



TESIS DOCTORAL

METODOLOGÍA PARA GESTIÓN DINÁMICA DE CAPACIDAD EN LÍNEAS AÉREAS DE ALTA TENSIÓN BASADA EN MÚLTIPLES MEDIDAS DISCRETAS DE CONDICIONES AMBIENTALES

RAQUEL MARTÍNEZ TORRE DIRECTOR DE LA TESIS - MARIO MAÑANA CANTELI

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

TESIS DOCTORAL

Metodología para gestión dinámica de capacidad en líneas aéreas de alta tensión basada en múltiples medidas discretas de condiciones ambientales

Methodology for dynamic capacity management in high voltage overhead lines based on multiple discrete measures of environmental conditions

Autor: Raquel Martínez Torre Director: Dr. Mario Mañana Canteli

Tesis presentada en cumplimiento de los requisitos para la obtención del grado de Doctora en Ingeniería Industrial

 $en \ el$

Grupo de Tecnologías Electro-Energéticas Avanzadas Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

6 de junio de 2016

D. Mario Mañana Canteli, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria,

DECLARA

Que el presente trabajo titulado "Metodología para gestión dinámica de capacidad en líneas aéreas de alta tensión basada en múltiples medidas discretas de condiciones ambientales", presentado por Dña. Raquel Martínez Torre para optar al grado de Doctor, ha sido realizado bajo mi dirección. Considero que dicho trabajo se encuentra terminado y reúne los requisitos para su presentación como Memoria de Doctorado al objeto de poder optar al Grado de Doctor por la Universidad de Cantabria.

Y para que conste y surta los efectos oportunos, firmo la presente declaración en Santander, a 6 de Junio de 2016.

Dr. Mario Mañana Canteli

 ${\rm \ll}Siento$ una enorme gratitud por todos los que me dijeron "No". Gracias a ellos, lo hice yo mismo.»

Albert Einstein. Científico alemán.

Resumen

Esta tesis desarrolla una metodología para la mejora en la implantación de sistemas de gestión dinámica de las líneas aéreas de alta tensión en tiempo real y a corto plazo basada en la medida puntual de las condiciones ambientales. Los sistemas actuales cuentan con debilidades que hacen complicada e ineficiente la operación basada en la gestión dinámica. Esta tesis trata de reforzar esas debilidades. En primer lugar, se crea una metodología para el emplazamiento más adecuado de los sensores necesarios para la gestión dinámica. A continuación, se estudian las desviaciones en los cálculos de la capacidad de los conductores creando procedimientos de optimización de los cálculos. Por último, y debido a la gran necesidad de planificar la gestión dinámica a corto plazo, se plantea un sistema de predicción de las variables meteorológicas y de predicción directa de la capacidad de las líneas. Todos los procedimientos se aplicarán a una línea de alta tensión existente.

Abstract

This Thesis develops a methodology to improve the implementation of dynamic management systems of overhead transmission lines in real time and in the short term. This methodology are based on multiple measures of environmental conditions. Current systems have weaknesses that complicate and make inefficient the dynamic explotation. The aim of this Thesis is to address existing weaknesses. Firstly, a methodology to achieve a suitable location of the sensors is created. In a further step, deviations in calculations of capacity of the conductors are studied to obtain procedures for the optimitation of the schort time, a forecasting system of environmental conditions and of direct capacity of the lines is raised. The different procedures are applied to a real case line.

Agradecimientos

El comienzo de esta tesis vino motivado por el proyecto DYNELEC, del que formé parte como investigadora de la Universidad de Cantabria. El éxito de este proyecto se debió, en gran medida, al apoyo y confianza que, desde el equipo de Viesgo, tuvieron en el grupo de la Universidad de Cantabria, destacando la labor de Antonio González, que yendo más allá de la de responsable técnico del proyecto, nos motivó para ser personas proactivas y consiguió su industrialización.

