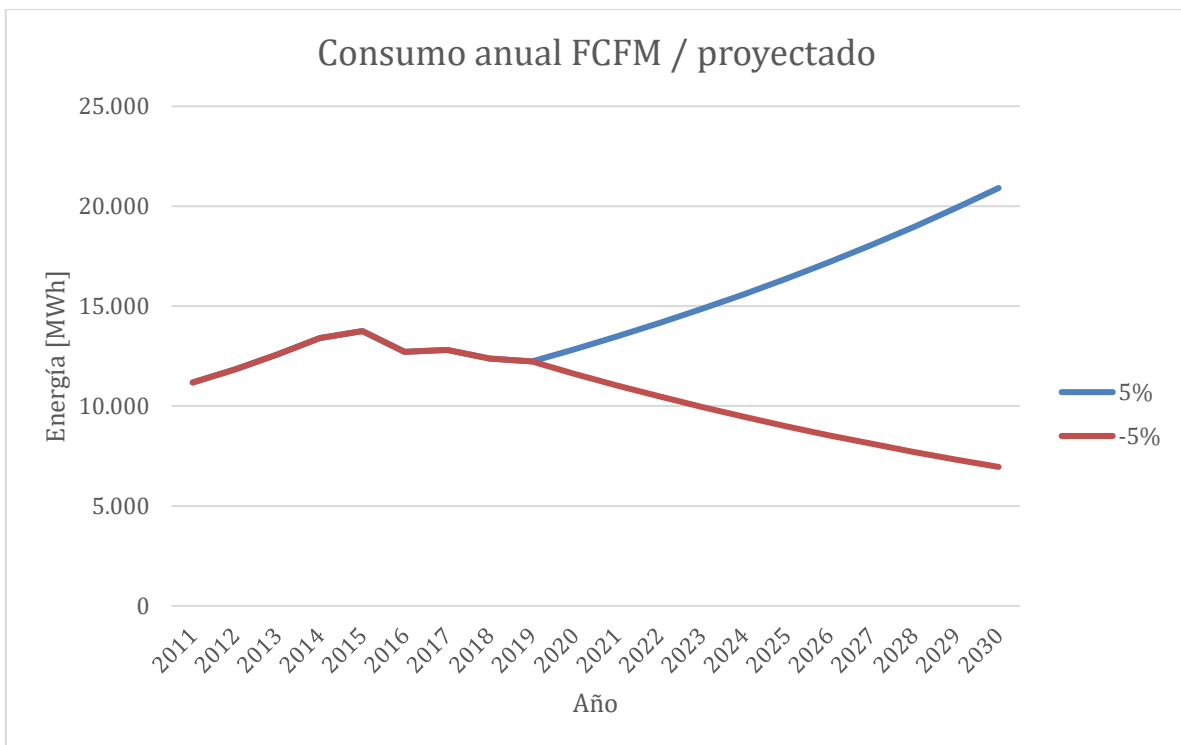


Ilustración 16 gráfico del consumo eléctrico del campus Beauchef y la proyección a futuro<sup>18</sup>

<sup>17</sup> Los datos entre 2011 y 2015 son aproximaciones. Más información en el Anexo A.

<sup>18</sup> Gráfico construido con lo declarado por la OIS y las aproximaciones que se enuncian. El aumento/disminución de consumo en 5% responde a un máximo de variación del consumo energético de la Facultad propuesto y no suena descabellado, viendo que el máximo de variación en un año fue de 8% entre 2015 y 2016, mientras que el promedio simple entre los años de los que se tiene consumo es de 4%. En este sentido se reconoce que 5% suena exagerado, pero viendo una variación superior al 5% en 4 de los 8 cambios de año se encuentra razonable. También se reconoce que la Facultad tendrá esfuerzos para disminuir el consumo eléctrico, por lo que el porcentaje “hacia arriba” podría ser menor pero se decide mantener el 5% de gradiente, en el sentido de tener un “peor caso”.



Como se ve en la gráfica, según las proyecciones el consumo eléctrico de la FCFM podría llegar por lo alto a 21 [GWh] y por lo bajo a unos 7 [GWh] anuales. Es interesante notar el punto de inflexión en el año 2015 debido a la implementación de medidas de eficiencia energética en el campus ese mismo año.

## 5.2 Antecedentes de la Universidad de Magallanes

La sustentabilidad en la UMAG está presente principalmente en UMAG Sustentable, que es un órgano preocupado de la sustentabilidad en dicha universidad. Entre otras cosas, se ha encargado del cálculo de la HdC las veces que se ha calculado e inició un programa de compostaje en el campus.

### 5.2.1 Medición de la huella de carbono

La UMag, al igual que la FCFM ha calculado dos veces su huella de carbono. Las principales fuentes de contaminación evaluadas en el año 2019 en esta institución son las que se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 6 emisiones por alcance en el último reporte de huella de GEI UMag

	Fuente de emisión	Total de emisiones [tCO <sub>2eq</sub> ]
Alcance 1	Quema de gas natural	1.790,02
Alcance 2	Emisiones por concepto de compra de electricidad de la red	668,83
Alcance 3	Movilización comunidad transporte aéreo	1.736,73
	Movilización comunidad vehículo particular	
Total		4.195

Al graficar estos resultados en un gráfico de torta, queda la ilustración 17.

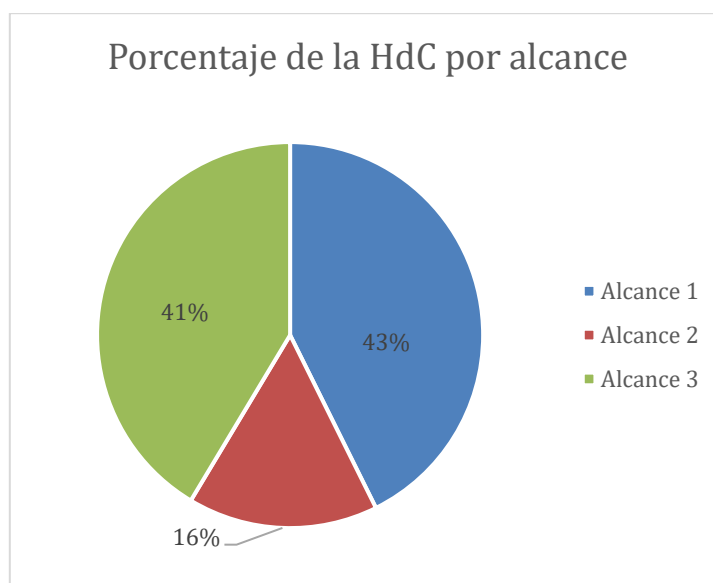


Ilustración 17 repartición de la huella de carbono de la UMAG por alcance, en porcentaje<sup>19</sup>

Actualmente la UMAG calcula su HdC mediante UMAG Sustentable con los aportes que se detallan, por alcance, en la tabla 7.

Tabla 7 principales aportes a la huella de carbono de la UMAG, por alcance

Alcance 1	Quema de gas natural para climatización
	Quema de combustible para movilización de vehículos particulares
Alcance 2	Emisiones por concepto de compra de electricidad
Alcance 3	Papel y agua potable adquiridos
	Movilización terrestre
	Movilización aérea

### 5.2.2 Su demanda eléctrica

La demanda eléctrica de la UMAG que pudo ser recopilada corresponde a los calculados con las mediciones de HdC de la universidad. Pese a existir más información de los consumos eléctricos, es insuficiente para hacer cálculos del consumo total energético sin caer en impresiones. Mayor información acerca de esto en el anexo E; en este se calcula la cantidad de kilo watts hora consumidos por esta facultad, tomando en cuenta cómo se compone el cargo por energía y potencia de su opción tarifaria escogida. Éstos datos calculados se consideran razonables, puesto que corresponden a números similares a los obtenidos

<sup>19</sup> Del informe de cuantificación de la huella de carbono de la UMAG, año 2019 (UMAG Sustentable, 2020)

Los datos de consumo de electricidad que se pueden ver en la tabla 8; fueron calculados a partir del factor de emisiones del sistema eléctrico al que está conectado el campus para los años 2016 y 2019, mientras que la tercera columna corresponde a los datos obtenidos de las boletas de suministro para los números de cliente n°4514969 y n°4514968, correspondiente a dos empalmes que posee el campus y están conectados a la red de distribución de EDELMAG.

Tabla 8 demanda eléctrica en la UMAG, calculada

Año	2016	2019	Mayo 2020 – Mayo 2021
Consumo [MWh]	994,75	1.104,05	615,266

Como se ve en la tabla, pese a haber comenzado en la senda de la carbono neutralidad la UMAG aumentó su consumo eléctrico en aproximadamente un 10% en tres años. Además se nota una caída de aproximadamente de 45% en consumo en la tercera columna, presumiblemente por efecto de la docencia remota.

En el caso de la UMAG no se hace una proyección del consumo eléctrico en el tiempo, debido a la falta de datos históricos del consumo, no se pueden notar trayectorias reales de aumento o disminución de consumo. Además, al no conocer las instalaciones del campus no se puede conocer la proporción de disminución de consumo que podría corresponder a la directamente relacionada con la docencia remota, por lo que no se podría saber a ciencia cierta qué proporción del consumo bajó por una variación natural y qué porcentaje se debe al no uso de alumbrado, computadores, etcétera.

## 6 Emisiones por alcance 2

En la presente sección se analiza las matrices energéticas en las que están sumidos ambos campus.

### 6.1 El SEN

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) es un sistema eléctrico que abarca desde Arica hasta la isla grande de Chiloé. Es un sistema eléctrico de topología enmallada dentro de lo que permite la geografía chilena y radial en las vecindades de las subestaciones que reparten más carga (ej. SE Alto Jahuel y SE Charrúa). Históricamente, Chile contaba con dos sistemas eléctricos: el Sistema Interconectado Central (SIC) y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), los que se unieron aproximadamente en 2017. Los efectos de la interconexión entre ambos sistemas eléctricos son variados y entre ellos se encuentra la posibilidad de exportación de energía solar del norte al centro y exporte de energía hidráulica al norte, ambas energías limpias, por lo que ha servido para limpiar la matriz energética.

La matriz eléctrica del SEN Se compone según las cantidades mostradas en el gráfico de la ilustración 18. Esta información se encuentra en la tabla 9, donde se podrán notar los porcentajes de cada fuente de energía primaria.

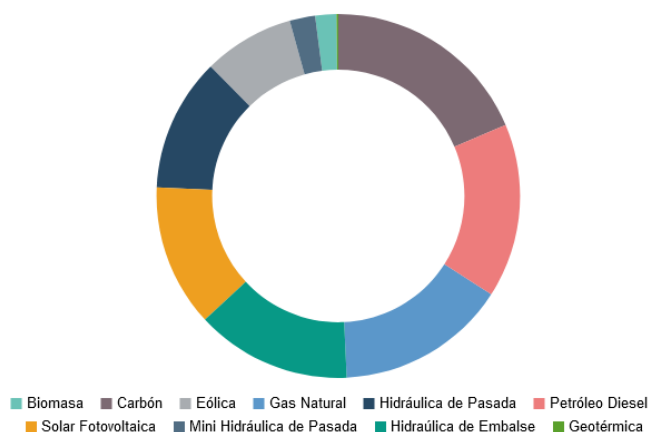


Ilustración 18 gráfico circular de la capacidad instalada en el SEN, por tecnología<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Recuperado de energía abierta (Energía Abierta, 2020)

Tabla 9 cantidades de potencia instalada por tecnología en el SEN

Energético primario		Capacidad instalada [MW]		Porcentaje del total [%]	
Térmica	Carbón	12.177,18	4.600,00	49,26	18,61
	Gas Natural		3.749,76		15,17
	Diesel		3.827,42		15,48
Hidráulica	Embalse	6.907,29	3.421,53	27,95	13,84
	Pasada		3.485,76		14,11
ERNC	Biomasa	5.634,54	465,80	24,51	1,88
	Eólica		2.000,64		8,09
	Geotérmica		39,70		1,88
	Solar FV		3.128,40		12,66
Total		24.719,01			100

Ahora bien: la capacidad instalada en el sistema da una idea de qué es lo que ha necesitado el SEN para crecer de la manera más económica posible, pero no da una idea de cómo se reparte la generación de energía por tipo de energético primario. Este dato se ve en la ilustración 19 gráficamente y en la tabla 10, donde también se da a conocer el porcentaje con respecto al total generado.

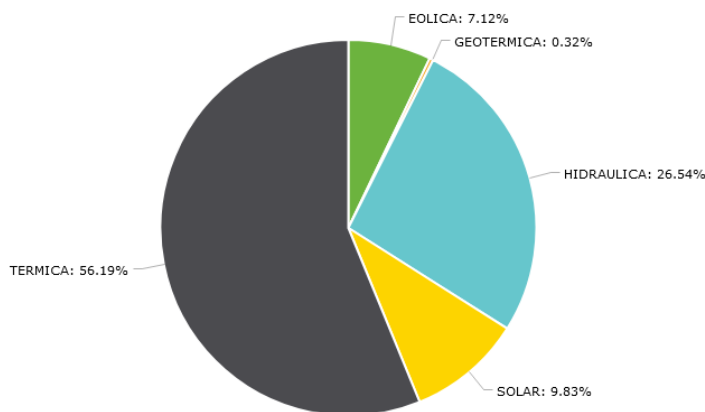


Ilustración 19 gráfico de torta con la generación de energía en el SEN, por tecnología<sup>21</sup>

Tabla 10 cantidades de energía generada en el SEN, por tecnología

Tecnología		Generación de energía en 2020 [GWh]		Porcentaje [%]	
Térmica	Carbón	43.688,36	31.047,24	56,19	39,93
	Gas Natural		12.578,22		16,17

<sup>21</sup> Confeccionado con datos de energía abierta (Energía Abierta, 2020)

	Diesel		62,89		0,08
Hidráulica		20.632,93		26,54	
Solar		7.642,05		9,83	
Eólica		5.538,82		7,12	
Geotérmica		246,87		0,32	

Como se ve en la tabla de generación, la matriz eléctrica del SEN, pese a ser similar la capacidad instalada de energías renovables con energías térmicas, se ve una matriz hidrotérmica en términos de generación de energía, donde el carbón es el principal energético primario. Esto se planea cambiar con la descarbonización del SEN, poniendo fuera de servicio todas las centrales carboneras al año 2040, como evidencia la Planificación Eléctrica de Largo Plazo (PELP) período 2018 – 2022 o al año 2025 según lo estudiado en el informe titulado Análisis de la Operación y Abastecimiento del Sistema Eléctrico Nacional de Chile en un escenario de retiro total de centrales a carbón al año 2025 del Coordinador. En los cálculos hechos en el presente trabajo de memoria de título se usa la proyección de la descarbonización acelerada (CEN) porque una proyección a 2025 tiene mayor certeza de cómo serán los exportes de energía inter regionales y la capacidad instalada por tecnología de generación por la incertidumbre que toman los números con proyecciones más a largo plazo.

Gráficamente, la evolución de la capacidad instalada a carbón se puede ver en la gráfica de la ilustración 20, donde el escenario A hace referencia a la descarbonización basal (a 2040) y el escenario B al acelerado (a 2025) (CEN, 2020).

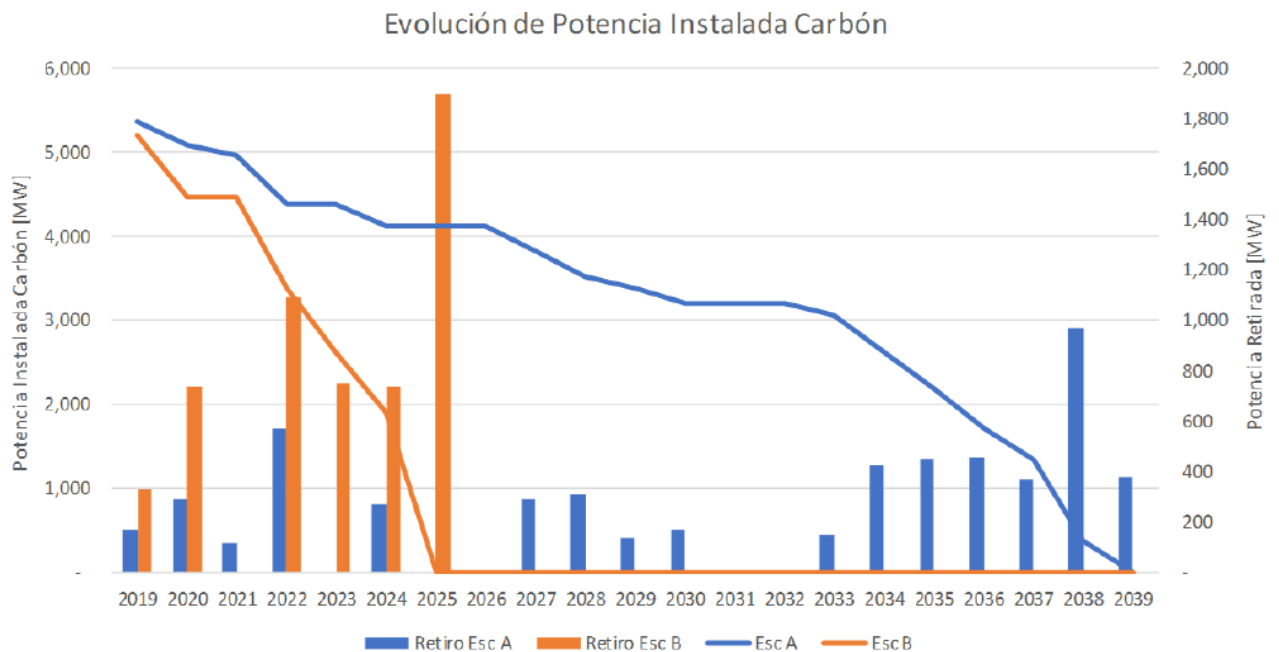


Ilustración 20 evolución de la potencia instalada de carbón en el SEN por escenarios, proyección del CEN<sup>22</sup>

<sup>22</sup> Recuperado del informe de descarbonización acelerada (CEN, 2020)

En la gráfica se comparan los escenarios de descarbonización y se nota una gran diferencia en las pendientes de la potencia instalada. La porción de la demanda que deja de ser suministrada sería cubierta con generación con un mix entre energías limpias y convencionales, como se ve en los gráficos de la ilustración 21.

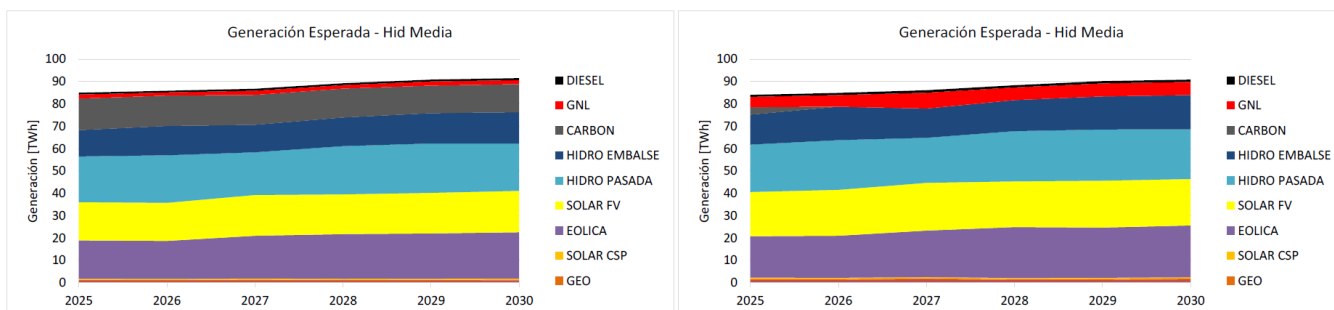


Ilustración 21 comparación de generación de energía, por tecnología ante los escenarios de descarbonización <sup>11</sup>

Como se ve en la gráfica hay un aumento en la generación de prácticamente todas las tecnologías, siendo el más notorio el cambio en la generación a Gas Natural, Solar FV, Eólica e Hidráulica de Embalse.

### 6.1.1 Huella de Carbono en el SEN

La HdC del SEN es bastante parecida a la de una turbina térmica accionada a gas, alcanzando los 369 kilogramos de  $CO_{2eq}$  por megawatt-hora generado promedio el año 2020 (Reporte de Emisiones SEN 2020, 2020). El valor de esta huella se evidencia con la alta penetración de la generación a carbón en el sistema, contrarrestado con las ERNC emergentes.

Los planes de descarbonización imponen una disminución drástica de este valor de HdC, llegando a los 36,4 [kg  $CO_{2eq}$  /MWh] en 2025, calculado de lo previsto en el informe de descarbonización acelerada del CEN. Gráficamente, la evolución de la HdC en el SEN sería como se ve en la ilustración 22.