Ni el proyecto, ni por supuesto la tesis, hubiera sido posible sin mis compañeros de laboratorio, Rodrigo Domingo, Alberto Sierra y Alberto Laso, que aparte de su inestimable ayuda en la parte técnica, han creado un ambiente de trabajo ideal.

La mención más especial en los agradecimientos es para Mario Mañana, mi director de tesis, trabajador incansable y una inspiración para todos. Sin su dirección, tanto en la tesis como en los proyectos, los resultados obtenidos no hubieran sido posibles. Gracias por motivarme y ayudarme en cada paso que he dado.

Gracias a mi familia y amigos, porque hacen que mi felicidad se refleje en todas las facetas de mi vida.

Por último y no menos importante, gracias a Miguel porque él es la razón de todo.

Índice general

Re	Resumen V.			VII	
Ín	dice	de figu	Iras	xv	
Ín	dice	de tab	las	xvII	
Al	brevi	aturas		XIX	
1.	Intr	oducci	ón y objetivos de la tesis	1	
	1.1.	Introd	ucción a la gestión de las líneas eléctricas de alta tensión	1	
		1.1.1.	Integración de energías renovables	1	
			Escenario actual de las energías renovables	1	
			Gestión de las líneas eléctricas supeditada a la integración de		
			energías renovables	2	
		1.1.2.	Ampacidad	5	
	1.2.	Objeti	vos de la tesis	6	
	1.3.	Estruc	tura de la tesis	7	
2.	Esta	ado del	l arte	9	
	2.1.	Gestió	n dinámica de líneas eléctricas aéreas de alta tensión	9	
	2.2.	Herran	nientas de gestión dinámica a corto plazo	12	
		2.2.1.	Modelos de predicción atmosférica	12	
		2.2.2.	Modelos de predicción basados en series temporales	15	
			Modelado Univariante: Modelos ARIMA	16	
			Modelos basados en redes neuronales	19	
		2.2.3.	Conclusiones	21	
3.	Alg	oritmo	s de cálculo de ampacidad	23	
	3.1.	Introd	ucción	23	
	3.2.	CIGRI	Ξ	23	
		3.2.1.	Nomenclatura	24	
		3.2.2.	Equilibrio térmico	26	
		3.2.3.	Calentamiento por intensidad	26	
		3.2.4.	Calentamiento por radiación solar	27	
		3.2.5.	Distribución de la temperatura del conductor	28	
		3.2.6.	Refrigeración por convección	29	
		3.2.7.	Refrigeración por radiación	31	
		3.2.8.	Estado no estacionario	32	
	3.3.	IEEE .		32	

		$\begin{array}{c} 3.3.1.\\ 3.3.2.\\ 3.3.3.\\ 3.3.4.\\ 3.3.5.\\ 3.3.6.\\ 3.3.7. \end{array}$	NomenclaturaEquilibrio térmicoCalentamiento por intensidadCalentamiento por radiación solarRefrigeración por convecciónRefrigeración por radiaciónEstado no estacionario	32 33 34 34 36 37 37
4.	Esce 4.1. 4.2.	e nario Definio Creaci	práctico y gestión de datos ción del escenario práctico ón de una base de datos relacional	39 39 40
5.	Met	odolog	gía y análisis del emplazamiento de los sensores	41
	5.1.	Introd	ucción	41
	5.2.	Metod	ología de elección del emplazamiento óptimo de los sensores	41
		5.2.1.	Consideraciones previas	41
		5.2.2.	Análisis de sensibilidad de los parámetros meteorológicos en los procedimientos de cálculo del comportamiento térmico de los	49
			conductores	43
			Analisis de sensibilidad de la temperatura ambiente	40
			Conclusiones	44
		523	Estudios meteorológicos estadísticos	45
		0.2.0.	Análisis estadístico de las variables meteorológicas	45
			Análisis del viento efectivo	46
			Análisis de las rosas de los vientos	49
			Estudio de la criticidad de las estaciones meteorológicas respecto a cada una de las variables	50
		5.2.4.	Estudio de la temperatura del conductor a lo largo de la línea .	50
			Criticidad de las secciones respecto a la temperatura del conductor	50
			Relación entre los cambios de temperatura del conductor y la	
			dirección de la línea	51
		5.2.5.	Comparativa entre resultados meteorológicos y de temperatura	
			del conductor	51
	5.3.	Result	ados de la aplicación de la metodología a la línea de estudio	51
		5.3.1.	Análisis de sensibilidad de los parámetros meteorológicos en los	
			procedimientos de cálculo del comportamiento térmico de los	50
			conductores	52
			Analisis de sensibilidad del viento efectivo	- 52 E 4
			Analisis de sensionidad de la temperatura ambiente	-04 55
		532	Estudios meteorológicos estadísticos	- 55 - 55
		0.0.4.	Análisis estadístico de las variables meteorológicas	56
			Análisis del viento efectivo	58
			Análisis de las rosas de los vientos	61
			Estudio de la criticidad de las estaciones meteorológicas respecto	
			a cada una de las variables	64