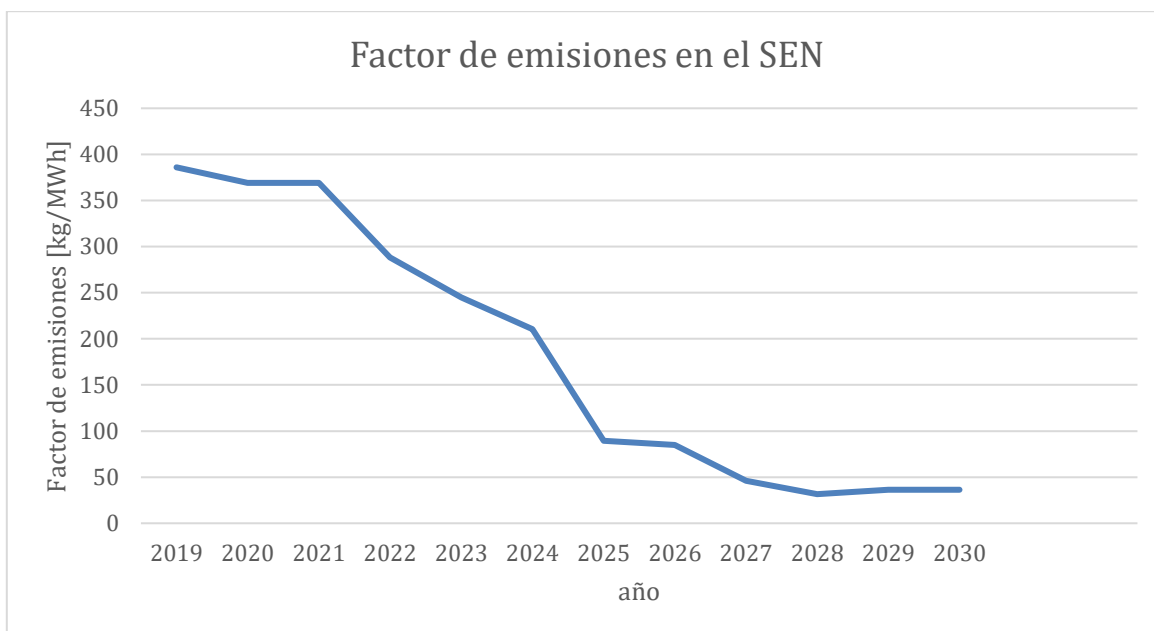


Ilustración 22 evolución de la huella de carbono en el SEN en un escenario acelerado<sup>23</sup>

Esta disminución es extremadamente conveniente para los reportes de HdC por concepto de emisiones de alcance 2, ya que disminuiría aproximadamente en un 90%.

## 6.2 El SEM

El Sistema Eléctrico de Magallanes (SEM) es uno de los sistemas medianos presentes en Chile, que alimenta la parte continental de la XII Región de Magallanes y la Antártica Chilena. Es un sistema menor al SEN, ya que posee una capacidad instalada de 107 megawatts, los que se reparten como se muestra en el gráfico de la ilustración 23 y numéricamente en la tabla 11.

---

<sup>23</sup> Gráfico de elaboración propia con datos de una central típica de carbón, una típica de gas y una típica de diesel. El concepto de central típica hace referencia a un promedio ponderado entre las unidades de generación con más inyecciones de energía al SEN el año 2020, datos de  $CO_{2eq}/MWh$  rescatados de la página web de Enor Chile (Enor Chile S.A, 2021)



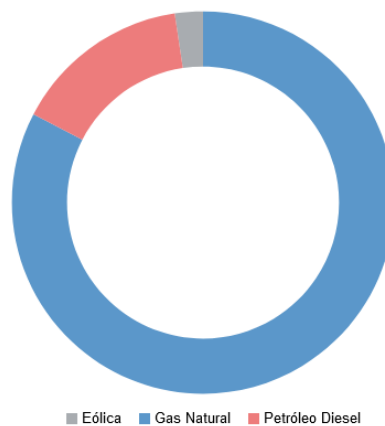


Ilustración 23 gráfico de torta de la matriz de generación instalada en el SEM<sup>24</sup>

Tabla 11 capacidad instalada por tecnología en el SEM

Energético primario		Capacidad instalada [MW]		Porcentaje del total [%]	
Térmica	Gas Natural	104,86	88,76	97,33	82,64
	Diesel		16,10		14,99
Eólica		2,55		2,37	
Total		107,41		100	

La baja demanda que cubre este sistema justifica la poca capacidad instalada en el sistema y el por qué es un sistema estacionario; en este sistema no se instalan centrales de generación desde el año 2010. Al ser una matriz energética casi completamente térmica, por requerimientos del sistema y por la antigüedad de las turbinas, el factor de emisiones en el SEM asciende a 605,8 [kgCO<sub>2e</sub>/MWh]. Éste valor de factor de emisiones es obtenido del reporte de huella de carbono de la Universidad de Magallanes (UMAG Sustentable, 2020).

Pese a la estacionareidad histórica que ha presentado este sistema, el documento *Energía Magallanes 2050* declara que se espera para 2030 tener un 30% de la generación eléctrica sea proveniente de energías renovables (en particular eólica) y para 2050 se espera que ningún energético supere el 50% de generación (haciendo un llamado a la diversificación de la matriz) (Energía 2050, 2017). En este sentido y para respetar el horizonte de mediano plazo adoptado a lo largo del documento, se debería recalcular el factor de emisiones a utilizar; esto no se podrá hacer, ya que no está disponible claramente la información sobre el mix de generación de energía por tecnología para el Sistema Eléctrico de Magallanes, por lo que no se conoce realmente cuánta generación en base a gas se desplazaría.

<sup>24</sup> Recuperado de energía abierta

## 6.3 El Recurso renovable

El estudio del recurso renovable hace referencia al análisis de la capacidad de generación de energía de los campus en cuestión. En particular, para la FCFM se analiza el terreno de Laguna Carén de la Universidad de Chile y para la UMAG se analiza el terreno donde está emplazado el campus en Punta Arenas.

### 6.3.1 Laguna Carén

El terreno de Laguna Carén es un terreno donado en el año 1994 por el Estado de Chile a la universidad que cuenta con 1.011 hectáreas y que pretendía ser usado para construir un centro tecnológico. Hoy el terreno está parcialmente vacío, ya que existe solamente un proyecto dentro de la superficie, que corresponde a un proyecto en conjunto con el Centro Tecnológico para la Innovación en la Construcción (CTeC). El proyecto se estima que usará un área de 15.000 metros cuadrados, que comparado con la extensión del terreno completo es despreciable, dejando más de 1.000 hectáreas disponibles que, usando una aproximación aceptada en la industria podría albergar un parque de generación solar de unos 500 megawatts.

Una revisión del recurso en la página del Explorador Solar<sup>25</sup> muestra una radiación global horizontal promedio de unos 5,38 [kWh/m<sup>2</sup>/día] y una difusa de 1,10 [kWh/m<sup>2</sup>/día]. Esta radiación es uniforme en el terreno por la ausencia de accidentes geográficos en la zona y la lejanía a las edificaciones de la ciudad. En la tabla 12 se muestra un desglose mensual de la radiación global horizontal estimada en la zona.

Tabla 12 radiación recibida en el terreno de Laguna Carén

Mes	Radiación directa [kWh/m <sup>2</sup> /día]	Radiación difusa [kWh/m <sup>2</sup> /día]	Radiación total [kWh/m <sup>2</sup> /día]
Enero	7,09	1,32	8,41
Febrero	6,37	1,20	7,57
Marzo	5,05	1,05	6,10
Abril	3,32	0,95	4,27
Mayo	2,01	0,83	2,84
Junio	1,64	0,71	2,35
Julio	1,72	0,77	2,49
Agosto	2,34	0,96	3,29
Septiembre	3,59	1,18	4,77
Octubre	4,75	1,44	6,18
Noviembre	6,31	1,44	7,74
Diciembre	7,14	1,42	8,56

<sup>25</sup> <http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>

Las condiciones de radiación, sumado a la ausencia relativa de sombras y nubosidad en solamente algunos meses del año harían que una planta de generación solar, emplazada en el terreno de Laguna Carén tendría un factor de planta de aproximadamente 18%.

### 6.3.2 Punta Arenas

Punta Arenas es una ciudad caracterizada por su lejanía y clima ventoso. Una instalación solar sería prácticamente un ensayo académico, ya que la radiación global de 3,01 [kWh/m<sup>2</sup>/día] no asegura un factor de planta de más de 12%.

El terreno donde se emplaza el campus de la UMAG se extiende por unas 25,8 hectáreas y perímetro de aproximadamente 2.100 metros. Aquí la dirección del viento es noroeste – nornoroeste y tiene una velocidad aproximada de 7,7 [m/s] a una altura de 50 [m]. Al revisar los datos de velocidad de viento en el explorador eólico se consigue el perfil horario de la gráfica de la ilustración 24.

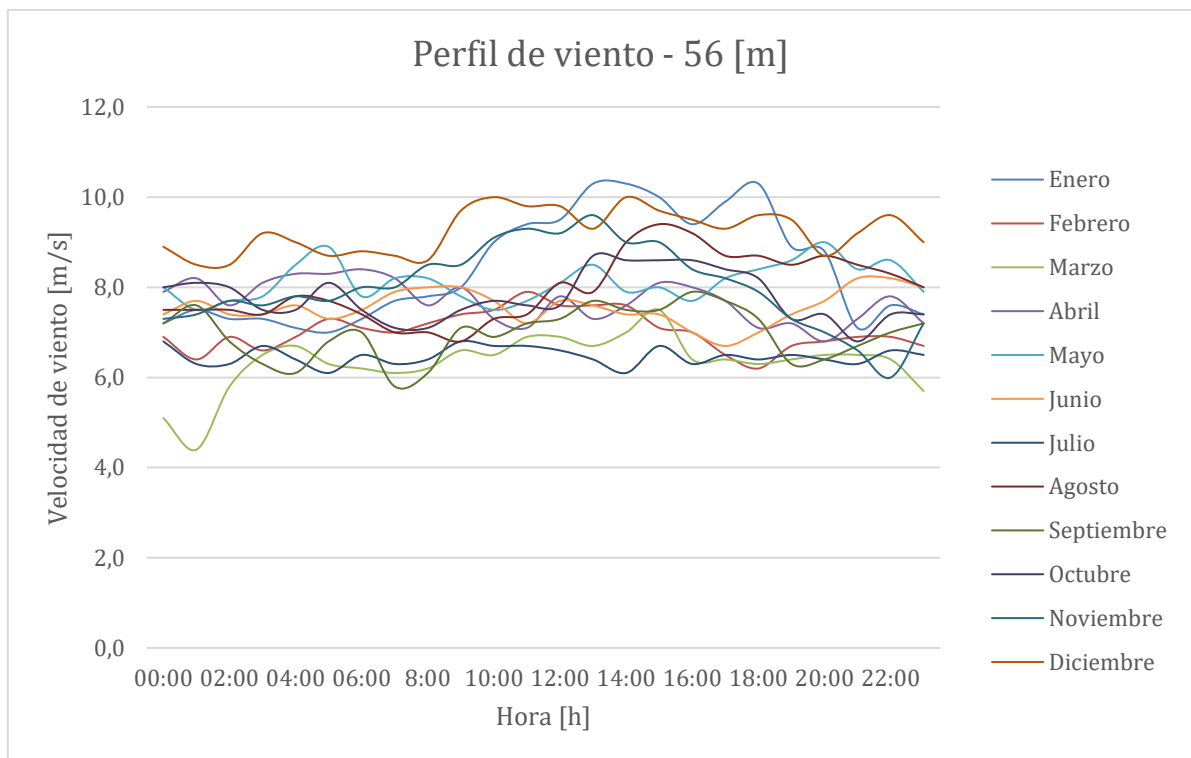


Ilustración 24 perfil de viento en el terreno donde está emplazado el campus de la UMAG<sup>26</sup>

Las curvas del perfil de viento, pese a la variabilidad característica se mantienen dentro de un rango cercano a los 8 [m/s], lo que dependiendo del aerogenerador escogido a instalar en las dependencias del campus podría llegar fácilmente al 40%. Un factor importante a considerar en la

<sup>26</sup> Elaboración propia

estimación del recurso eólico corresponde a las turbulencias que se pueden presentar en el terreno del emplazamiento del parque generador. En particular, en el terreno de la UMAG se nota una fuente de posible turbulencia: una colina ubicada a aproximadamente dos kilómetros y medio del campus. Ésta y su altura se puede ver en la ilustración 25.

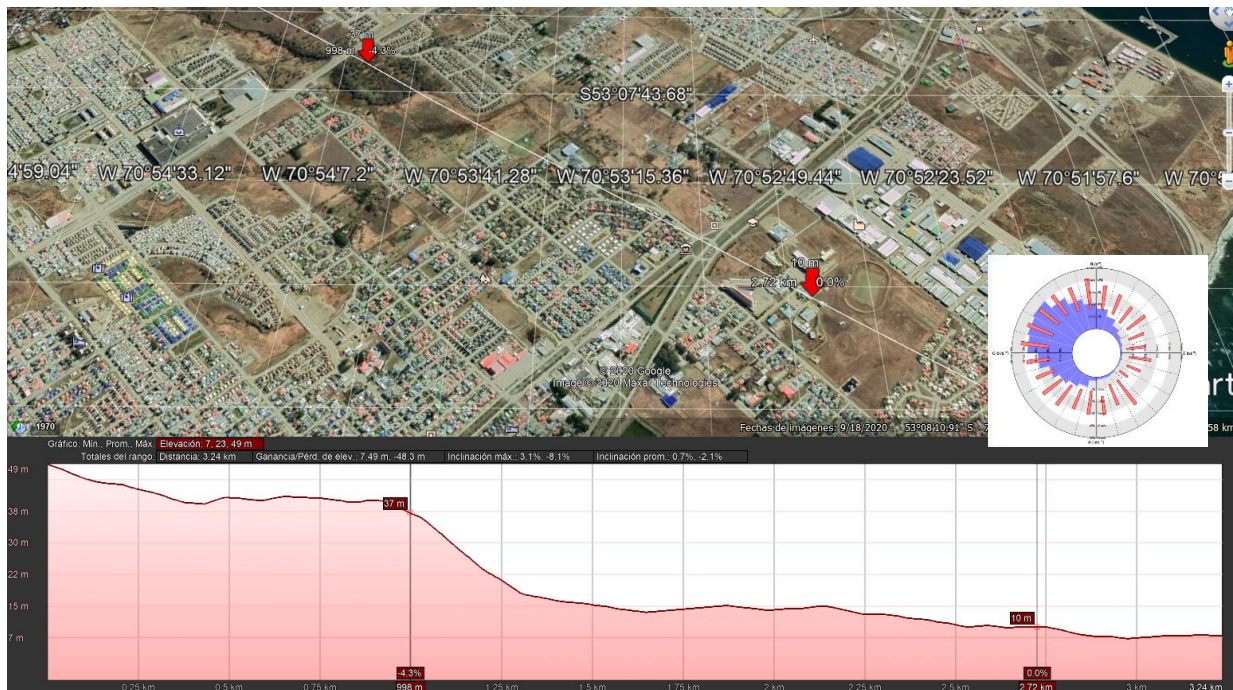


Ilustración 25 perfil de elevación de la rugosidad del terreno, cercanías de la UMAG<sup>27</sup>

La colina tiene un pico de 27 metros por sobre el terreno de las dependencias del campus y se encuentra directamente en la dirección de proveniencia del viento. Éste accidente geográfico es la única fuente de turbulencia en el camino del viento hacia el campus. Por la baja altura del pico no se considera como una fuente relevante de turbulencia.

Para tener completamente estudiado el lugar, falta la curva de Shear: mostrada en la ilustración 26.

<sup>27</sup> Elaboración propia con imagen obtenida de Google Earth

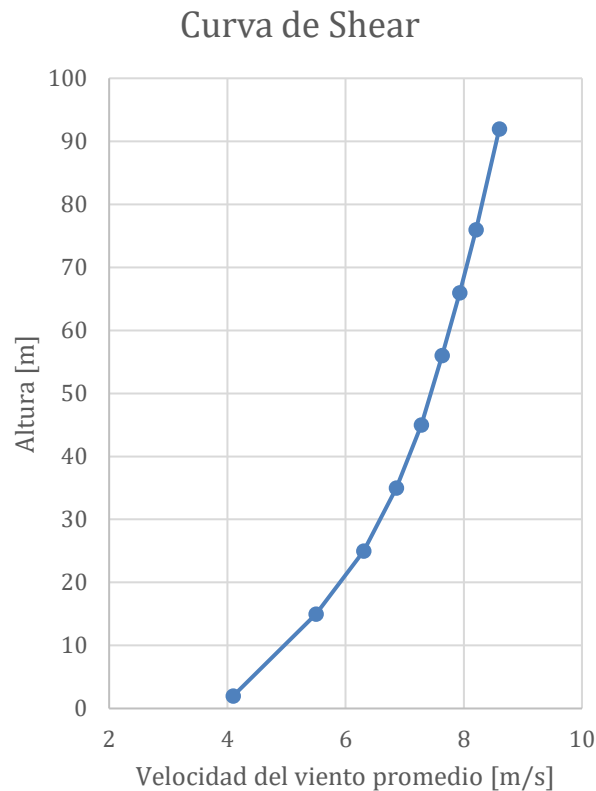


Ilustración 26 curva de Shear en Punta Arenas<sup>28</sup>

La curva de Shear en la zona es como se espera, creciente con la altura y cóncava. Cabe señalar que fue construida con datos rescatados del explorador eólico<sup>29</sup>, por lo que debería hacerse un estudio más acabado del recurso si se considera seriamente la generación de energía con fuente eólica en la UMAG. Esto porque el explorador eólico basa sus estimaciones en el modelo de estimación eólica WRF 2010 con precisión de una grilla cuadrada de 1 kilómetro de lado.

## 6.4 ¿Instalación de ERNC?

Como ya se ha explorado en los puntos de análisis del recurso renovable, en ambos casos sería favorable la instalación de plantas de generación de energía, ya sea por la extensión de los terrenos disponibles para hacerlo, como es el caso de la FCFM y por la conveniencia en términos de disponibilidad de recurso, que es lo que ocurre en el campus de la UMAG, sin embargo hay una diferencia extrema en las Huellas de Carbono que tienen los consumos de ambos campus y la huella que tendrán, según las proyecciones. Por ejemplo, en la gráfica siguiente de la ilustración 27 se puede ver cómo evoluciona la HdC de la FCFM si su consumo sigue las trayectorias propuestas.

<sup>28</sup> Elaboración propia con datos del explorador eólico

<sup>29</sup> <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>

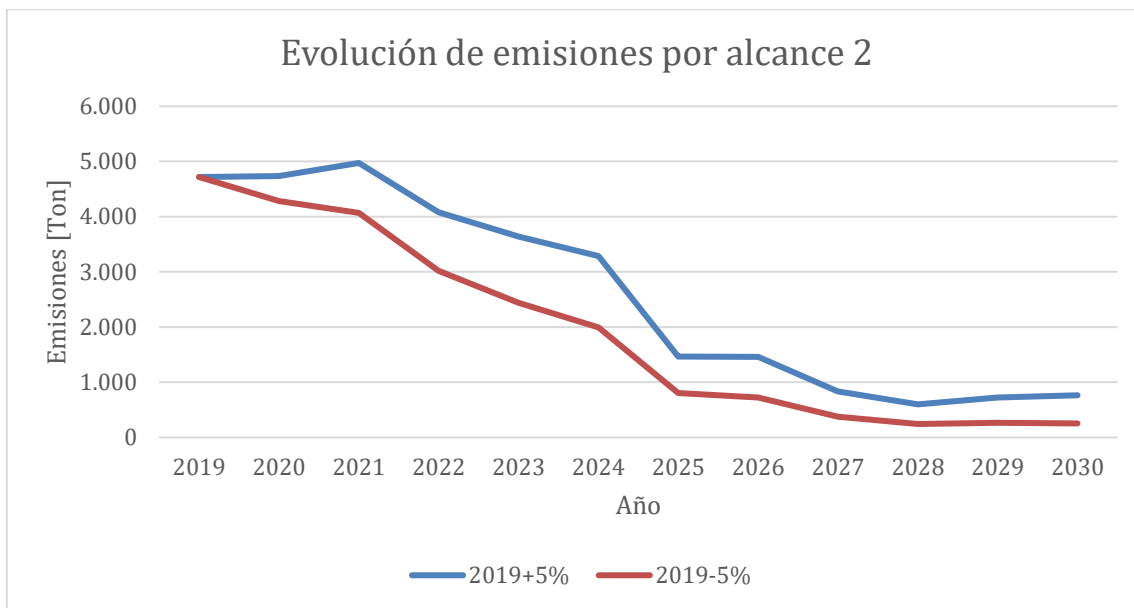


Ilustración 27 proyección de emisiones por alcance 2 de la FCFM

Es importante especificar sobre qué consumo eléctrico se está calculando la HdC. En particular, para el gráfico anterior se usan los consumos declarados en el capítulo 5, punto 5.1.2 donde se consideran todos los consumos que dependen administrativamente de la FCFM (no solamente los de los empalmes instalados en el Campus Beauchef) y es por esto que la HdC supera por más del doble la declarada en los reportes. Esta huella es sumamente difícil de paliar con la instalación de ERNC: como se ve en la tabla 13 se necesitaría un parque de unos 4,4 megawatts para compensar la huella del alcance 2 solamente y 100 megawatts en el mejor de los casos para compensar la totalidad de la HdC.

Tabla 13 potencia instalada necesaria de un parque solar para compensar la huella de la FCFM

Escenario de consumo	Huella por alcance 2 en 2030 [ton]	Potencia para compensar [MW]	Huella total [ton]	Potencia para compensar [MW]
2019+5% anual	762	13,26	6.235,5	108,47
2019-5% anual	254	4,40	5.727,5	99,62

En los valores de la HdC total de la tabla se supone que la huella de los alcances 1 y 3 se mantienen constantes. Se ve que para compensar la huella total, la universidad debería instalar un parque de solar comparable con los que se conectan con intención de exportar energía al SEN y no solamente disminuir una huella de carbono. En caso de igualmente querer instalar un parque de este tamaño, la universidad estaría incurriendo en un costo de 94,5 millones de dólares<sup>30</sup>, por lo que sería conveniente financiar el proyecto con ayuda de privados, en caso de realizarse.

<sup>30</sup> Calculado con un costo de inversión referencial de 871 USD/kWh (CNE, 2020)

El caso de la UMAG es más favorable en el sentido de la compensación de emisiones que supondría la instalación de un parque de generación, por el elevado valor del factor de emisiones en el sistema eléctrico en el que está inserta. En este caso se toma la huella de carbono calculada para el último año en el que se tiene una estimación del consumo eléctrico (2019), calculada en 9.716,87 [kg  $CO_{2e}$ ] y se calcula el parque eólico que debiese instalarse en el campus. La información relevante para el cálculo se encuentra resumida en la tabla 14.

Tabla 14 energía necesaria para compensar la huella de la UMAG

Consumo eléctrico [MWh]	Factor de emisiones [ton $CO_{2e}$ /MWh]	Emisiones por alcance 2 [ton $CO_{2e}$ ]	Emisiones totales [ton $CO_{2e}$ ]	Energía para compensar la huella total [MWh]
1.104,05	0,6058	668,83	4.195	6.924,73

Con estos datos es posible calcular el tamaño de un parque de generación eólico: debe ser tal que genere energía de al menos el valor del consumo eléctrico y a lo más la energía para compensar la huella total. El aerogenerador escogido es el ATB Riva Calzoni 500 y sus especificaciones se muestran en la tabla 15.

Tabla 15 datos del aerogenerador escogido para modelar compensaciones de alcance 2 de la UMAG

Modelo	ATB Riva Calzoni 500	Unidad
Potencia nominal	500	kW
Diámetro de rotor	50	m
Altura de buje	50 / 72	m
Velocidad de cut-in	3,5	m/s
Velocidad de cut-out	25	m/s
Tipo de generador	Asincrónico	-
Voltaje de salida	690	V
Frecuencia de red	50 / 60	Hz
Conexión a la red	Mediante inversores	-

La curva de potencia del generador se muestra en el gráfico de la ilustración 28.

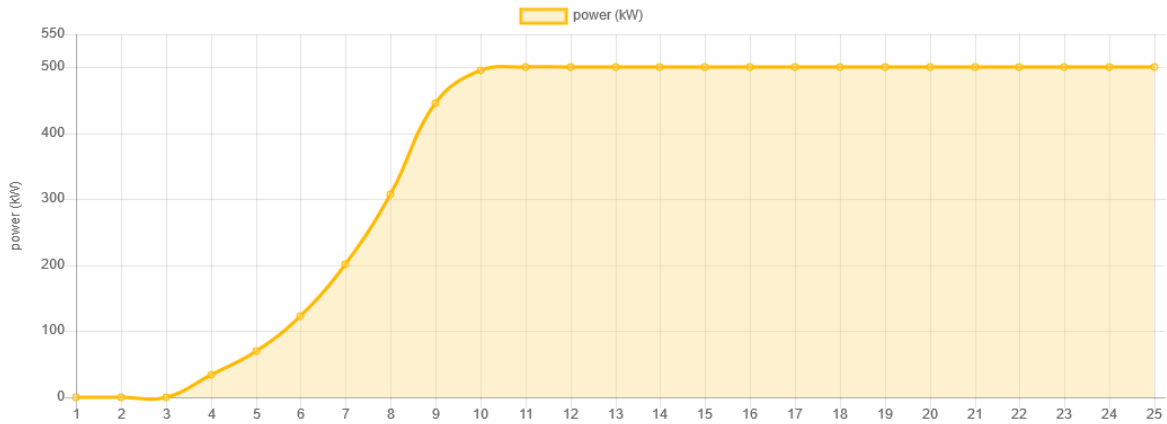


Ilustración 28 curva de generación de la turbina ATB Riva Calzoni<sup>31</sup>

La baja velocidad de cut-in y la alta pendiente en la zona no lineal asegurarían un buen rendimiento en la generación de energía. La generación normalizada de energía para las alturas de 56 y 76 [m] calculada se muestran en las gráficas de las ilustraciones 29 y 30, mientras que los datos importantes de generación de energía se resumen en la tabla 17. Los perfiles de generación, en forma de tabla y gráfico se muestran en el anexo B.

---

<sup>31</sup> Aerogenerador escogido por la forma de su curva de generación, es representativa para un aerogenerador por lo que no debiera haber mucha diferencia entre la cantidad de potencia en por unidad entregada por cualquier aerogenerador vertical de tres palas con respecto a la escogida. La potencia nominal de la unidad de generación escogida de 500 kW se escoge después de iterar con la potencia necesaria para cubrir en un principio la huella de carbono de la UMAG y en segundo la huella de carbono de ambas facultades en conjunto, tomando en consideración la sollicitación que tienen estas soluciones para con el terreno y una disposición tal que genere la menor estela posible. Cabe señalar que esto es una primera aproximación, ya que para conocer más en detalle una configuración de mínima estela y maximizando la potencia instalada dentro de la localización se deben hacer estudios más detallados, considerando la forma de los edificios cercanos y corroborando con simulaciones la influencia de la colina que se verá más adelante en la velocidad y turbulencia del viento que se recibiría en el emplazamiento propuesto.



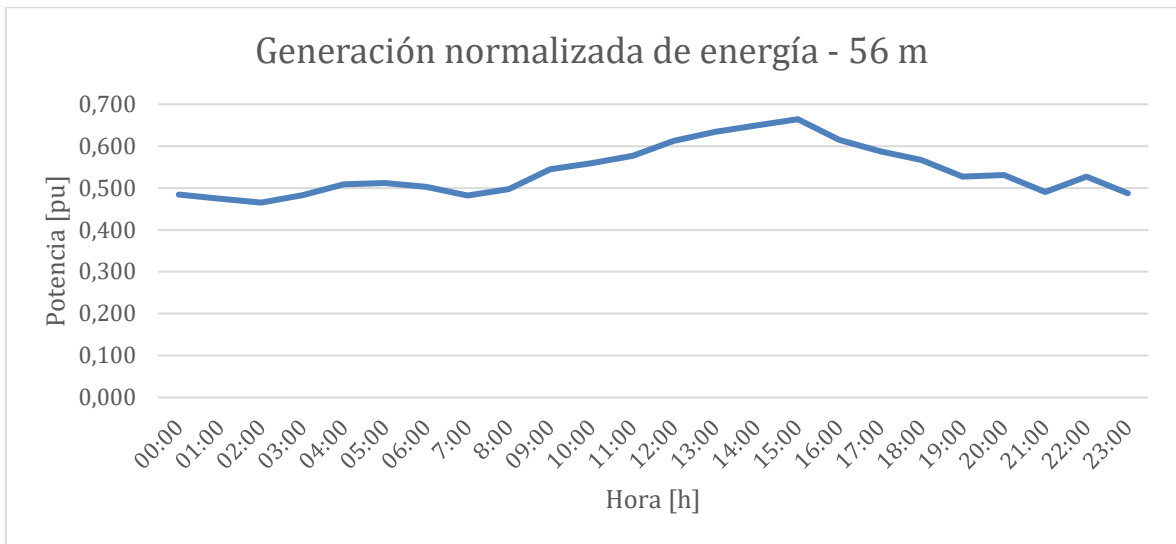


Ilustración 29 generación normalizada de energía con altura de buje de 56 metros

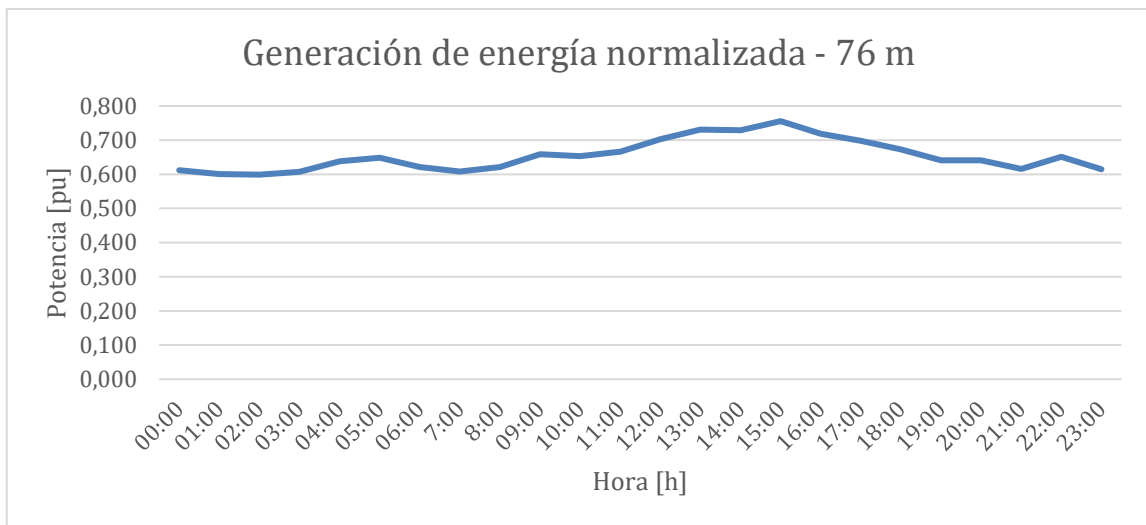


Ilustración 30 potencia normalizada de generación con altura de buje de 76 metros

Tabla 16 valores esperados de generación y factor de planta para la instalación eólica

Altura [m]	Promedio de viento [m/s]	Generación esperada [MWh]	Factor de planta
56	7,6	2.375,67	54%
76	8,2	2.872,16	65%

Como se ve en la columna de generación esperada, la generación de energía a una altura de 76 metros supera en casi un 21% a la generación a una altura de 56 metros. Esto no tiene mayor relevancia, puesto que con solamente una turbina, a cualquiera de estas dos alturas se compensa la

totalidad de la huella por alcance 2 y con 3 turbinas se compensa las emisiones totales de la UMAG. Llama especialmente la atención los factores de planta de esta máquina a ambas alturas, lo que puede ser explicado con la poca variabilidad que tiene la generación vista en los gráficos de generación normalizada. En cualquier caso de instalación, se podría seguir la disposición de las turbinas como la que se muestra en la ilustración 31, donde la posición marcada como Aero 1 es la posición recomendada para el aerogenerador único en caso de recurrir a la instalación de generación eólica para compensar las emisiones del alcance 2 y las posiciones Aero 2 y Aero 3 son las posiciones recomendadas para el caso de una instalación que compense la totalidad de la HdC.



Ilustración 31 disposición de los aeros para un parque en terreno de la UMAG

Las tres posiciones de los aerogeneradores están escogidas de tal manera de que estén cercanos a empalmes ya existentes en edificaciones del campus y que respeten la restricción de efecto estela, en el caso de los Aero 2 y 3, teniendo una distancia de 110 metros entre ellos en el plano perpendicular al viento.

Los costos de inversión para la instalación de estas máquinas es difusa por la dificultad de llegada a Punta Arenas. En el informe de costos de tecnologías de generación de la CNE se declara un costo de 1.266 [USD/kW] para las centrales eólicas, pero esto es referencial al SEN. Es por esto que se recomendaría hacer la instalación con una altura de buje de 72 metros, ya que al generar más energía e inyectar más al sistema se tienen mayores retornos y menores tiempos de recuperación del capital.

Por último es necesario señalar que para realmente considerar la instalación de este pequeño parque de generación eólica es necesario conocer de mejor manera el viento en la zona, como ya se ha mencionado los datos de viento fueron obtenidos del explorador eólico. El explorador eólico es solamente una herramienta referencial de las velocidades de viento en Chile porque se basa en estimaciones gruesas (recordemos la grilla de 1 kilómetro). Es por esto que si bien el proyecto suena tentador es necesario instalar idealmente una torre de medición en algún lugar del terreno del campus; idealmente en la posición de alguno de los aerogeneradores, o en el centro geométrico del parque proyectado. Alternativas tecnológicas a la torre de medición serían sistemas de medición

mediante ondas mecánicas (SoDAR) o aparatos que midan mediante ondas electromagnéticas de mayor precisión (LiDAR).

## 7 Otros métodos de reducción de emisiones

Como se ha visto, para los campus es complicado reducir sus emisiones de  $CO_{2eq}$  únicamente atacando al alcance 2, en un caso por completo y en el otro mediante la instalación de ERNC, por lo que en este capítulo se exploran opciones que no están directamente relacionadas con la electricidad, pero que ayudan a disminuir la HdC de la FCFM y la UMAG.

### 7.1 Docencia remota

Como se evidencia en la sección 5, el mayor aporte a la huella de carbono de la FCFM es por alcance 3, y más específicamente por concepto de movilización de la comunidad. Ante esto surge la pregunta ¿hay alguna manera de disminuir estas 4.700 toneladas de  $CO_{2eq}$  con medios que la facultad ya posee? Y la respuesta es que sí. Algo que nos ha enseñado el año 2020 es que no todas las actividades de nuestra profesión y de nuestro proceso de aprendizaje tienen que hacerse en un lugar predeterminado: la presencialidad no es un requisito para estudiar o trabajar. Como solamente hubo una semana de clases presenciales en la Facultad las emisiones por alcance 3 se van a desplomar este año y esta misma fórmula puede ser usada para reducir las emisiones de  $CO_{2eq}$  en un año completamente presencial.

Para poder cuantificar la cantidad de emisiones de  $CO_{2eq}$  que se dejarían de emitir se hizo la encuesta “Tele-estudio en la post pandemia”, cuyo objetivo es conocer la percepción del estudiantado para con la docencia remota y cómo la verían en un semestre normal si se da la opción de no asistir presencialmente a la Facultad. Las respuestas a la encuesta se incluyen en el anexo C y se puede comentar/deducir una serie de puntos de ella.

- Cerca de un 80% de los estudiantes han tenido semestres en que algunos días tienen solamente una clase y un 45% ha tenido semestres con solamente dos clases, mientras que un 49% asegura haber tenido semestres con dos clases más una ventana extremadamente larga entre ellas. Esto ha desincentivado la asistencia a la universidad entre un 49 y 77%. La docencia remota habría resuelto este problema en un 67%, mientras que al existir la opción, mientras que el porcentaje de personas que no habrían asistido a la Facultad asciende a 71%.
- En la primera sección de comentarios, donde se pregunta por el tiempo de movilización, hay una clara tendencia a declarar que al movilizarse en horarios *peak* los estudiantes se pueden demorar más en llegar a la Facultad, pasando por un rango de 15 minutos a una hora extra en transporte público. En un caso, aumenta 2 horas el tiempo de locomoción por atascos en carretera.
- En la pregunta de “¿cómo impactaría tu vida poder asistir a clases de manera remota?” las respuestas son variadas; van desde los “de ninguna manera” a los “me ayudaría mucho porque ganaría 4 horas al día” y “con la cuarentena he ganado 15 días de lo que va del año por no perderlo en movilización”. En general, las respuestas se pueden agrupar en la gente que *tiene* que asistir a la universidad para aprender de buena manera, la gente que agradece la docencia remota porque ha ganado tiempo y ahorrado dinero por concepto de movilización (viendo las clases mientras viajan o hacen otras cosas), la gente que usaría el tiempo de la clase para

ponerse al día con trabajos urgentes y vería la clase de manera asincrónica y la gente que odia la docencia remota. Hay dos respuestas interesantes que me gustaría rescatar: la de un estudiante que es de Valparaíso y aprovecharía su tiempo perdido del viaje en bus para ver clases y así poder pasar más tiempo con su familia y la de la persona que reprobó inglés porque llegar tarde equivale a inasistencia.

Para explorar los efectos de la docencia remota en la huella del alcance 3 se estudian dos posibilidades, en primer lugar si la docencia remota fuera una alternativa a las clases presenciales, instalando cámaras web en las salas para que el estudiante se pueda conectar de forma remota, la huella de carbono por movilización de la comunidad disminuiría en un 11,2% si se asume que el 70% de los estudiantes que tienen un día con una sola clase no asisten presencialmente, lo que equivale a **417,3 toneladas de  $CO_{2eq}$** . En segundo lugar, si la docencia remota fuera impuesta en ciertos días de la semana se tendría distintos valores de reducción de huella de carbono, en la tabla 17 se muestra las reducciones que se tendría al cortar un día de la semana lectiva y también se muestra si la Facultad se cerrara completamente (evitando traslado de estudiantes, académicos y funcionarios).

Tabla 17 reducción de emisiones por movilización de la comunidad con docencia remota en la FCFM

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Reducción – docencia [%]	14,88	17,43	12,71	17,31	13,05
Reducción – docencia [ton $CO_{2e}$ ]	666,66	780,95	569,69	775,75	581,81
Reducción cierre total [%]	19,75	23,14	16,88	22,99	17,24
Reducción cierre total [ton $CO_{2e}$ ]	885,16	1.036,90	756,41	1.030,00	772,50

Los valores que se ven en la tabla fueron calculados contando la cantidad de bloques horarios ocupados en cada día por una clase de cátedra, auxiliar o laboratorio en los semestres 2019 – otoño y 2020 – primavera. Para estimar la cantidad de personas que dejarían de asistir, primero se suma la cantidad de clases que existe en un bloque horario y con esto, se puede conocer qué bloques horarios están más cargados de clases durante la semana; por ejemplo, de todas las clases que se hacen en la facultad (independiente del curso a que se corresponda), casi un 5% ocurren los días martes de 10 de la mañana a 12 de la tarde. Sumando los porcentajes de uso de cada bloque horario durante un día se obtiene la carga que tiene cada día dentro de la semana y así, con estos porcentajes y los datos de emisiones por alcance 3 de la facultad, se puede conocer la reducción de huella que se tendría al tener clases remotas algún día de la semana, como se ve en la tabla 17, sería más intensivo en reducción trancar el martes que el miércoles por ejemplo.

Como se puede apreciar claramente de la metodología adoptada, éste cálculo es específico para la FCFM de la Universidad de Chile porque cuenta con datos reales de realización de clase (presencial o remota) en cada bloque horario, por lo que para replicar el estudio en la UMAG se debería contar con la información de la carga diaria de actividades de docencia, datos que no estuvieron presentes al momento de redactar el presente documento. En caso de hacerse una estimación del tipo emulación (aplicando los porcentajes obtenidos en este documento para con la

huella de alcance 3 de la UMAG) o una estimación pareja (usando 20% de la huella para cada día) se debe tener las siguientes precauciones:

- Los valores de porcentaje de ocupación diario es específico para las condiciones de docencia en la FCFM, por ejemplo, los miércoles se tiene menos clases (y siempre ha sido así) por los horarios de los profesores, que suelen preferir “bloques espejo” al momento de planificar el semestre (por ejemplo, las clases de cátedra suelen ser lunes y viernes o martes y jueves, quedando el miércoles sin espejo claro) y otra razón para tener menor porcentaje de ocupación es por el bloque protegido de los miércoles a las 12.
- Al usar 20% pareja para cada día se está ignorando la realidad local de la preferencia de los docentes al escogerlos bloques horario para impartir su clase u horarios libres predeterminados como el *bloque protegido* mencionado en el párrafo anterior.

## 7.2 Geotermia

En el caso de la UMAG, está la incertidumbre del precio de la instalación de generación de energía eólica en el campus y la incertidumbre de los verdaderos valores de velocidad de viento, por lo que no se sabe a ciencia cierta la factibilidad del proyecto de generación. Es por esto que se explora en los demás alcances y se encuentra una oportunidad de disminución en la climatización del campus. La calefacción en la UMAG se hace exclusivamente con calderas a gas natural, las que el año 2019 consumieron un total de 891.859 metros cúbicos del combustible, lo que se traduce en 1.762,78 toneladas de  $CO_{2eq}$ . Esto puede ser solucionado con la instalación de un sistema geotérmico.

Para poder cuantificar correctamente, se debe conocer la energía que suministran las 10 calderas que funcionan en la UMAG. Esto se conociendo la composición del gas que queman y calculando con las reacciones químicas de la quema. La composición del gas no se puede saber con un 100% de precisión a menos que se conozca el gas específico que queman las calderas, por lo que se usarán valores de porcentajes presentes en la literatura (Rudnick, 2005). La composición supuesta es la que se muestra en la tabla 18.

Tabla 18 composición del gas natural

Gas	Metano	Etano	Propano	Butano
Cantidad [%]	94,1	4,3	0,9	0,7

Con las cantidades de cada uno de los gases constituyentes del Gas Natural se puede calcular la energía que libera calculada en el anexo D<sup>32</sup>, de 10.499.713 [kWh]. La potencia necesaria para lograr esta energía es de aproximadamente 424,54 kilowatts térmicos (kWt) por bomba geotérmica, si se instalara una bomba geotérmica reemplazando a cada una de las calderas, lo que ascendería a un precio de 200.784.500 pesos chilenos por bomba según los precios detectados por el ministerio

<sup>32</sup> Se asume una combustión perfecta y que no hay impurezas en el gas.

de energía y la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, 2020).

De cualquier manera, el análisis fue hecho de manera gruesa. Si la UMAG quisiera evaluar una bomba de geotermia, o varias para climatizar sus edificios, debería hacer un estudio geológico para conocer factores como dureza y temperatura del suelo, factores que fueron las principales fuentes de incertidumbre al realizar el cálculo, junto con el conocimiento de si hay o no un acuífero subterráneo y a qué altura estaría por debajo del nivel del suelo.

## 7.3 Eficiencia energética

La eficiencia energética hace referencia a la disminución de consumo, mediante mejoramiento de las instalaciones o de la gestión. Una disminución de consumo, como ya se ha visto en los puntos anteriores, no es de mucha utilidad para la FCFM por lo visto en puntos anteriores: la disminución de la huella de carbono, haciendo reducciones en el alcance 2 será efímera en el mediano plazo. No obstante, las reducciones de GEI deben ser hechas en un esfuerzo íntegro y es por esto que se recomienda que en la FCFM se realice una auditoría energética en miras de una reducción de consumos mediante el planteamiento (o replanteamiento) de algunas preguntas como ¿es este edificio eficiente energéticamente? ¿Debería ampliar la superficie de ventanas para que entre más luz natural? ¿Debería eliminar la climatización eléctrica? ¿Qué tanto se valora el confort con respecto a la climatización eficiente? ¿Será necesario incluir sistemas de climatización automáticos? ¿De iluminación automáticos? ¿Cómo controlo la energía que se gasta en computación? ¿Qué tan factible es botar un edificio para rehacer la ingeniería de materiales y ángulos de incidencia del sol o viento? De cualquier manera, no se incluirá la reducción de GEI posible en los planes de las siguientes páginas por el casi nulo aporte que realiza en la gran escala (contabilización de emisiones de 3 alcances más horizonte temporal con descarbonización de la matriz energética completa).

En el caso de la UMAG sí puede ser positiva, ya que como se vio, el factor de emisiones en el SEM es alto. La cantidad de la reducción de la huella depende completamente de las instalaciones dispuestas en la Facultad y sin información satisfactoria de ellas es prácticamente imposible hacer un juicio. Es por esto que se recomienda de la visita de un equipo auditor.

En cualquier caso, al consultar la literatura las medidas de eficiencia energética tienden a la automatización de encendido y apagado de equipos eléctricos, los que comprenden ampolletas (iluminación) y equipos de climatización (calentamiento y enfriamiento de espacios); aislamiento eficiente de espacios y uso inteligente de equipos eléctricos, evitando corrientes parásitas. Algo de lo que no hay mucha información es del buen manejo de electricidad y/o calor dentro de instalaciones con servidores computacionales.

Sin perjuicio de lo anterior, se asumirá de aquí en adelante que la UMAG puede reducir su consumo eléctrico en un 4%, ya que es un valor comparable con el visto en la experiencia de la UTEM y lo visto en experiencia internacional con las universidades que declararon reducción de consumo eléctrico total en su ingreso a la plataforma de AASHE – Ranking STARS.

## 7.4 Bonos de carbono

Los bonos de carbono consisten en la compra de compensaciones/reducciones de emisiones de  $CO_{2e}$  a un tercero, mediante un mercado de carbono como es el SCX.

Los bonos de carbono son una buena opción para terminar de compensar la huella de carbono de una organización, como se vio con el caso de la UTEM. Los casos de la FCFM de la universidad de Chile y de la UMAG no son una excepción.

Como ya se dijo, los bonos de carbono se pueden comprar en una bolsa como la de la SCX. Tomando como referencia la página web <https://cdm.unfccc.int/>, donde se puede revisar la cantidad de  $CO_{2eq}$  reducido por un proyecto y el valor asociado a la reducción, se puede deducir que el precio en dólares por tonelada de dióxido de carbono equivalente promedia en 6,22 para proyectos chilenos. Estos precios, sin embargo, están muy por debajo de lo que se está *tradeando* hoy en día por los bonos de carbono, a un precio de 42 dólares por tonelada aproximadamente, el 29 de marzo de 2021<sup>33</sup>. Este precio se condice con el límite inferior del precio para el impuesto al carbono declarado por el Banco Mundial para lograr el no aumento de temperatura por sobre los 2°C (Banco Mundial, 2021).

Al analizar la gráfica del Banco Mundial (BM, 2021) sobre los precios de mercado para el impuesto a las emisiones de carbono de la ilustración 32, se puede notar como ese precio está influenciado en cierta manera por el nivel de desarrollo del país, teniendo a Chile en la parte más baja en términos de precio (similar al precio de mercado visto para los bonos en el mercado voluntario), lo que sugiere que Chile se mantendrá en el borde inferior en el monto de transacción en términos de impuesto y bonos. En este sentido, se tomará el supuesto de que los bonos de carbono se podrán adquirir a el precio mínimo que recomienda el Banco Mundial para el límite térmico fijado por la comunidad internacional, 40 dólares por tonelada de  $CO_{2eq}$  (asumiendo mayor compromiso de privados y regulación más estricta en este ámbito).

---

<sup>33</sup> En página web <https://es.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>



## CARBON PRICES (2021)

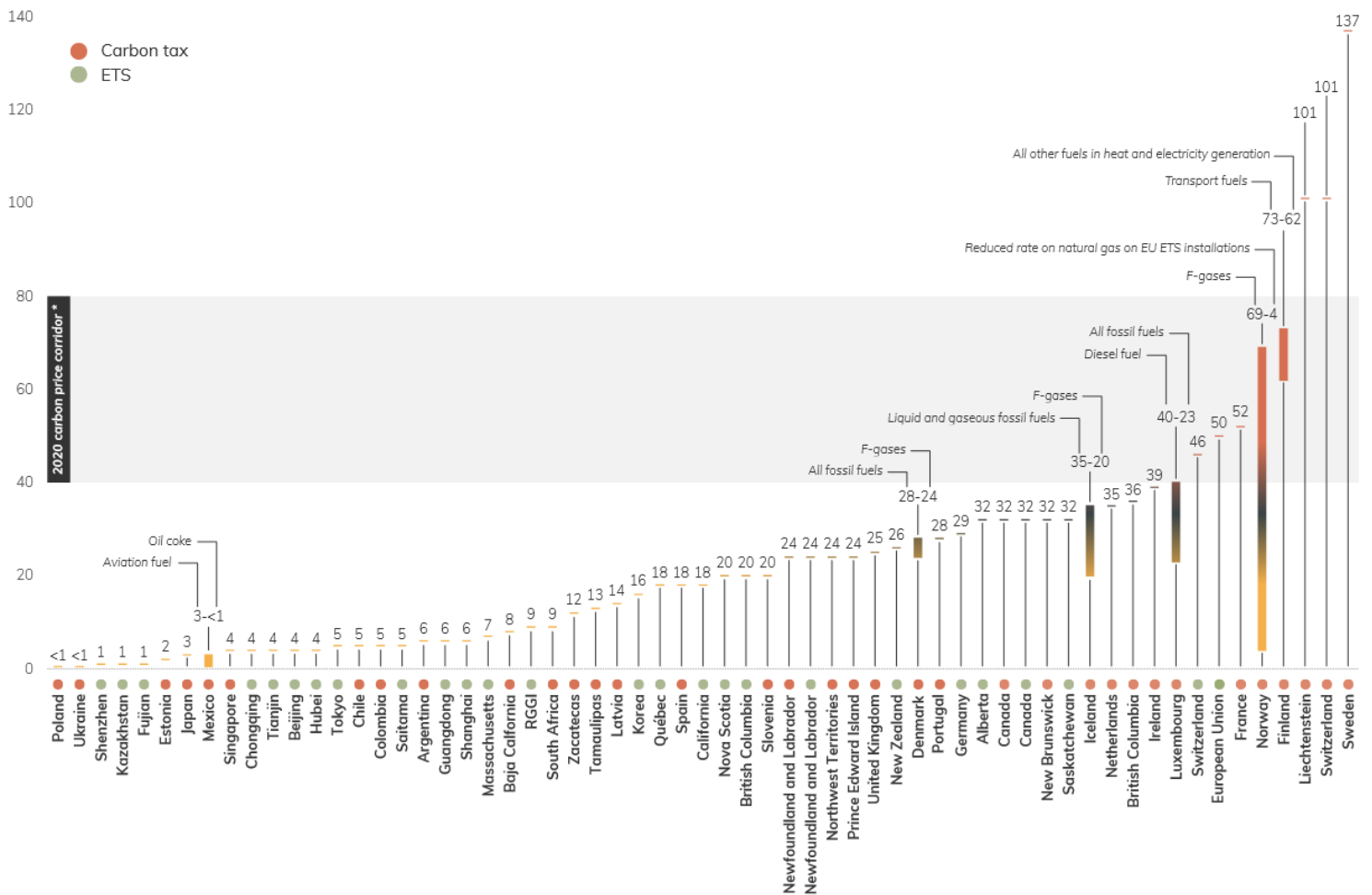


Ilustración 32 precios de mercado para bonos de carbono

Así, en la tabla 19 se ve un estimado de cuánto costaría para ambas universidades compensar sus emisiones reportadas por esta vía.

Tabla 19 precio de las emisiones, en bonos de carbono; por alcance y total

	FCFM [USD]	UMAG [USD]
Emisiones por alcance 1	12.400	71.608
Emisiones por alcance 2	91.240	26.753
Emisiones por alcance 3	198.280	69.469
Total	301.920	167.830

Los precios mostrados no son tan tentadores, ya que supera los 200 millones de pesos en el caso de la FCFM y los 120 para la UMAG<sup>34</sup>, entonces se debe tener en consideración cuál es la finalidad de las declaraciones de emergencia climática y de la esperada carbono neutralidad ¿Es para tener un sello verde? ¿Es para tener más certificaciones? ¿Es para verse bien ante la comunidad internacional? ¿Es para reducir las emisiones de GEI y combatir el cambio climático? Las emisiones compensadas con compra de bonos de carbono son una manera barata de alcanzar la carbono neutralidad (comparada con las opciones exploradas), pero no supone una reducción del total de  $CO_{2eq}$ : es simplemente una herramienta administrativa para responsabilizarse de reducciones que ya se han hecho sin aportar a la lucha contra el cambio climático.

## 7.5 Opción de cambio de tarifa con miras al ahorro monetario

El cambio de tarifa eléctrica es algo que cualquier cliente de una distribuidora puede hacer, sea un consumo de baja o media tensión pero no se hace por tres factores: desconocimiento de la existencia de tarifas distintas a la contratada, desconocimiento de la posibilidad de ahorro con otra tarifa y la dificultad del cálculo de en cuánto dinero se traduce 1 kWh según cada tarifa, e incluso cuánto vale 1 kW más.

En el tema de la tarificación eléctrica hay un par de puntos clave:

- energía consumida;
- potencia contratada;
- potencia medida; y
- potencia de punta.

En particular, para la tarifa AT3 importa la medición de potencia presente en punta, la potencia consumida fuera de punta y el consumo de potencia parcialmente en punta. Esta tarifa AT 3, que es la que tiene contratada la UMAG se compara con la tarifa AT 4.3, que es la más competitiva frente a una AT 3.

Calcular lo que se pagaría con una tarifa AT4.3 es un desafío, por lo confuso de las boletas de electricidad de la UMAG. Haciendo un resumen de los cálculos mostrados en el anexo E (donde se muestra la estimación de energía consumida), se obtiene lo que se muestra en la tabla 20, que compara el gasto de la Facultad con una tarifa eléctrica AT 3 vs AT 4.3 en un escenario desfavorable.

Tabla 20 comparación enter los pagos con distintas tarifas - UMAG

	AT 3 [CLP]	AT 4.3 [CLP] peor caso	Diferencia [CLP]
Total	95.730.500	91.215.020	4.515.480

<sup>34</sup> Usando la conversión 1 USD = 730 CLP

Como se dijo, se compara la tarifa AT3 con un caso desfavorable de consumo en tarifa AT4.3. A saber, la energía consumida se calcula suponiendo un consumo con potencia parcialmente en punta medido en el medidor analizado de la UMAG. Los detalles se encuentran en el anexo E.

En definitiva y según el cálculo realizado, a UMAG le convendría hacer un cambio de tarifa de AT3 a AT4.3.

Para mayor seguridad del resultado, se compara el consumo eléctrico con las tarifas conseguidas de los pliegos de los años 2019 y 2020 también y el ahorro en un caso desfavorable es de 3% en ambos casos, y llegando a un máximo de 15% en el caso más favorable de consumo de potencia máxima todos los meses en horarios de punta.

## 8 Caminos a seguir

Llegado este punto solamente queda realizar una comparación de los métodos explorados para reducir las emisiones de GEI, con distintas combinaciones de ellos. Estos se resumen en las opciones siguientes.

### 8.1 FCFM

La FCFM tendrá una importante reducción en sus emisiones de GEI por la descarbonización de la matriz energética y tiene una buena oportunidad de reducción de alcance 3. Cabe mencionar que los datos de inicio de la huella (cruce con el eje de ordenadas) corresponde a la huella total, no la reportada. Hay que tener en consideración que todas las opciones suponen la descarbonización de la matriz energética del SEN, por lo que, para que tengan efecto se tendría que esperar hasta el año 2030 o 2040.

#### 8.1.1 Opción base

La opción base de la FCFM es la reducción de la totalidad de la Huella con bonos de carbono y no aplicando medidas de reducción. El gráfico siguiente lo muestra gráficamente.

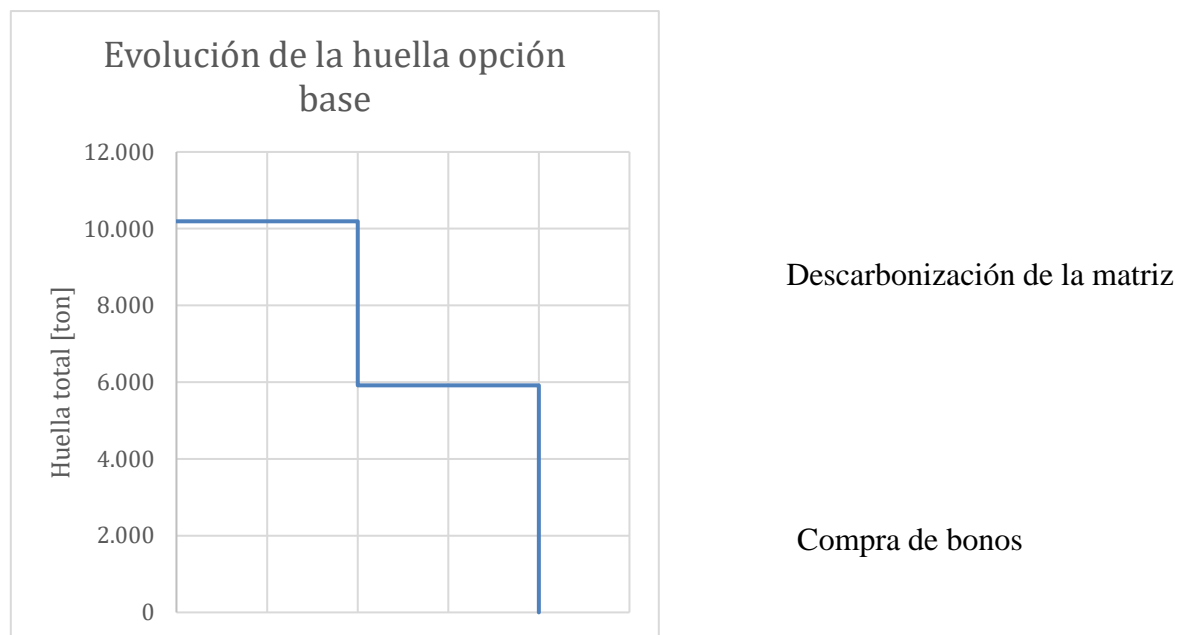


Ilustración 33 evolución de la huella de carbono de la FCFM sin acciones de mitigación

Este sería el escenario de mínimo esfuerzo para la FCFM, el cual tiene un costo de USD 236.459 en bonos de carbono, si se aplica una tarifa de 40 dólares la tonelada de  $CO_{2eq}$ .

### 8.1.2 Opciones de disminución con docencia remota

A continuación se muestra cómo disminuye la huella total con docencia remota. En este caso se muestran 3 gráficos: lo que pasaría si se corta un día de la semana solamente para docencia en el primer gráfico, si la docencia se hace optativa en el segundo y en el tercero una combinación de estos dos casos. Para la construcción de estos gráficos se considera la eliminación del día miércoles, ya que es el día con menos clases de la semana.

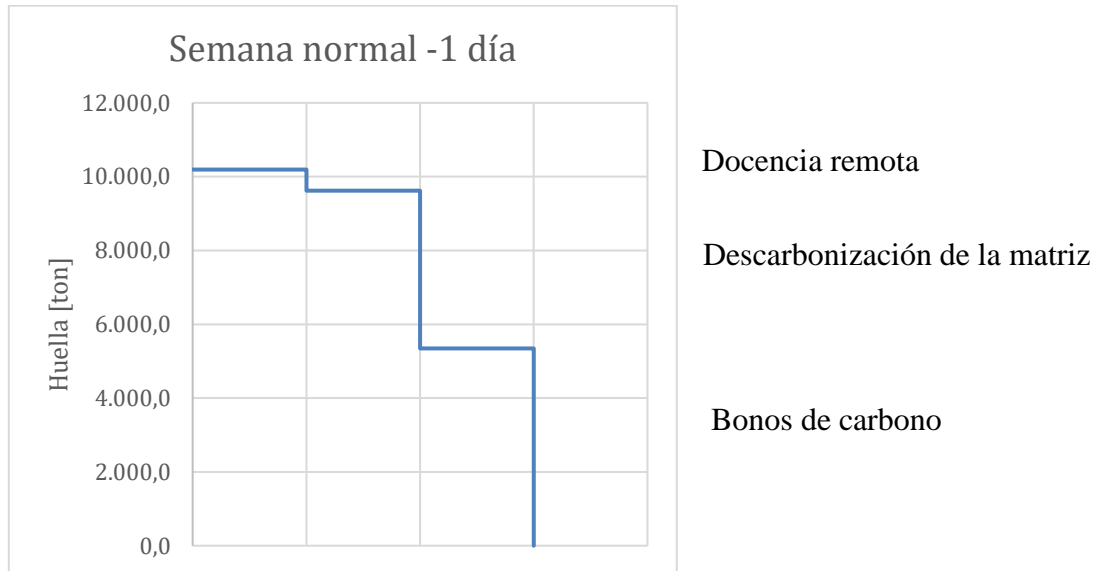


Ilustración 34 evolución de la huella de carbono en la FCFM quitando un día de la semana

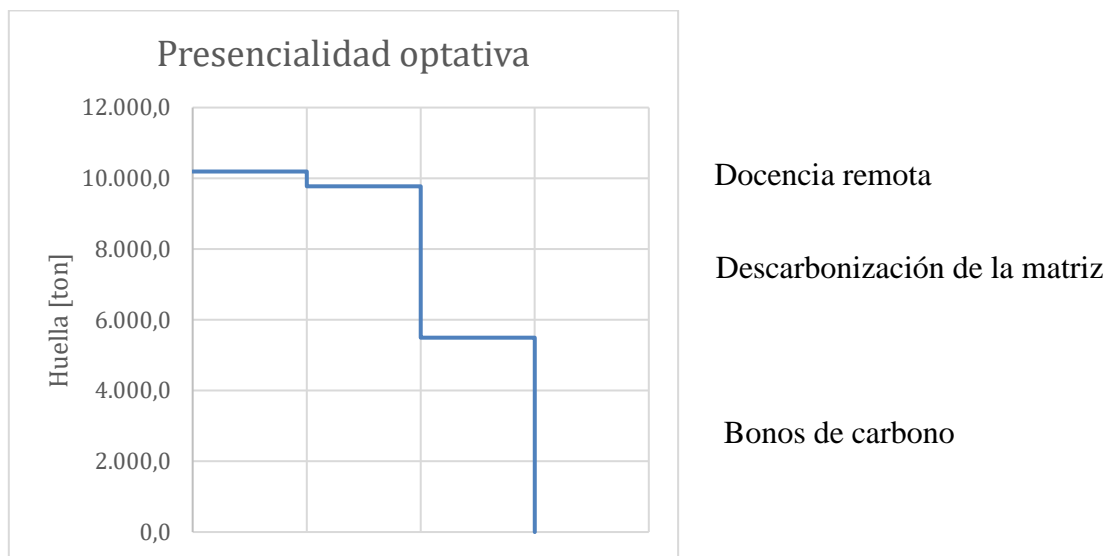


Ilustración 35 evolución de la huella de carbono en la FCFM con presencialidad optativa

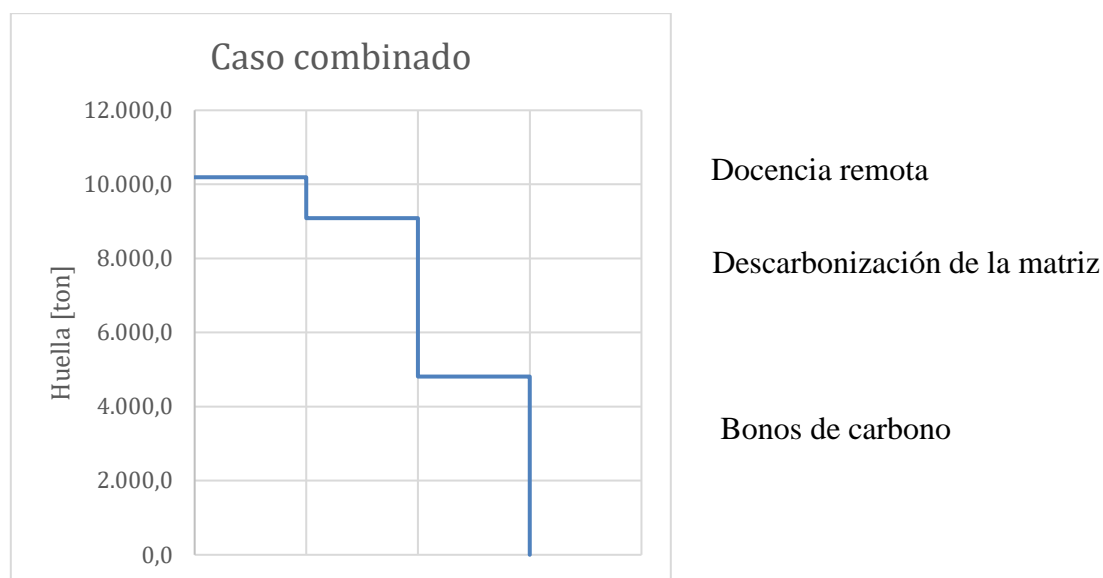


Ilustración 36 evolución de la huella de carbono en la FCFM con un día menos en la semana y presencialidad optativa

Como es de esperar el caso combinado de docencia remota es el más conveniente para la reducción de emisión de GEI, superando las 1.100 toneladas de carbono equivalente. Esta medida bajaría los costes de compra de bonos de carbono a USD 192.342.

Con las medidas estudiadas no se llega a la carbono neutralidad. Como se ha visto a lo largo del presente documento y en los puntos 6.4 y 8.1.1 la descarbonización de la matriz energética del SEN se presenta como un arma de doble filo para la descarbonización de instituciones de educación superior en el ámbito eléctrico porque a pesar de disminuir la HdC hasta posiblemente un 40% en un horizonte optimista de 10 años, imposibilita de alcanzar la carbono neutralidad construyendo instalaciones de energías renovables con capitales propios. En el caso de la FCFM de la Universidad de Chile y como opinión personal, la descarbonización mediante alcance 2 sí es posible: mediante proyectos de eficiencia energética o de generación de energía con fuentes renovables en instalaciones de terceros; hay una capacidad humana e intelectual inconmesurable que no se aprovecha, con cursos que tienen la capacidad para hacerlo como son el EL5001/EL5003 – Taller de Proyecto, EL5002/EL5004 – Taller de Diseño y EL6020 – Taller de Innovación Tecnológica y Emprendimiento en combinación con las prácticas profesionales. Y esto solamente en el departamento de ingeniería eléctrica.

## 8.2 UMAG

La Universidad de Magallanes si bien no tendrá una reducción del factor de emisiones en su alcance 2, tiene un abanico más amplio de opciones para reducir emisiones de GEI y alcanzar la carbono neutralidad. En el caso de la UMAG se supondrá como base reducciones en el consumo eléctrico en forma de eficiencia energética.

### 8.2.1 Alcance 2

Las emisiones de la UMAG pueden ser completamente paliadas con reducciones en el alcance 2, en los gráficos siguientes se muestra el caso de: instalación de 1 aerogenerador e instalación de 3 aerogeneradores. Cabe señalar que la instalación de los aeros que se suponen estarían a una altura de 70 metros.

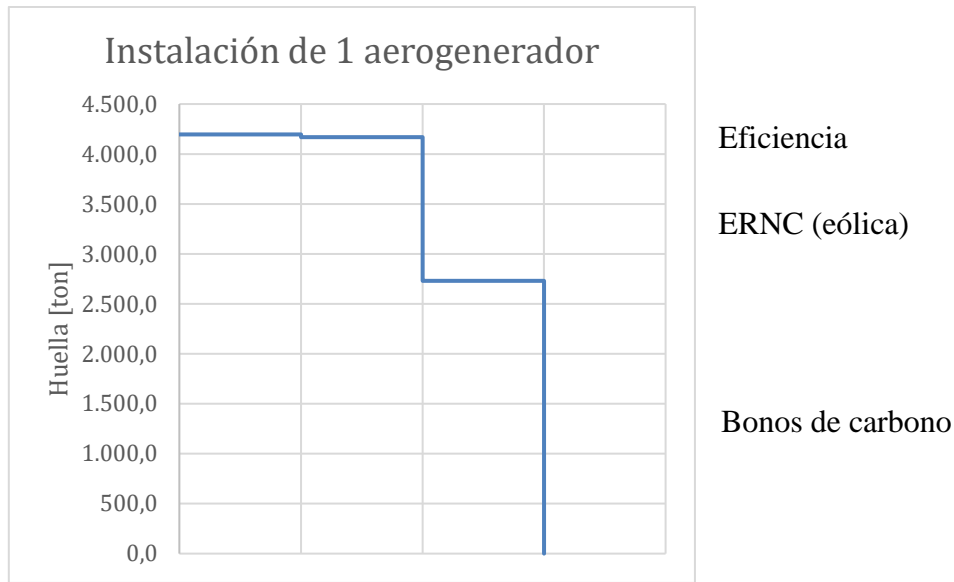


Ilustración 37 evolución de la huella de carbono en la UMAG con la instalación de un aerogenerador

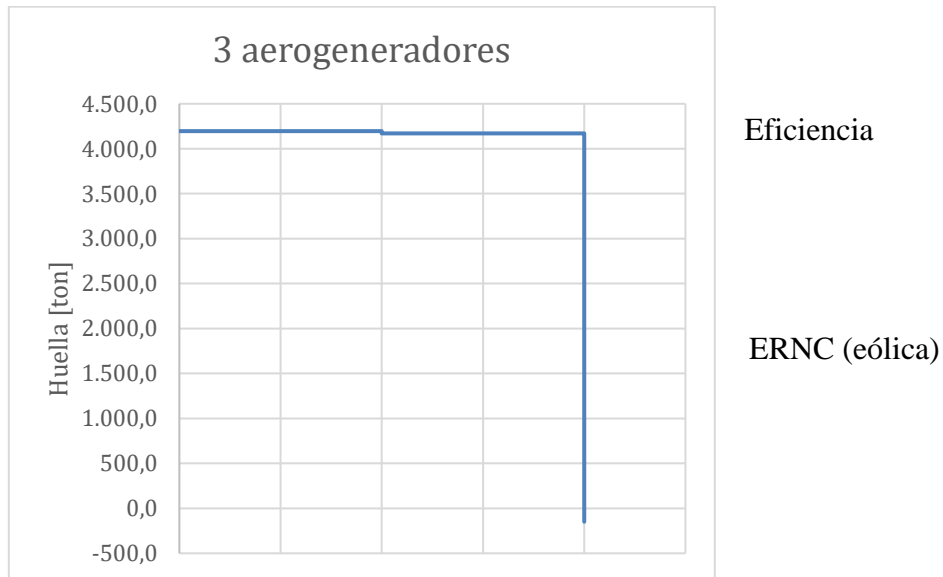


Ilustración 38 evolución de la huella de carbono en la UMAG con la instalación de 3 aerogeneradores

Como se ve, la UMAG está en una buena posición con lo que respecta a la reducción de emisiones mediante el alcance 2, llegando potencialmente a ser carbono negativo con tres aerogeneradores conectados. El valor de estos dos planes asciende a USD 1.470.184 y USD 4.083.000 respectivamente, sin contar con los costes extra que supondría el traslado de los generadores a Punta Arenas ni costos asociados a la implementación de medidas de eficiencia energética. No obstante, con un factor de planta de 60% el proyecto eólico se vería interesante a los ojos de cualquier inversionista.

## 8.2.2 Geotermia

El uso de geotermia para calefacción es una alternativa renovable para la calefacción con gas. Las reducciones que se tendrían se muestran en el siguiente gráfico.

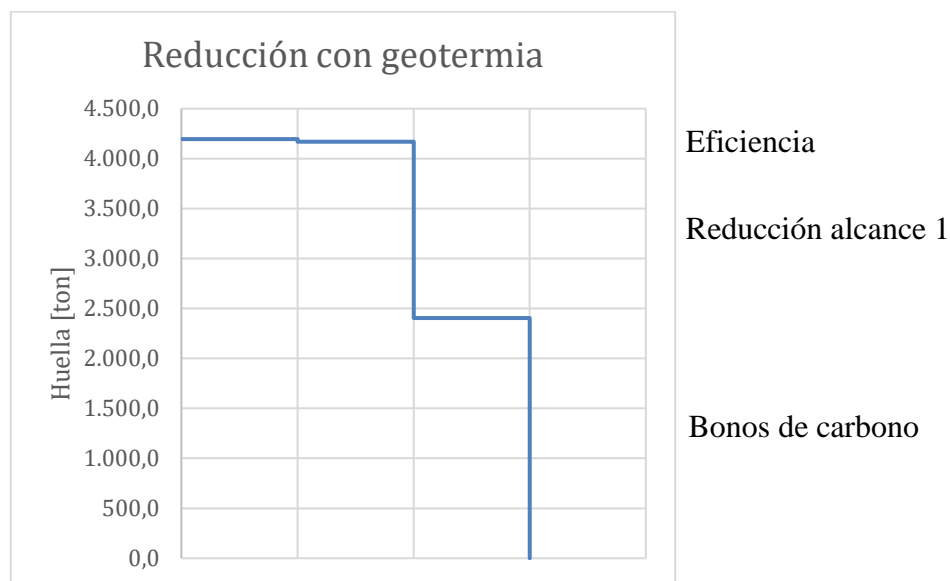


Ilustración 39 evolución de la huella de carbono en la UMAG con geotermia

Como ya se vio en la sección 7.2, la instalación de calefacción con geotermia es extremadamente cara, cuyo precio por la reducción de huella total de calefacción alcanza a los MMCLP 2.001, siendo virtualmente impagable para una universidad pública. Como contraargumento a la imposibilidad de instalar geotermia están las fuentes de incertidumbre detectadas en el cálculo. Es por esto que en la gráfica anterior se anuncia la reducción de emisiones como “reducciones de alcance 1”, porque el reemplazo de la calefacción no es exclusivo a la geotermia pero es el método analizado y el que no supone un consumo de otro energético primario. La compra de bonos de carbono en este caso alcanza los USD 96.240.

## 8.2.3 Caso combinado

Por último se analiza el caso de la instalación de al menos 1 aerogenerador y reemplazo de la calefacción.



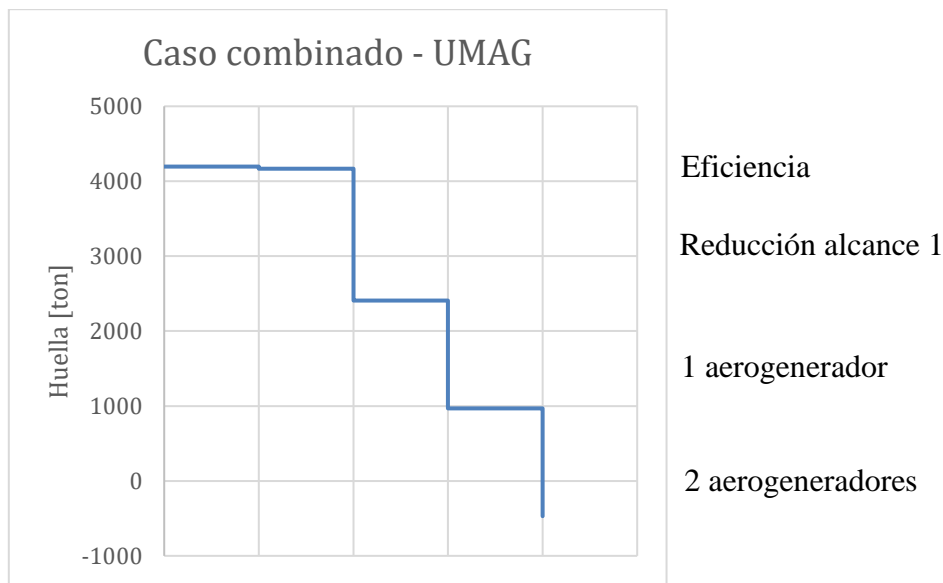


Ilustración 40 evolución de la huella de carbono en la UMAG con geotermia y generación eólica

Igual que en los casos anteriores, es difícil conocer el coste total de las medidas incluidas en este caso, por la inclusión de geotermia con su incertidumbre y por la inclusión de generación eólica con sus costos de transporte. En cualquier caso, se ve que en esta situación la UMAG es carbono negativa, mitigando unas 470 toneladas de  $CO_{2eq}$  al año en la matriz del SEM.

## 8.3 Situación cooperativa

Habiendo entendido la gravedad del cambio climático y añadido la lucha contra él en su currículum ambas universidades, el clima entre ellas debiera ser de cooperación para lograr la mayor reducción de emisiones posible.

### 8.3.1 Caso base

En el gráfico siguiente se ve el caso base, que comprende eficiencia energética en la UMAG, la descarbonización y la presencialidad optativa en la FCFM.

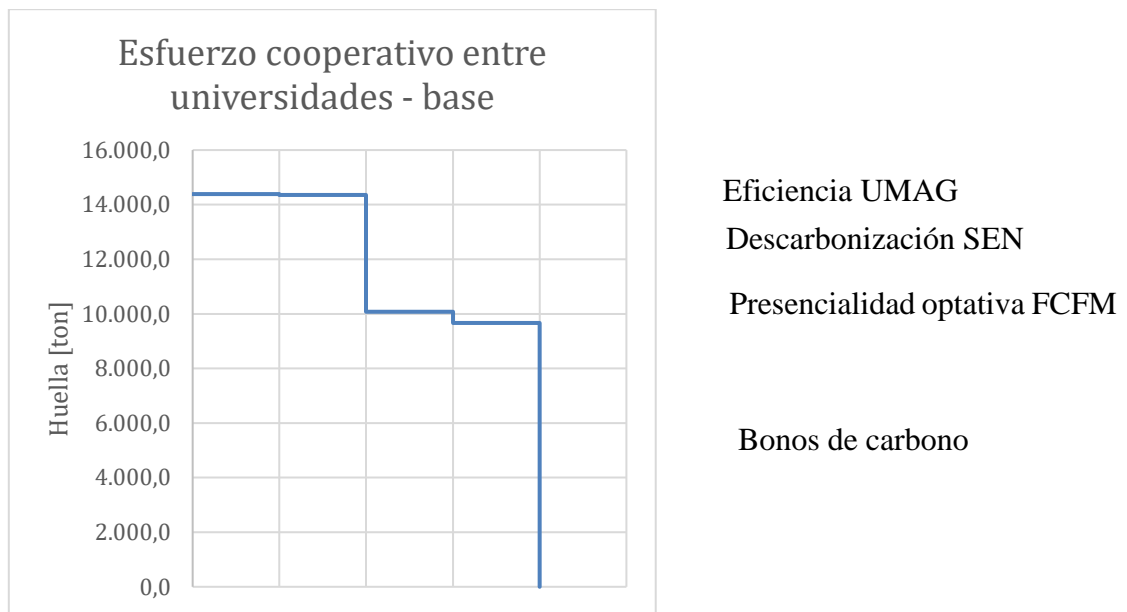


Ilustración 41 evolución de la huella de carbono conjunta, caso base

Como se ve y como se esperaba del caso base, le falta un gran trecho para alcanzar la carbono neutralidad. En este caso, el precio de los bonos de carbono a comprar llega a los USD 376.853.

### 8.3.2 Mediante alcance 2<sup>35</sup>

Una posibilidad que no puede ser ignorada es la de una instalación de un parque eólico en conjunto entre las dos universidades. Los efectos de este se ven en la gráfica siguiente.

---

<sup>35</sup> Alcance 2 más docencia optativa en la FCFM, esto porque la medida no supone un costo de implementación

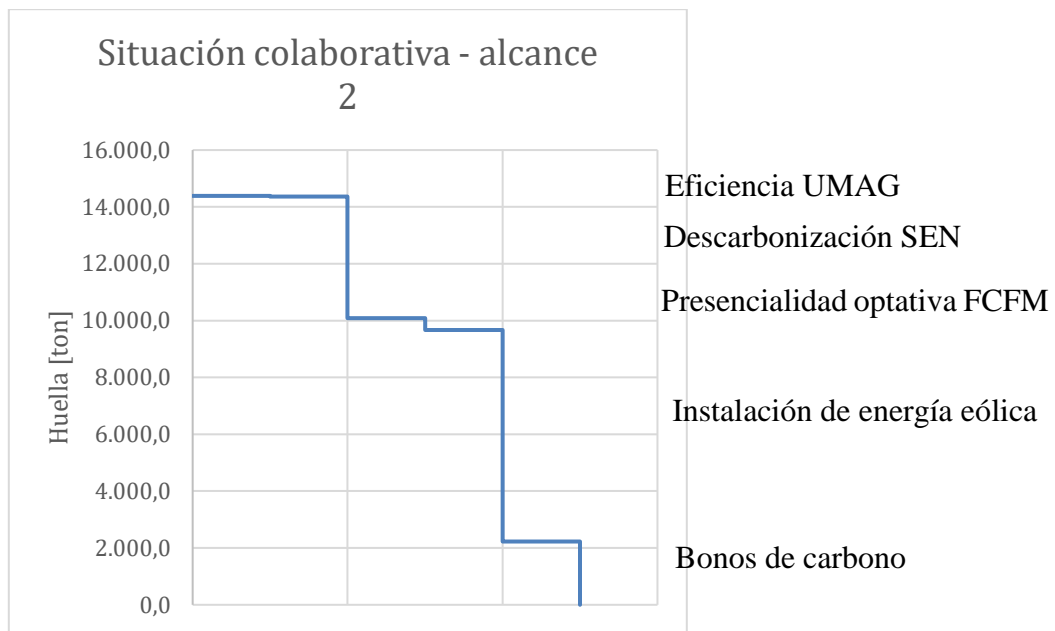


Ilustración 42 evolución de la huella de carbono conjunta con generación eólica

Si ambas universidades se unen para disminuir sus huellas de carbono, éstas disminuyen drásticamente. En el caso mostrado, se supone la instalación de 5 aerogeneradores: el máximo posible en el terreno de la Universidad de Magallanes, por restricciones de efecto estela. El layout del parque de generación es mostrado en la ilustración 43.



Ilustración 43 posiciones de los aeros en un parque de 2,5 MW

Es costo en este caso, asciende a USD 89.089 por bonos de carbono y USD 6.805.000 por el parque de generación. En total se debería pagar aproximadamente USD 6.894.089 por el plan.

### 8.3.3 Mix de propuestas

En la presente sección se explora qué tanto se puede disminuir la huella conjunta si ambas universidades trabajan en conjunto e implementan todas las medidas propuestas.

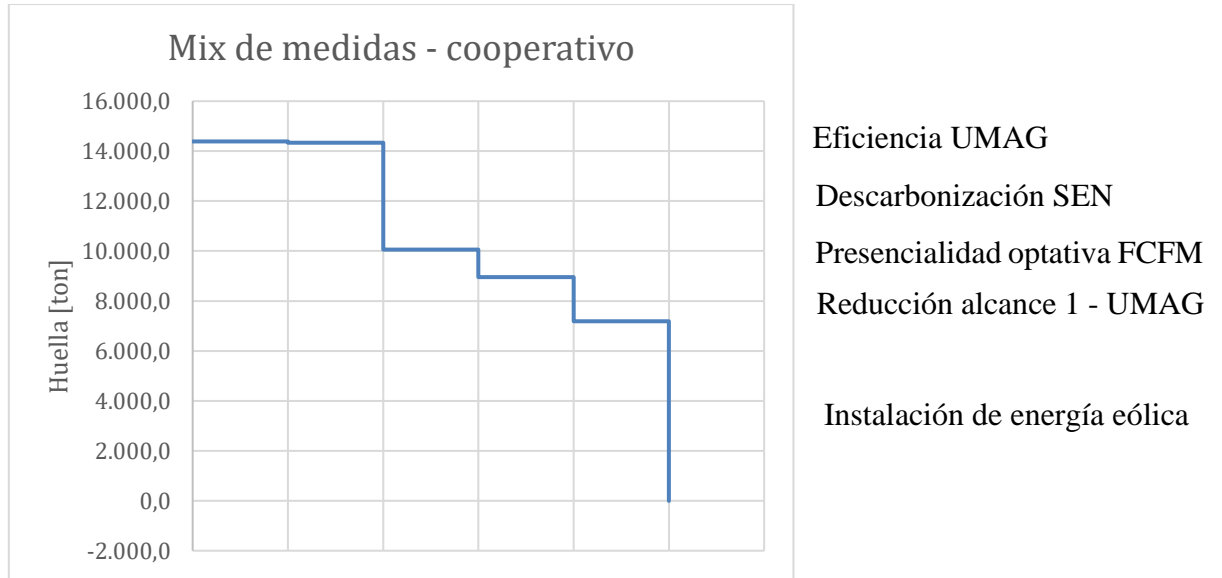


Ilustración 44 evolución de la huella de carbono conjunta considerando todas las propuestas

Para este caso, se supone la presencialidad optativa como la anteriormente definida presencialidad optativa más la reducción de días de clases en 1 (miércoles). La instalación de energía eólica supone la instalación de un parque generador de 2,5MW. Se ve del gráfico que al unificar esfuerzos, ambas universidades pueden lograr la carbono neutralidad en conjunto, pero con un exporte económico bastante alto, teniendo en consideración el coste de la geotermia de baja entalpía y el proyecto eólico, aunque este eventualmente se financiaría con exportes de energía al SEM.

## 8.4 Tabla de resumen

La presente sección tiene como objetivo resumir lo enunciado en las secciones anteriores. Para esto se agrupan los datos de reducciones y costos por plan en la tabla 21.

Tabla 21 resumen de planes en miras a la carbono neutralidad

Plan	Emisiones reducidas [ton]	Porcentaje del total [%]	Coste del plan [USD]	Costo de bonos de carbono <sup>36</sup> [USD]
FCFM – base	4.279,25	41,98	0	236.523
FCFM (docencia remota) – un día menos	4.848,9	47,57	0	213.736
FCFM (docencia remota) – optativo	4.696,6	46,08	0	219.832
FCFM (docencia remota) – caso combinado	5.382,5	52,81	0	192.392
UMAG – 1 aero	1.465,9	34,93	1.470.184	248.890
UMAG – 3 aeros	4.585,1	109,28	4.083.000	+5.948
UMAG – Geotermia	1.789,5	42,65	MMCLP 2.001	96.241
UMAG – caso combinado	4.665,9	111,20	-	+18.812
Cooperativo – caso base	4.723,3	32,82	0	386.584
Cooperativo – alcance 2 (+doc)	11.919,2	82,84	6.805.000	98.748
Cooperativo – total	14.393,9	100,04	-	+240

Un par de cosas que comentar de la tabla:

- se ve que la acción más costo efectiva en miras de la carbono neutralidad es la instalación de 1 aerogenerador en UMAG, considerando el costo propio del plan sumado al costo de los bonos de carbono;
- hay dos planes (que consideran geotermia y otras instalaciones) que no tienen un costo asociado y esto es por la mezcla entre monedas;
- se ve que la geotermia es la más cara de las soluciones, pero esto depende del estado del arte y de las soluciones que ya se han hecho en el territorio. Recordar que la evaluación económica se hizo en base a un estudio actual y que no considera precios futuros;
- en la columna de “bonos de carbono” hay algunas celdas que al número le antecede un +; esto es porque el plan resultó ser carbono negativo y se podría entrar a la bolsa a ofertar las reducciones extra de carbono al precio considerado; y

<sup>36</sup> Los bonos de carbono serían únicamente para tener una referencia de cuánto se tendría que pagar por disminuir las emisiones totales de dióxido de carbono equivalente de esta manera que ya se acordó es artificial y no aporta a las disminuciones reales de emisiones.

- en particular a la FCFM le cuesta disminuir su huella de carbono, pero es por los objetivos definidos para el trabajo de memoria: evaluar carbono neutralidad principalmente mediante el alcance 2, lo que fue posible solamente cuando se consideró el factor de emisiones de un sistema eléctrico en el que no está inserta.

## 9 Análisis y discusión

Es particularmente difícil realizar una planificación con datos inciertos o que están constantemente cambiando. Este es el caso del trabajo realizado en esta memoria de título, donde se debe proponer soluciones para que dos instituciones de educación superior logren la carbono neutralidad, mediante un enfoque energético. Es incierto el escenario por los valores del factor de emisiones que tendrán los sistemas eléctricos estudiados a mediano y largo plazo, en el caso del SEN si bien se tiene un aproximado (en formato de gráficos para la descarbonización a paso normal y una estimación de porcentaje de energía inyectada esperada en la descarbonización acelerada), es imposible conocer exactamente el factor de emisiones que se tendrá a futuro por la variabilidad que han presentado las hidrologías a lo largo del país debido al cambio climático, factor de emisiones que es también influenciado por las centrales a carbón de las cuales se ha tenido incertidumbre de cuándo se desconectarán, o por centrales ERNC que aún no se han conectado. Por el lado del SEM existe una declaración de intención de conectar más plantas ERNC pero no pasa de eso y tampoco son suficientemente conocidos los factores de emisión de las plantas que operan en este sistema: el factor utilizado fue rescatado de la bibliografía; con esta información no se puede tener una proyección exacta del factor de emisiones que tendrá el sistema. Es por esto que tal vez no será suficiente las medidas expuestas en este documento y se debe explorar otras alternativas, como descarbonización mediante captación por procesos biológicos.

Si se intenta resolver el problema a corto plazo es sumamente sencillo, ya que se puede conectar una planta ERNC que compense las emisiones de cada facultad para el año presente, o al siguiente y conseguir la certificación, pero ¿qué pasa con los años siguientes? Se debe seguir instalando cada vez más capacidad de generación a los sistemas interconectados, lo que hace que el problema deje de ser trivial porque se pierde la posibilidad de conectar la planta como generadora residencial o para autoconsumo porque las emisiones por alcances 1 y 3 se disparan en comparación con las de alcance 2 y pasan a ser inaccesibles mediante medios energéticos (al menos para una organización que no quema combustibles para su funcionamiento). En este sentido, suena más sensato la instalación de parques generadores que sumen la energía total consumida por la FCFM y que esta huella (de alcance 2) sea la única a neutralizar con generación de energía más eficiencia energética. Según cálculos anteriores, la capacidad instalada para esta solución son 8,83 MW repartidos por los edificios que son dependencias de la FCFM para no tener complicaciones regulatorias (ley de autoconsumo).

Siguiendo la línea del párrafo anterior, y considerando la relativamente baja capacidad a instalar para paliar las emisiones por alcance 2, se sugiere fuertemente la creación de un programa interno en las universidades de vinculación con el medio mediante proyectos de energía (eficiencia o generación) tal que las instituciones educativas figuren como ESCO o como controlador operacional para que así (bajo la mira del GHG Protocol) las emisiones evitadas se puedan contabilizadas por la FCFM o por la UMAG en un esfuerzo de descarbonización progresiva.

Como ya se ha dicho, la descarbonización mediante generación de energía es incierta y las medidas de reducción son insuficientes para alcanzar la carbono neutralidad, por lo que la mejor opción parece ser la captación (como ya se ha mencionado algunas veces durante el texto) aunque no se debe dejar de lado los bonos de carbono. Los bonos de carbono no son solamente una herramienta rápida y fácil para lograr la carbono neutralidad, si no que también sirven para

financiar proyectos que evitan emisiones de  $CO_{2eq}$  o que las absorben de la atmósfera (mediante captación o fijación). En este sentido, en caso de no lograr la carbono neutralidad con medidas que ataquen el alcance 1, 2 o 3 no sería detrimental para la imagen pública el salir a el mercado de bonos de carbono.

Queda comentar sobre las unidades de dinero usadas en la sección de planificación, hay algunos valores que están expresados en peso chileno, mientras que la gran mayoría de valores se encuentra en dólar estadounidense. Esto se debe a que los precios de plantas fotovoltaicas y eólicas se manejan en dólar por ser constituídos por equipos y estructuras importadas. Los bonos de carbono también, se transan en dólar. Por el otro lado, la solución geotérmica fue cotizada en un documento chileno con precios referenciales locales, para equipos y obras civiles. Por esta misma razón se distorsionan los precios al cambiar de valor el dólar, por lo que se considera inconveniente unificar en una sola moneda.

Para finalizar, los planes consideran esfuerzos individuales que debe tener cada universidad para ojalá alcanzar carbono neutralidad, pero como ya se ha visto para la FCFM no se tiene esta posibilidad en el mediano – largo plazo considerando reducciones de la huella mediante medidas en alcance 2. En este sentido se apela a la camaradería en la lucha contra el calentamiento global y se asume que ambas universidades podrían hacer un esfuerzo en conjunto para paliar las emisiones de  $CO_{2eq}$ . Esto sujeto claramente a las voluntades de los tomadores de decisión de ambos planteles. Este punto de la aprobación de estas personas es vital para la implementación de cualquiera de las sugerencias planteadas en este documento.



## 10 Conclusiones

Como se ha visto en el trabajo hecho, ambos campus universitarios tienen condiciones sumamente distintas, las que se muestran tanto en sus huellas de carbono como en el entorno eléctrico en el que están insertos. Las huellas se diferencian por el clima en el que están sumidos ambos campus, se ve que la huella de la UMAG es un 300% aproximadamente de la del campus Beauchef, los sistemas eléctricos en los que están hacen que la huella de alcance 2 en Beauchef es 450% de la de la UMAG y si se cuentan todos los consumos que dependen de él es mucho más y la cantidad de personas en ambas universidades y las distancias que se mueven para viajar desde y hacia el campus hacen que la huella del campus de la FCFM sea casi 3 veces la de la UMAG. Todo esto sugiere que los planes de acción serán completamente distintos en ambos casos.

Con respecto a la huella por alcance 2 de las universidades, se ve que ambas tienen dependencias en territorios favorables para la instalación de plantas de energías renovables no convencionales, pero solamente una de ellas, la UMAG, puede sacar provecho de ella si el motivo de la instalación es simplemente la reducción de huella de carbono por alcance 2: como se ha visto puede mitigar completamente su huella de carbono total, mientras que la FCFM necesitaría un parque enorme (¡de 100 megawatts instalados!) para hacer lo mismo, lo que es infactible. No por el terreno, si no por condiciones económicas.

Pese a lo expuesto en los puntos anteriores, el campus Beauchef sí puede disminuir su huella de carbono y las oportunidades están a su alcance, primero la descarbonización de la matriz energética del SEN le hará un gran favor en este sentido disminuyendo sus emisiones de alcance 2 en un 90% y segundo puede utilizar las enseñanzas que nos dio el año 2020 para cambiar la manera en que se hace docencia: ya se ha demostrado que profesores y alumnos pueden interactuar en modalidad remota (lo que ya se había hecho en cursos de educación continua/diplomados) e incluso los mismos estudiantes declaran que tener una opción a distancia sería beneficioso en términos de calidad de aprendizaje en algunos, como en calidad de vida para otros. Estas medidas no aseguran la carbono neutralidad para la FCFM y en este sentido se sugiere una herramienta que ambas universidades pueden usar, que es el mercado de carbono.

Se puede concluir también que las reducciones por instalación de ERNC no son lo único que puede hacer la UMAG para reducir su huella de carbono y eventualmente alcanzar la carbono neutralidad, si no que también puede enfocarse en la eficiencia energética para reducir su consumo energético y puede instalar geotermia para reemplazar la calefacción mediante quema de combustibles fósiles. Lamentablemente no se puede tener una señal de precio correcta para la instalación geotérmica, pero si se pudo obtener la potencia necesaria en kilowatts térmicos que habría que instalar.

Los Planes de Acción Climática (CAP por su sigla en inglés) muestran que son cualquiera de las medidas mencionadas ambos campus pueden alcanzar la carbono neutralidad, con el aporte indicado de bonos de carbono. Sin ellos, la FCFM tendría problemas para ser carbono neutral por su cuenta y enfocándose en la energía, sin embargo, en un esfuerzo en conjunto podría lograrlo con la UMAG e incluso pueden llegar a ser carbono negativos. Sin ayuda de la FCFM, la UMAG sí puede ser carbono neutral mediante alcance 2 e incluso llegar a ser carbono negativa.

# 11 Trabajo futuro

Por último y para cerrar el presente trabajo de memoria de título se presentan los pasos a seguir que vienen en progresión natural de lo presentado en este documento:

- Se debe investigar y calcular oportunidades de captación por parte de las facultades. Este punto es importante porque aporta multidimensionalmente a la lucha contra el cambio climático, porque además de disminuir la concentración de  $CO_{2eq}$  en la atmósfera, ayuda a recuperar pequeños ecosistemas donde estaban perdidos por la urbanización de los sectores cercanos (recordemos que los terrenos propuestos son Laguna Carén y campus UMAG).
- Se debe realizar auditorías energéticas en ambas universidades, al tener certeza de la cantidad de consumo que se puede evitar con medidas concretas se puede tener una mejor noción de cómo será la disminución de GEI por consumo energético.
- También se debe hacer la incursión geotérmica, para verificar las condiciones que tendría una posible solución de climatización mediante geotermia en la UMAG, por ejemplo, ¿en cuánta profundidad la temperatura es estable? ¿Con cuánto espacio se cuenta para la instalación de canalizaciones de fluido térmico? ¿Cómo debe ser la comunicación física entre edificios del campus?
- En UMAG se debe considerar un estudio similar al hecho en este trabajo de título para estimar la disminución de huella de carbono en alcance 3, estudiando las reducciones que se harían evitando la movilización de estudiantes y/o académicos. En particular, en esta ocasión no se pudo hacer (como ya se ha dicho) una estimación de cuánto sería la huella evitada por la UMAG por concepto de docencia remota por la falta de datos sobre los horarios ocupados en cada día por parte de la Facultad. En este sentido, la aproximación que se haría sería demasiado gruesa (en mi opinión) y entonces se perdería la precisión del estudio.
- Se debe replantear los cursos de taller y vinculación con el medio, para poder tener proyectos que inserten a los futuros ingenieros e ingenieras en la sociedad. Así, además de beneficiarse las Facultades con los productos entregados, los estudiantes se familiarizarían con aspectos anexos a la ingeniería eléctrica y que la gran mayoría no conoce hasta el momento.

Claramente ninguna de las recomendaciones, ni pasos a seguir será posible de evaluar antes de que pase por los altos mandos de cada campus, los tomadores de decisión. En este sentido debe haber una voluntad firme de esta persona, que sea capaz de liderar los procesos, con una mentalidad crítica y suficientemente flexible en la pequeña escala para dejar pasar oportunidades de reducción que serían un problema en el largo plazo, o simplemente imposibles.

## 12 Bibliografía

- AASHE. (2019). *A global sustainability standard created by and for higher education*. Obtenido de About STARS: <https://stars.aashe.org/>
- Aravena, D., Muñoz, M., Maureira, D., Morata, D., Lahsen, A., Parada, M. Á., & Dobson, P. (2016). Assessment of high entalpy geothermal resources and promising areas of Chile. *Elsevier*, 1-13.
- Banco Mundial. (21 de Abril de 2020). *CO2 emissions (kt)*. Obtenido de Mapa de CO2: <https://data.worldbank.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?view=map>
- Banco Mundial. (2021). *State and Trends of Carbon Pricing 2021*. Washington DC: Banco Mundial.
- Bauer, L., & Matysik, S. (02 de 06 de 2019). *Enercon E-33 / 300*. Obtenido de Wind-turbine-models.com: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/368-enercon-e-33-300>
- Campos, J. (2016). *Optimización energética del Campus Beauchef de la Universidad de Chile*. Santiago: Universidad de Chile.
- CEN. (2020). *Análisis de la Operación y Abastecimiento del Sistema Eléctrico Nacional de Chile en un escenario de retiro total de centrales a carbón al año 2025*. Santiago.
- CNE. (2020). *Informe de Costos de Tecnologías de Generación*.
- Comisión Nacional de Energía. (2019). *Anuario Estadístico de Energía 2018*. Santiago, Chile.
- Compañía General de Electricidad. (s.f.). *Tarifas*. Obtenido de Información importante sobre las tarifas de nuestros servicios: <https://www.cge.cl/informacion-comercial/tarifas-y-procesos-tarifarios/>
- Coordinador Eléctrico Nacional. (2020). *Capacidad y Generación de Energía 2020*. Reportes, Estadísticas y Plataformas de Uso Frecuente: <https://www.coordinador.cl/reportes-y-estadisticas/>.
- Cruz, P., Bascuñán, A., Velozo, J., & Rodrgz, M. (2015). *Funciones alométricas de contenido de carbono para quillay, peumo, espino y litre*. Santiago: Bosque.
- Deutshce Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit Gmbh. (2020). *Índice de precios: Bombas de calor geotérmicas y aerotérmicas en Chile*. Santiago de Chile.
- Dobrotkova, Z., Surana, K., & Audinet, P. (2018). The price of solar energy: Comparing competitive auctions for utility-scale solar PV in developing countries. *ElSevier*, 133-148.

- ENERCO. (2020). *Mariposa*. Recuperado el Junio de 2021, de Proyecto geotérmico Mariposa: <https://www.edcltd.cl/proyecto-mariposa/>
- Energía 2050. (2017). *Política energética Magallanes y Antártica Chilena*. Santiago: Ministerio de energía.
- Energía Abierta. (2020). *Capacidad Instalada*. Obtenido de Capacidad Instalada: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/>
- Enor Chile S.A. (2021). *Reporte Emisiones SEN 2020*. Obtenido de Emisiones: <https://enorchile.cl/es/emisiones/>
- Estévez, P. (Marzo de 2009). Apunte de Circuitos Eléctricos. *Análisis y Diseño de Circuitos Eléctricos*. Santiago, Chile.
- Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. (22 de agosto de 2019). *Declaración pública*. Obtenido de Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile: <http://ingenieria.uchile.cl/noticias/156958/declaracion-publica-compromiso-fcfm>
- Gayon, J. (2006). History of the Concept of Allometry. *American Zoologist*, 748-758.
- Hidro Québec. (2018). *Electricity Supply and Air Emissions*. Québec: GHD.
- Huella Chile a. (2019). *Anexo declaración de neutralización de emisiones de GEI*. Santiago: MMA.
- Huella Chile b. (2019). *Declaración de reducción de emisiones de GEI*. Santiago: MMA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *Cambio Climático 2013, bases físicas*. PNUMA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *Calentamiento Global de 1,5°C*. PNUMA.
- IPCC. (2013). *Annex III: Glossary [Planton, S. (ed.)]*. In: *Climate Change 2013*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. (2020). *The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de ipcc: <https://www.ipcc.ch/>
- La Prensa Austral. (5 de agosto de 2019). La Umag suscribió significativa declaración de emergencia climática. Punta Arenas, Provincia de Magallanes, Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017). *Informe del inventario nacional de gases de efecto invernadero de Chile, serie 1900-2013*. Santiago, Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2018). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero*. Obtenido de Consulte el INGEI: <http://snichile.mma.gob.cl/consulta/>

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). *El Gobierno Declara la Emergencia Climática*. Madrid: bzn prensa.
- MITECO. (2019). *Guía para la estimación de absorciones de dióxido de carbono*. Madrid.
- Naciones Unidas Cambio Climático. (2020). *Sobre el Secretariado*. Obtenido de ¿Cuál es el propósito del secretariado?: <https://unfccc.int/about-us/about-the-secretariat>
- Oficina de Ingeniería para la Sustentabilidad. (29 de 4 de 2020). *Huella de Carbono*. Obtenido de FCFM U de Chile: <http://ingenieria.uchile.cl/oficina-de-ingenieria-para-la-sustentabilidad/iniciativas/106698/huella-de-carbono>
- Oficina de Ingeniería para la Sustentabilidad. (30 de abril de 2020). *Visión*. Obtenido de Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas: <http://ingenieria.uchile.cl/oficina-de-ingenieria-para-la-sustentabilidad/quienes-somos/106318/oficina-de-ingenieria-para-la-sustentabilidad>
- Opaso, C., Toledo, C., & Yurisch, T. (2017). *Fracking: Fracturando el futuro energético de Chile*. Santiago: Fundación Terram.
- PVEducation. (2017). *Solar cell parameters*. Obtenido de IV Curve: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>
- Red Campus Sustentable. (2020). *Misión y Visión*. Obtenido de Misión y Visión: <https://redcampussustentable.cl/nuestra-vision-y-mision/>
- Reporte de Emisiones SEN 2020*. (Diciembre de 2020). Obtenido de Enor Chile: <https://enorchile.cl/emisiones/>
- Revista Electricidad. (24 de Octubre de 2007). *A mediados de noviembre el Parque Eólico Canela comienza sus funciones*. Obtenido de A mediados de noviembre el Parque Eólico Canela comienza sus funciones: <https://www.revistaei.cl/2007/10/24/chile-a-mediados-de-noviembre-el-parque-eolico-canela-comienza-sus-funciones/>
- Romo, J. (2015). *Maquinas Sincrónicas Trifásicas*. Santiago.
- Rudnick, H. (2005). *Mercado de GNL en Chile*.
- Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2012). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Elsevier*, 341-348.
- Sherwood, S., Bony, S., & Dufresne, J.-L. (2014). Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing. *Nature*, 37-42.
- Sustainable development, UN. (2017). *American College & University Presidents' Climate Commitment*. Obtenido de Description/achievement of initiative: <https://sustainabledevelopment.un.org/partnership/?p=2375>

- Thompson Rivers University. (2018). *Thompson Rivers University OP-6: Clean and Renewable Energy*. Obtenido de A brief description of on-site renewable electricity generating devices : : <https://reports.aashe.org/institutions/thompson-rivers-university-bc/report/2018-05-31/OP/energy/OP-6/>
- Tjörvi, E., Thorhallsson, S., & Steingrímsson, B. (2011). Geothermal power plants. *Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants*. Santa Tecla: La Geo.
- Torres, G. (2019). Desarrollo de la Geotermia en Chile: Masificación de la Geotermia de Alta y Baja Entalpía. *Desarrollo de la Geotermia en Chile: Masificación de la Geotermia de Alta y Baja Entalpía*. Santiago: Colegio de Ingenieros de Chile.
- Transmark. (2018). *Peumayén*. Obtenido de Transmark Renewables: <https://www.transmark-renewables.com/projects/peumayen>
- U.S. Department of Energy. (2019). *GeoVision: Harnessing the Heat Beneath Our Feet*.
- UMAG Sustentable. (2020). *Cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero, año 2019 campus central, Universidad de Maggales*. Punta Arenas.
- UNFCCC. (2020). *Clean Development Mechanism*. Obtenido de <https://cdm.unfccc.int/>
- United Nations. (1998). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Kyoto: UN.
- Wilson, C. A., & Mitchell, J. B. (1987). A Double CO<sub>2</sub> Climate Sensitivity Experiment With a Global Climate Model Including a Simple Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 315-343.
- World Business Council for Sustainable Development & World Resources Institute. (2004). *GHG Protocol*. Geneva & Washington: Earthprint Ltd. & Hopkins Fulfillment Service.
- World Business Council for Sustainable Development. (2015). *GHG Protocol*. Earthprint Limited.
- Zaini, N. H., Ab Kadir, M. Z., Izadi, M., Ahmad, N. I., Radzi, M., & Azis, M. (2015). The Effect of Temperature on a Mono-crystalline Solar PV Panel. *IEEE Xplore*, 249-253.

# Anexo A: Consumo eléctrico en la FCFM

Como fue señalado en el texto principal del documento, desde un año (2016) en adelante se cuenta con datos medidos de consumo, mientras que antes de ese año se tiene solamente los datos encontrados en la bibliografía (memoria de título de Jorge Campos Flores), los cuales no se encuentran completos. Los datos de consumo obtenidos en la revisión bibliográfica son los que se muestran en la tabla de anexo 1, donde se detalla las subdivisiones de la Facultad que consideran.

Tabla del anexo 1 consumos eléctricos en la FCFM tal y como fueron encontrados

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Consumo [MWh]	6 189	6 544	6 967	7 413	7 609	12 716	12 814	12 382	12 225
Zonas consideradas	Todos los consumos de Beauchef 850 y Beauchef 851 – edificio norte.					Beauchef 850, B851 (completo), astronomía, mecánica, industrias, Domeyko, IDIEM y NIC Chile.			

Para analizar la evolución del consumo eléctrico se necesita una continuidad en los datos de la muestra, lo que se ve entorpecido por la diferencia en las zonas escogidas. Para esto, se elige aproximar los **años anteriores** para que sean comparables con los posteriores; debido a que se necesita contabilizar la totalidad del consumo para entender por completo la huella de carbono de alcance 2. Para esto se usa un método anunciado en el GHG Protocol, que consiste en calcular el porcentaje del total de lo consumido que aporta la instalación nueva, para luego escalarlo en base a los datos actuales para así tener un estimado de lo que habría consumido de haber estado instalada ya ese año. Hay una diferencia de forma que consiste en que GHG Protocol detalla el procedimiento para emisiones de GEI, mientras que lo que se necesita es la estimación de un consumo eléctrico; al ser fundamentalmente el mismo principio (añadir una instalación que no estaba considerada al conteo) se considera válida la aproximación por este método.

Después de revisar los datos se obtiene un factor de 56% del total del consumo que proviene de las instalaciones de Beauchef 850 y 851 norte. Con este número, el método anunciado anteriormente y los datos de consumo eléctrico, luego de calcular se llega a los resultados mostrados en la tabla 5.

## Anexo B: Cálculo de generación eólica

Para el cálculo de la generación eólica en el terreno de la UMAG, se necesita una fuente de datos de velocidades promedio de viento en la zona. Para esto se acude al explorador eólico de la Universidad de Chile, donde está mapeado casi todo el territorio nacional (excepción de una franja hacia el Parque Nacional Bernardo O'Higgins en la región de Aysén) y se obtiene el perfil de viento. Se sacan todos los disponibles para generar la curva de Shear; los perfiles de interés se muestran en las tablas del anexo 2 y 3. Para este análisis se escoge una altura de buje no demasiado alta para que no dificulte en demasía la instalación o genere sombra en edificios cercanos, ni tan bajo que tenga baja velocidad de viento; además se debe hacer un match entre el aerogenerador a seleccionar y la altura preferida para el análisis del viento en un proceso iterativo.

Tabla del anexo 2 perfil de velocidad diario en UMAG a 56 metros de altura

V [m/s]	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
00:00	7,2	6,9	5,1	7,9	8,0	7,4	6,8	7,5	7,2	8,0	7,3	8,9
01:00	7,5	6,4	4,4	8,2	7,5	7,7	6,3	7,5	7,6	8,1	7,4	8,5
02:00	7,3	6,9	5,8	7,6	7,7	7,4	6,3	7,5	6,8	8,0	7,7	8,5
03:00	7,3	6,6	6,5	8,1	7,8	7,4	6,7	7,4	6,3	7,5	7,6	9,2
04:00	7,1	6,9	6,7	8,3	8,5	7,6	6,4	7,8	6,1	7,5	7,8	9,0
05:00	7,0	7,3	6,3	8,3	8,9	7,3	6,1	7,7	6,8	8,1	7,7	8,7
06:00	7,3	7,1	6,2	8,4	7,8	7,5	6,5	7,4	7,0	7,5	8,0	8,8
7:00	7,7	7,0	6,1	8,2	8,2	7,9	6,3	7,0	5,8	7,1	8,0	8,7
8:00	7,8	7,2	6,2	7,6	8,2	8,0	6,4	7,0	6,1	7,1	8,5	8,6
09:00	8,0	7,4	6,6	8,0	7,8	8,0	6,8	6,8	7,1	7,5	8,5	9,7
10:00	9,0	7,5	6,5	7,3	7,5	7,7	6,7	7,3	6,9	7,7	9,1	10,0
11:00	9,4	7,9	6,9	7,1	7,7	7,2	6,7	7,4	7,2	7,6	9,3	9,8
12:00	9,5	7,6	6,9	7,8	8,1	7,7	6,6	8,1	7,3	7,6	9,2	9,8
13:00	10,3	7,6	6,7	7,3	8,5	7,6	6,4	7,9	7,7	8,7	9,6	9,3
14:00	10,3	7,6	7,0	7,6	7,9	7,4	6,1	9,0	7,5	8,6	9,0	10,0
15:00	10,0	7,1	7,5	8,1	8,0	7,4	6,7	9,4	7,5	8,6	9,0	9,7
16:00	9,4	7,0	6,4	8,0	7,7	7,0	6,3	9,2	7,9	8,6	8,4	9,5
17:00	9,9	6,5	6,4	7,7	8,2	6,7	6,5	8,7	7,7	8,4	8,2	9,3
18:00	10,3	6,2	6,3	7,1	8,4	7,0	6,4	8,7	7,3	8,2	7,9	9,6
19:00	8,9	6,7	6,4	7,2	8,6	7,4	6,5	8,5	6,3	7,3	7,3	9,5
20:00	8,8	6,8	6,5	6,8	9,0	7,7	6,4	8,7	6,4	7,4	7,0	8,7
21:00	7,1	6,9	6,5	7,3	8,4	8,2	6,3	8,5	6,7	6,8	6,6	9,2
22:00	7,6	6,9	6,4	7,8	8,6	8,2	6,6	8,3	7,0	7,4	6,0	9,6
23:00	7,4	6,7	5,7	7,2	7,9	8,0	6,5	8,0	7,2	7,4	7,2	9,0



Tabla del anexo 3 perfil de velocidad diario en UMAG a 76 metros de altura

V [m/s]	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
00:00	7,9	7,5	5,4	8,6	8,7	8,0	7,3	8,0	7,8	8,7	7,8	9,6
01:00	8,1	6,9	4,8	8,9	8,1	8,3	6,7	8,0	8,2	8,8	8,0	9,2
02:00	7,9	7,5	6,3	8,4	8,2	8,1	6,8	8,0	7,3	8,6	8,4	9,3
03:00	7,8	7,2	7,1	8,8	8,4	8,0	7,2	8,0	6,8	8,1	8,3	10,0
04:00	7,7	7,4	7,2	9,0	9,2	8,1	6,8	8,4	6,6	8,2	8,4	9,7
05:00	7,6	7,9	6,8	9,0	9,7	7,9	6,5	8,2	7,4	8,8	8,3	9,5
06:00	7,9	7,7	6,7	9,1	8,5	8,0	7,0	7,9	7,4	8,1	8,7	9,5
7:00	8,3	7,5	6,5	8,8	8,9	8,6	6,8	7,5	6,2	7,7	8,7	9,4
8:00	8,4	7,8	6,6	8,2	8,9	8,7	7,0	7,5	6,5	7,6	9,0	9,2
09:00	8,6	7,8	6,9	8,5	8,4	8,6	7,4	7,3	7,7	8,0	9,0	10,3
10:00	9,5	7,9	6,9	7,8	8,1	8,4	7,2	7,9	7,4	8,1	9,6	10,6
11:00	10,0	8,3	7,3	7,6	8,2	7,8	7,2	7,9	7,7	8,0	9,8	10,4
12:00	10,0	7,9	7,3	8,3	8,6	8,3	7,1	8,6	7,8	8,0	9,7	10,3
13:00	10,8	8,0	7,2	7,8	9,0	8,2	6,9	8,4	8,1	9,2	10,1	9,8
14:00	10,8	7,9	7,4	8,2	8,5	7,9	6,6	9,6	8,0	9,1	9,5	10,6
15:00	10,6	7,5	7,9	8,7	8,6	8,0	7,1	10,0	8,1	9,2	9,5	10,3
16:00	10,0	7,4	6,8	8,6	8,3	7,6	6,8	9,9	8,4	9,2	8,8	10,0
17:00	10,6	6,9	6,9	8,3	8,9	7,2	7,2	9,4	8,3	9,0	8,7	9,9
18:00	11,0	6,6	6,8	7,7	9,1	7,5	7,0	9,4	7,8	8,8	8,4	10,3
19:00	9,6	7,2	7,0	7,8	9,3	8,0	7,1	9,1	6,8	7,9	7,9	10,2
20:00	9,5	7,2	7,0	7,5	9,8	8,3	7,0	9,3	7,0	8,1	7,6	9,5
21:00	7,7	7,5	7,0	8,1	9,1	8,9	6,9	9,1	7,3	7,5	7,3	10,0
22:00	8,3	7,4	7,0	8,6	9,2	8,8	7,2	8,9	7,6	8,1	6,5	10,4
23:00	8,2	7,3	6,2	7,9	8,6	8,6	7,0	8,5	7,8	8,1	7,8	9,8

Para el cálculo de la generación de energía con este perfil de viento se escoge un aerogenerador tipo; en este caso se usó el modelo ATB Riva Calzoni 500, de 500 kW nominales a una altura de 56 y 76 metros del suelo. Los perfiles de generación en forma de tabla están en las tablas del anexo 4 y 5, mientras que los gráficos en las imagen del anexo 1 y 2. Estos fueron calculados haciendo un match entre las velocidades promedio de viento con la curva de generación del aerogenerador.

Tabla del anexo 4 perfil de generación en UMAG por el aerogenerador ATB Riva Calzoni de 500 kW

H=56m	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
00:00	221,9	185,3	69,7	285,4	306,6	243,1	185,3	243,1	221,9	306,6	221,9	418,4
01:00	243,1	154,4	48,6	334,6	243,1	264,2	138,9	243,1	264,2	306,6	243,1	362,5
02:00	221,9	185,3	112,7	264,2	264,2	243,1	138,9	243,1	185,3	306,6	264,2	362,5
03:00	221,9	169,8	154,4	306,6	285,4	243,1	169,8	243,1	138,9	243,1	264,2	456,1
04:00	200,7	185,3	169,8	334,6	362,5	264,2	154,4	285,4	123,5	243,1	285,4	446,4
05:00	200,7	221,9	138,9	334,6	418,4	221,9	123,5	264,2	185,3	306,6	264,2	390,5
06:00	221,9	200,7	138,9	362,5	285,4	243,1	154,4	243,1	200,7	243,1	306,6	418,4
7:00	264,2	200,7	123,5	334,6	334,6	285,4	138,9	200,7	112,7	200,7	306,6	390,5
8:00	285,4	221,9	138,9	264,2	334,6	306,6	154,4	200,7	123,5	200,7	362,5	390,5
09:00	306,6	243,1	169,8	306,6	285,4	306,6	185,3	185,3	200,7	243,1	362,5	475,6
10:00	446,4	243,1	154,4	221,9	243,1	264,2	169,8	221,9	185,3	264,2	446,4	495,0
11:00	465,8	285,4	185,3	200,7	264,2	221,9	169,8	243,1	221,9	264,2	456,1	485,3
12:00	465,8	264,2	185,3	285,4	306,6	264,2	169,8	306,6	221,9	264,2	456,1	485,3
13:00	496,0	264,2	169,8	221,9	362,5	264,2	154,4	285,4	264,2	390,5	475,6	456,1
14:00	496,0	264,2	200,7	264,2	285,4	243,1	123,5	446,4	243,1	390,5	446,4	495,0
15:00	495,0	200,7	243,1	306,6	306,6	243,1	169,8	465,8	243,1	390,5	446,4	475,6
16:00	465,8	200,7	154,4	306,6	264,2	200,7	138,9	456,1	285,4	390,5	362,5	465,8
17:00	485,3	154,4	154,4	264,2	334,6	169,8	154,4	390,5	264,2	362,5	334,6	456,1
18:00	496,0	138,9	138,9	200,7	362,5	200,7	154,4	390,5	221,9	334,6	285,4	475,6
19:00	418,4	169,8	154,4	221,9	390,5	243,1	154,4	362,5	138,9	221,9	221,9	465,8
20:00	418,4	185,3	154,4	185,3	446,4	264,2	154,4	390,5	154,4	243,1	200,7	390,5
21:00	200,7	185,3	154,4	221,9	362,5	334,6	138,9	362,5	169,8	185,3	169,8	456,1
22:00	264,2	185,3	154,4	285,4	390,5	334,6	169,8	334,6	200,7	243,1	123,5	475,6
23:00	243,1	169,8	102,0	221,9	285,4	306,6	154,4	306,6	221,9	243,1	221,9	446,4

Tabla del anexo 5 perfil de generación en UMAG por el aerogenerador ATB Riva Calzoni de 500 kW

H=76 m	Enero	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
00:00	285,4	243,1	91,2	390,5	390,5	306,6	221,9	306,6	285,4	390,5	285,4	475,6
01:00	306,6	185,3	62,7	418,4	306,6	334,6	169,8	306,6	334,6	418,4	306,6	456,1
02:00	285,4	243,1	138,9	362,5	334,6	306,6	185,3	306,6	221,9	390,5	362,5	456,1
03:00	285,4	221,9	200,7	418,4	362,5	306,6	221,9	306,6	185,3	306,6	334,6	495,0
04:00	264,2	243,1	221,9	446,4	456,1	306,6	185,3	362,5	169,8	334,6	362,5	475,6
05:00	264,2	285,4	185,3	446,4	475,6	285,4	154,4	334,6	243,1	418,4	334,6	465,8
06:00	285,4	264,2	169,8	446,4	362,5	306,6	200,7	285,4	243,1	306,6	390,5	465,8
7:00	334,6	243,1	154,4	418,4	418,4	390,5	185,3	243,1	138,9	264,2	390,5	465,8
8:00	362,5	285,4	169,8	334,6	418,4	390,5	200,7	243,1	154,4	264,2	446,4	456,1
09:00	390,5	285,4	185,3	362,5	362,5	390,5	243,1	221,9	264,2	306,6	446,4	496,0
10:00	465,8	285,4	185,3	285,4	306,6	362,5	221,9	285,4	243,1	306,6	475,6	498,0
11:00	495,0	334,6	221,9	264,2	334,6	285,4	221,9	285,4	264,2	306,6	485,3	497,0
12:00	495,0	285,4	221,9	334,6	390,5	334,6	200,7	390,5	285,4	306,6	475,6	496,0
13:00	499,0	306,6	221,9	285,4	446,4	334,6	185,3	362,5	306,6	456,1	495,0	485,3
14:00	499,0	285,4	243,1	334,6	362,5	285,4	169,8	475,6	306,6	446,4	465,8	498,0
15:00	498,0	243,1	285,4	390,5	390,5	306,6	200,7	495,0	306,6	456,1	465,8	496,0
16:00	495,0	243,1	185,3	390,5	334,6	264,2	185,3	485,3	362,5	456,1	418,4	495,0
17:00	498,0	185,3	185,3	334,6	418,4	221,9	221,9	465,8	334,6	446,4	390,5	485,3
18:00	500,0	169,8	185,3	264,2	446,4	243,1	200,7	465,8	285,4	418,4	362,5	496,0
19:00	475,6	221,9	200,7	285,4	456,1	306,6	200,7	446,4	185,3	285,4	285,4	496,0
20:00	465,8	221,9	200,7	243,1	485,3	334,6	200,7	456,1	200,7	306,6	264,2	465,8
21:00	264,2	243,1	200,7	306,6	446,4	418,4	185,3	446,4	221,9	243,1	221,9	495,0
22:00	334,6	243,1	200,7	390,5	456,1	418,4	221,9	418,4	264,2	306,6	154,4	497,0
23:00	334,6	221,9	138,9	285,4	390,5	390,5	200,7	362,5	285,4	306,6	285,4	485,3

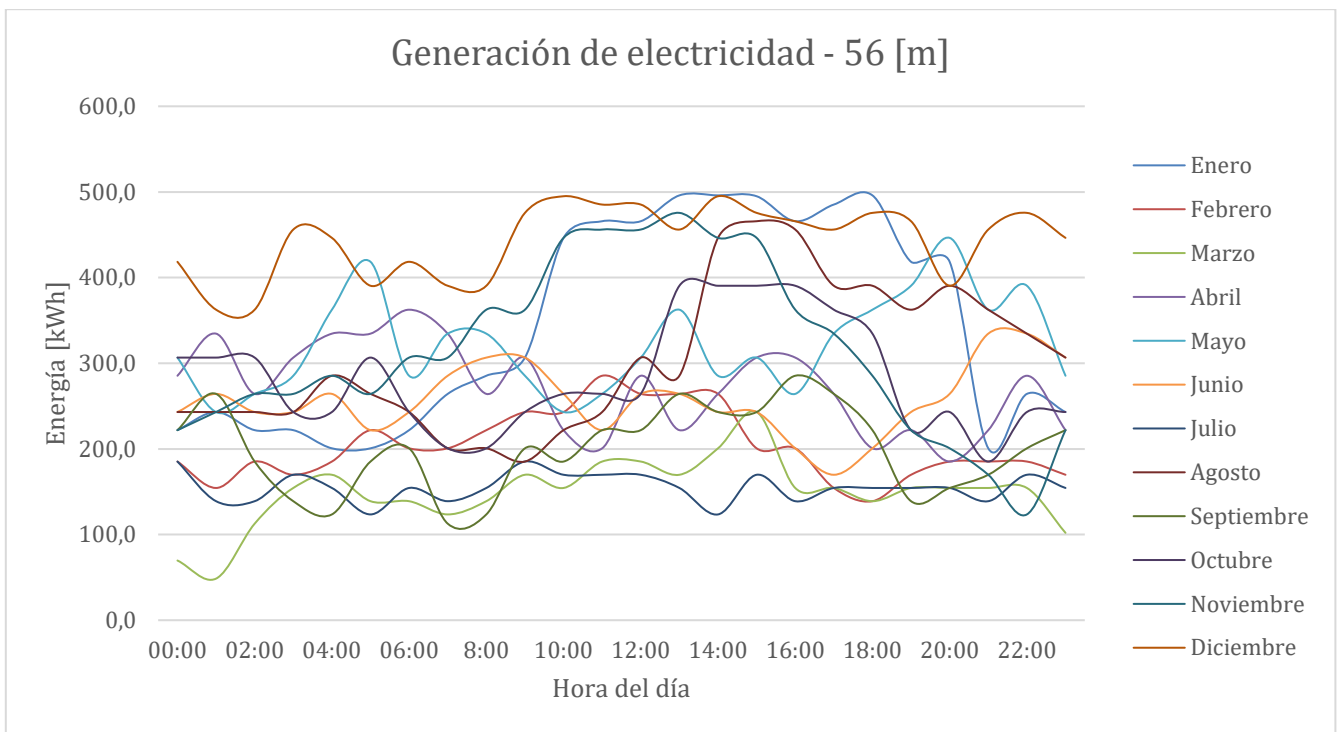


Imagen del anexo 1 generación de un día típico mensual eólico en la UMAG

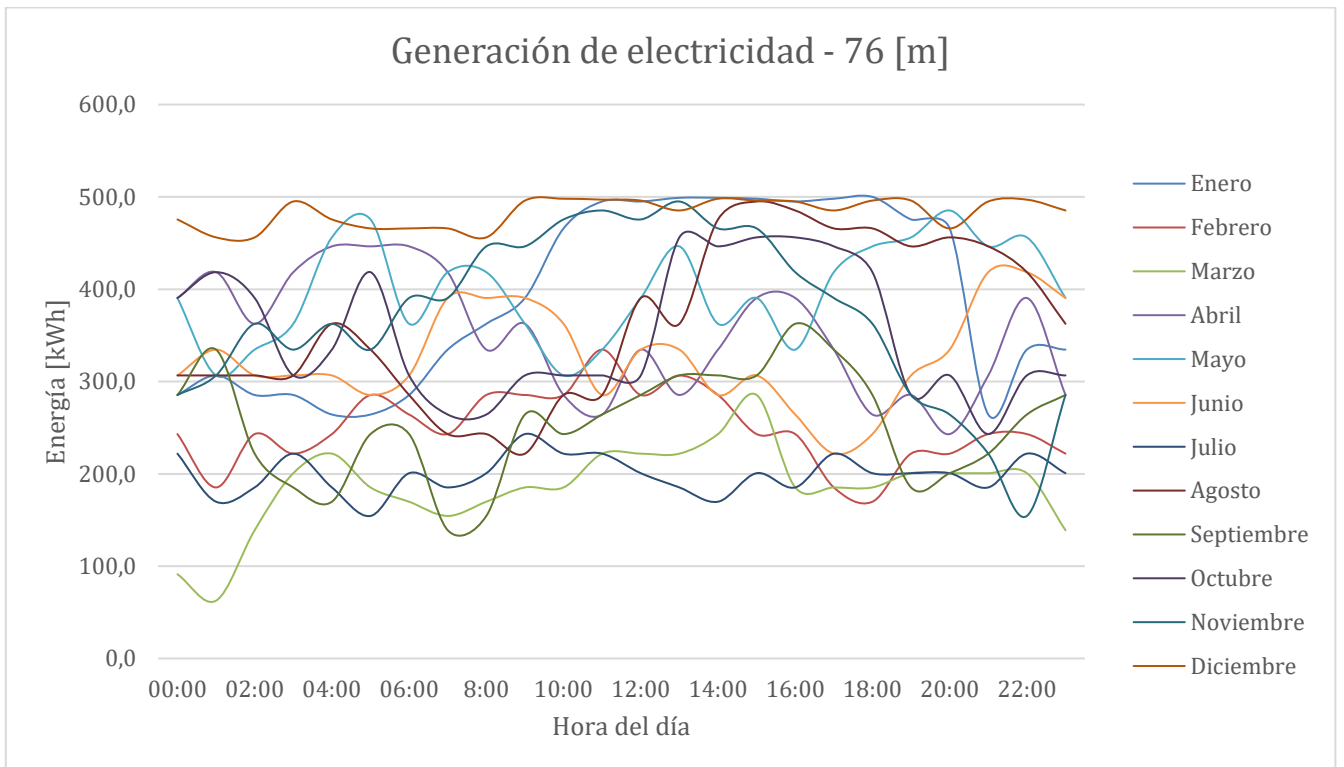
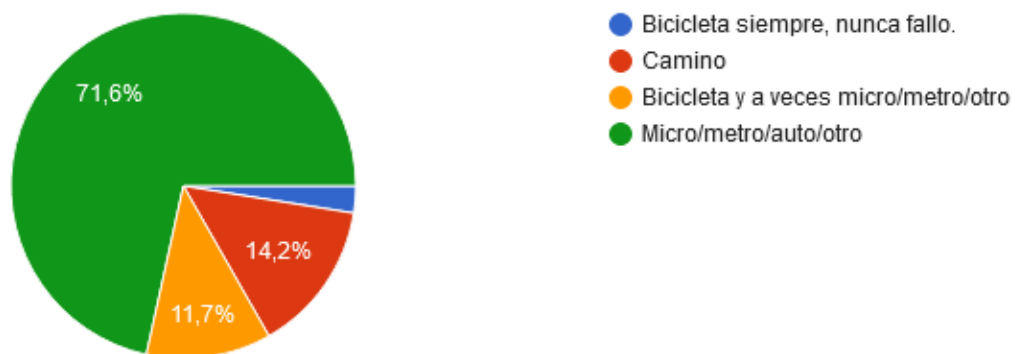


Imagen del anexo 2 generación de un día típico mensual eólico en la UMAG

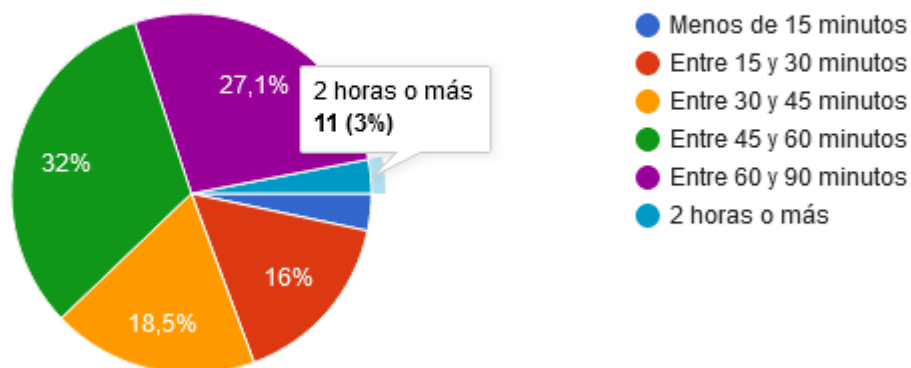
## Anexo C: Docencia remota

En la encuesta realizada se hizo una serie de preguntas relacionadas con las condiciones de transporte del alumnado y (principalmente) comodidad/preferencia de la docencia online en un semestre tal que se tenga principalmente docencia presencial. Las preguntas y respuestas principales se muestran en los gráficos siguientes.

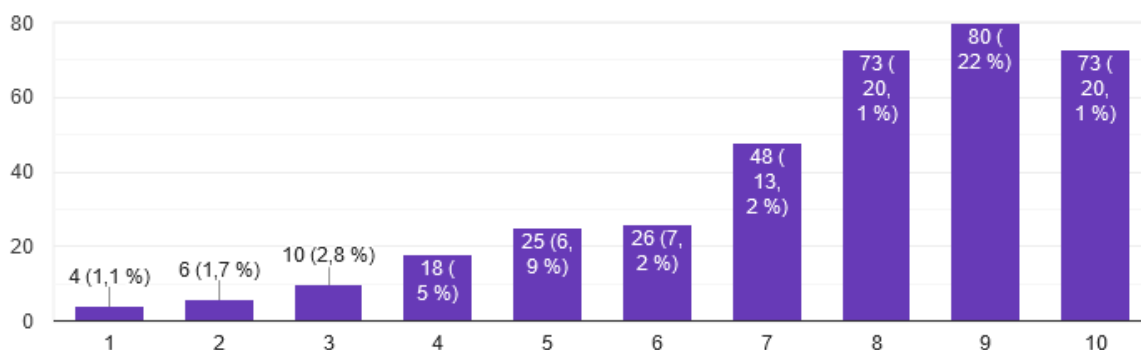
¿Cómo te movilizas a la Facultad?



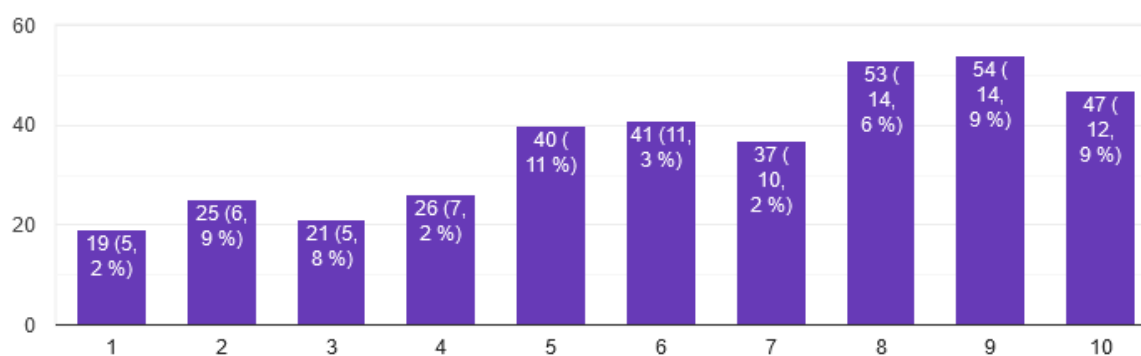
Cuánto te demoras en llegar desde tu residencia a la Facultad



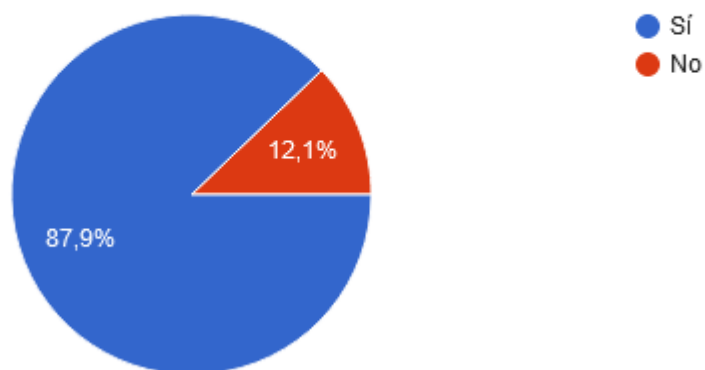
En una escala del 1 al 10, ¿qué tanto asistirías a tus clases (de cátedra y auxiliares) en años normales, o qué tanto crees que asistirías si eres mechnón?



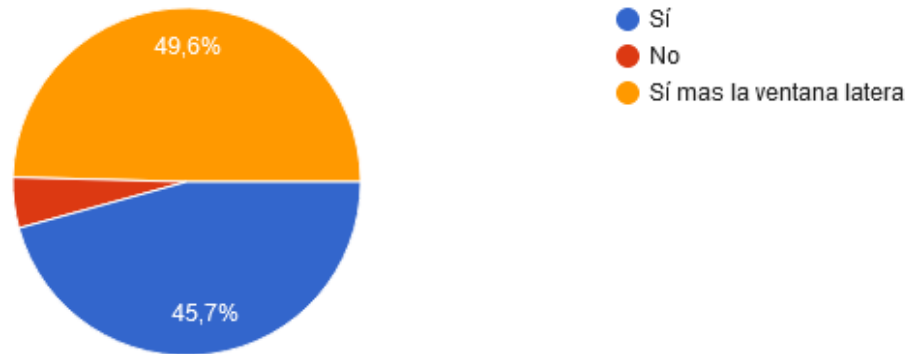
En una escala del 1 al 10, ¿qué tanto asistes a tus clases en modalidad online?



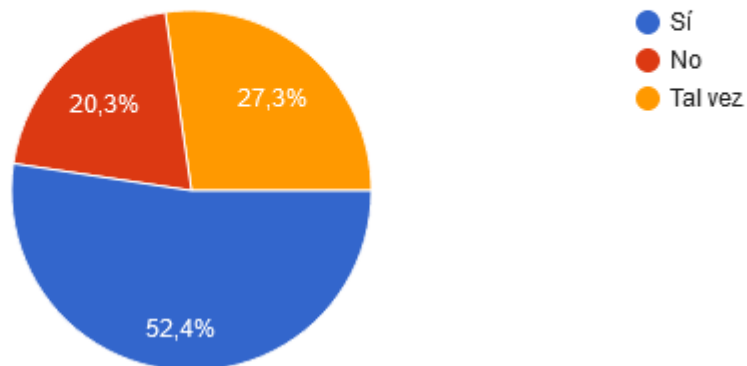
¿Has tenido semestres en que algún día de la semana tienes una sola clase?



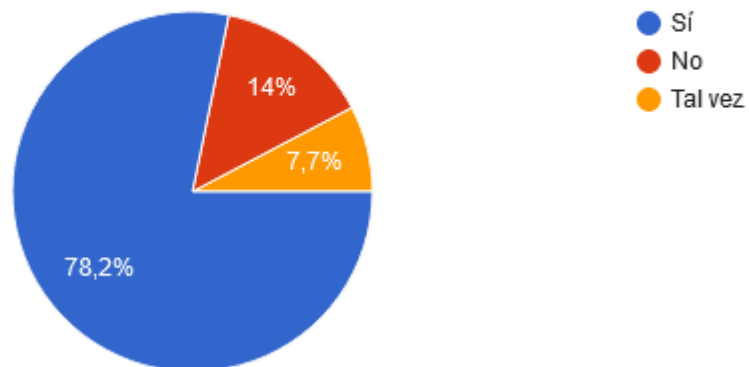
¿Has tenido semestres en que algún día de la semana tienes dos clases? ¿en particular, con una ventana entre ellas?



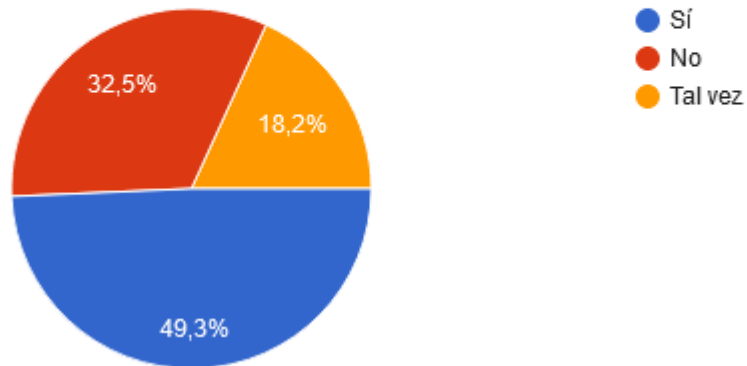
¿Esto te ha desincentivado a asistir ese día completo?



¿Has tenido ventanas extremadamente largas? (a tu criterio)



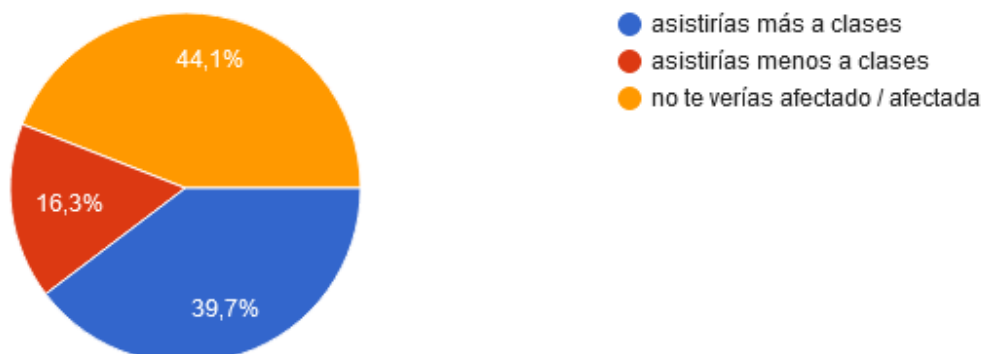
¿Las ventanas extremadamente largas te han desincentivado de asistir a la Facultad? ¿lo harían si no has tenido?



Si en esos semestres con ventanas extremadamente largas, hubieras tenido la opción de asistir a distancia, tú...

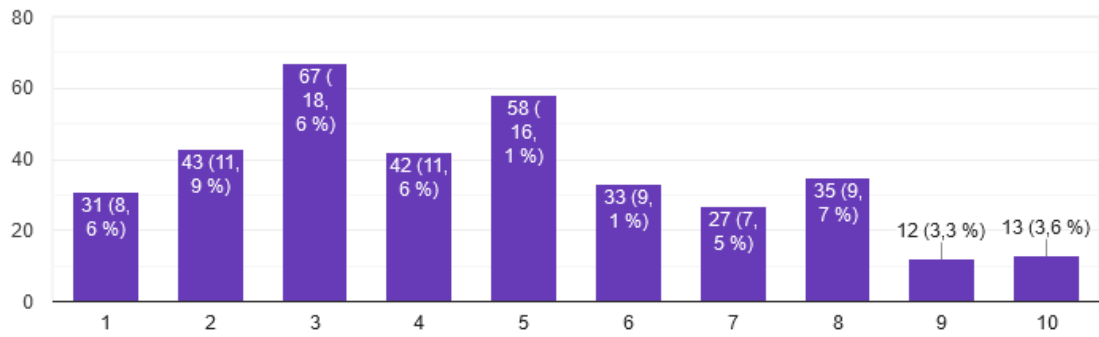


En un año normal, y si tuvieras la opción de poder asistir a tus clases por videollamada, tú...





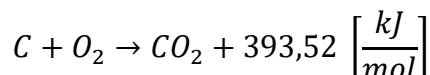
En una escala del 1 al 10, ¿qué tanto desincentivaría tu ida a la Facultad el poder tomar tus clases de manera remota?



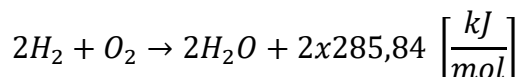
## Anexo D: Cálculo de energía liberada por las calderas

Para calcular la energía liberada por las calderas en la UMAG se debe considerar la quema del combustible (gas natural) comprado. Para esto, se sigue el procedimiento mostrado a continuación.

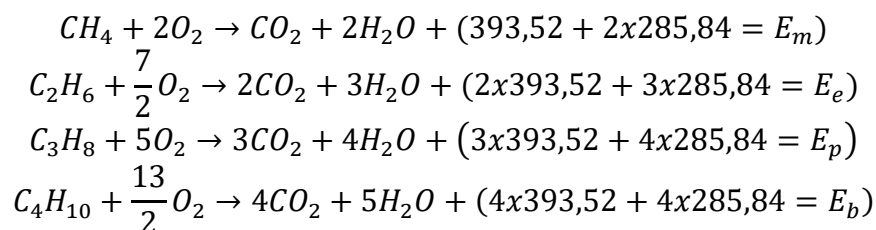
- Combustión del carbono



- Combustión del hidrógeno



Si aplicamos las dos ecuaciones mostradas con los gases constituyentes del Gas Natural se obtienen las siguientes fórmulas.



Como se sabe cuántos kilogramos de  $CO_{2e}$  emitieron las calderas en un año, se puede saber cuánta energía fue emitida con el siguiente procedimiento.

$$total \ de \ emisiones = 1.762.680 \ [kgCO_2]$$

Como la masa molar del  $CO_2$  es 44 [g/mol], se necesitarían 40.060.909,09 mol de  $CO_2$ . Ahora bien, se sabe que con un mol de sustancia se tiene la siguiente cantidad de  $CO_2$ .

$$\frac{941}{1000} + 2x \frac{43}{1000} + 3x \frac{9}{1000} + 4x \frac{7}{1000} = 1,082$$

Así que, para obtener la cantidad de energía generada por las calderas se usa la fórmula siguiente y se multiplica por la cantidad de mol.

$$x \rightarrow CO_2 + \frac{1}{1,082} * \left( \frac{941}{1000} xE_m + \frac{43}{1000} xE_e + \frac{9}{1000} xE_p + \frac{7}{1000} xE_b \right)$$

$$x \rightarrow CO_2 + 943,53 \text{ kJ}$$

Por lo tanto, la energía liberada es de 37.798.967.974 kJ = 10.499.713 kWh

## Anexo E: Cálculos de tarifa

Para hacer el cálculo de la conveniencia de la tarifa se toman las boletas de consumo 12 meses, datos facilitados por personal de la UMAG, los que se ven en la tabla del anexo 6, donde los consumos se muestran en pesos chilenos y corresponden a consumos del 2018.

Tabla del anexo 6 boletas de energía al número de cliente 4514969

N° Cliente	N° Medidor	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
4514969	80074837	7.922.400	7.179.500	5.589.600	7.880.500	8.970.500	9.680.800
		Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Noviembre	Diciembre
		7.587.200	6.431.000	7.860.100	8.478.900	8.903.200	9.246.800
Total		95.730.500					

Teniendo esto en consideración, se miran las lecturas del medidor, también proporcionadas por personal de la Universidad, que marcan lo que se muestra en la tabla del anexo 7.

Tabla del anexo 7 lecturas del medidor número 80074837

Fecha lectura	Demanda máxima [kW]	Energía leída [kWh]
Enero 2018	220,68	34 358
Febrero 2018	123,8	34 479
Marzo 2018	257,04	34 704
Abril 2018	296,64	34 978
Mayo 2018	293,76	35 282
Junio 2018	293,40	35 493
Julio 2018	101,16	35 651
Agosto 2018	280,08	35 874
Septiembre 2018	260,64	36 123
Octubre 2018	267,84	36 373
Noviembre 2018	236,88	36 625
Diciembre 2018	241,56	36 871

Al ver la tabla, se nota una inconsistencia inmediatamente, ya que (y tomando el mes de febrero como ejemplo) se ve una demanda máxima de 123,8 kW, mientras que la energía consumida en el período sería 121 [kWh]. Es decir, si todo el tiempo que funcionó hubiese estado funcionando a la potencia medida, habría tenido que estar el consumo por menos de una hora. Es por esto que se procede a calcular la energía consumida.

Para comenzar, se sabe que la tarifa que se cobra en este medidor (AT3), cobra por energía, potencia en punta y potencia fuera de punta, los que tienen cada uno un distinto precio. En la tabla del anexo 8 se muestra un resumen de los pliegos tarifarios de EDELMAG en 2018 para la tarifa AT3.

Tabla del anexo 8 pliegos tarifarios en EDELMAG para 2018

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Cargo por energía [\$/kWh]	61,674	61,674	61,674	61,674	62,777	62,777
Cargo por potencia presente en punta [\$/kW]	9.774,0	9.780,6	9.747,5	9.709,6	9.575,0	9.578,4
Cargo por potencia parcialmente en punta [\$/kW]	7.063,0	7.067,7	7.044,0	7.017,0	6.919,1	6.921,5
Cargo por servicio público [\$/kWh]	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
Cargo fijo [\$]	1642,49	1644,89	1652,52	1653,22	1656,61	1661,84
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Cargo por energía [\$/kWh]	62,777	62,777	62,777	62,722	64,864	64,864
Cargo por potencia presente en punta [\$/kW]	9.651,9	9.670,1	9.868,9	11.082,7	11.625,1	11.628,1
Cargo por potencia parcialmente en punta [\$/kW]	6.974,0	6.987,0	7.129,0	7.996,0	8.389,0	8.391,1
Cargo por servicio público [\$/kWh]	0,023	0,023	0,023	0,023	0,019	0,392
Cargo fijo [\$]	1666,5	1668,19	1674,13	1651,29	1656,99	1662,97

Con estos valores de energía, potencia y otros se puede estimar la energía consumida en la UMAG, según los niveles de potencia leídos y lo visto que se pagó en las boletas. Cabe destacar que no se sabe si la potencia declarada fue consumida en horario *peak* o *valle* por lo que se tomará un caso pesimista para el cambio de tarifa (consumo completamente en horas *off peak*) y en un escenario positivo para el cambio de tarifa (consumo completamente en horas *peak*). Los niveles de energía consumida calculados se muestran en la tabla del anexo 9.

Tabla del anexo 9 energía calculada consumida en la UMAG para cálculo de tarifa AT4.3

Mes	Energía (potencia en <i>peak</i> ) [kWh]	Energía (potencia <i>off peak</i> ) [kWh]
Enero	79.048,48	92.744,59
Febrero	66.970,50	80.676,21
Marzo	41.357,85	55.016,06
Abril	78.694,13	92.297,28
Mayo	95.342,81	108.524,80
Junio	105.733,52	119.826,78
Julio	72.925,94	86.217,12
Agosto	54.417,77	67.734,76
Septiembre	76.196,00	89.794,90
Octubre	80.098,94	95.432,54
Noviembre	81.390,37	96.935,27
Diciembre	86.678,71	102.221,94

Ahora, al calcular lo que se habría pagado en 2018 al tener una tarifa AT4.3, se tienen los resultados mostrados en la tabla del anexo 10.

Tabla del anexo 10 pagos con tarifa AT4.3 con la energía calculada

Mes	Pagos por electricidad [clp] Caso potencia en punta	Pagos por electricidad [clp] Caso fuera de punta
Enero	7.196.958	8.041.966
Febrero	5.326.786	6.172.386
Marzo	5.257.900	6.100.571
Abril	7.806.912	8.646.185
Mayo	8.922.898	9.750.727
Junio	9.676.752	10.561.808
Julio	7.517.420	8.352.106
Agosto	6.253.660	7.089.966
Septiembre	7.622.010	8.476.020
Octubre	8.121.125	9.083.232
Noviembre	7.931.452	8.940.051
Diciembre	8.593.608	9.608.288
Total	81.633.872	91.215.020
Comparación con el caso base	Ahorro de un 15%	Ahorro de un 5%

En el texto principal se habla del cálculo de ahorro en los años 2019 y 2020, para los que no se especificará los cálculos, ya que siguen la misma metodología recién señalada, con los pliegos tarifarios respectivos. Se usa los mismos valores de energía y potencia porque se asume que la Universidad tendrá consumos similares, al menos en proporciones a los tenidos el 2018. Además el año 2019 y el 2020 fueron años viciados (por temas sociales y sanitarios), lo que afectó de una manera desconocida el consumo de energía eléctrica en el campus.