5.3.3. Estudio de la temperatura del conductor a lo largo de la línea. 66 Estudio de la evolución de la temperatura del conductor a lo largo de la línea 66 5.3.4. Comparativa entre resultados meteorológicos y de temperatura del conductor 68 68 6. Diseño y comparativa de los algoritmos de cálculo 69 69 6.2. Diseño y adaptación de los algoritmos de cálculo 706.3. Ensayos de emisividad 736.4. Comparativa entre los procedimientos de IEEE y CIGRE 756.5.Optimización de los algoritmos de cálculo 76766.5.2. Optimización del algoritmo de cálculo de capacidad del conductor 78 6.6. Conclusiones 81 7. Planificación de la gestión dinámica a corto plazo 83 83 7.2. Modelos de predicción atmosférica 83 7.3. Modelos de predicción basados en series temporales 84 7.3.1. Modelado ARIMA 84 7.3.2. Modelado basado en redes neuronales 84 7.4. Desarrollo de un sistema de redes neuronales para la gestión dinámica a corto plazo 85Metodología en la predicción de la capacidad dinámica de las 7.4.1. líneas eléctricas 857.4.2. Aplicación de la metodología al caso de estudio 89 89 Modelo de redes neuronales 907.4.3. Conclusiones 978. Conclusiones 99 8.1. Conclusiones 998.2. Aportaciones de la tésis 1008.3. Líneas de investigación futuras 100

Bibliografía

103

Índice de figuras

1.1.	Evolución del consumo de la energía primaria en España por fuentes de energía. Adaptado de REE [Ind13].	2
1.2.	Evolución de la producción de energía renovable en España por tecno- logía. Adaptado de REE [En14]	3
1.3.	Evolución de la potencia instalada de energías renovables en España por tecnología. Adaptado de REE [En14].	4
5.1.	Relación entre vanos y secciones.	42
5.2.	Evolución de la capacidad del conductor LA-280 con las variaciones de viento efectivo para IEEE.	52
5.3.	Evolución de la capacidad del conductor con las variaciones de viento efectivo para CIGRE.	53
5.4.	Evolución de la capacidad del conductor LA-280 con las variaciones de temperatura ambiente para IEEE.	54
5.5.	Evolución de la capacidad del conductor con las variaciones de tempe- ratura ambiente para CIGRE.	55
5.6.	Rosas de los vientos estacionales para la estación meteorológica 1.	62
5.7.	Rosas de los vientos estacionales para la estación meteorológica 2.	62
5.8.	Rosas de los vientos estacionales para la estación meteorológica 3.	63
5.9.	Rosas de los vientos estacionales para la estación meteorológica 4.	63
5.10. 5.11.	Rosas de los vientos estacionales para la estación meteorológica 5 Diagramas estacionales de la frecuencia de criticidad de cada una de las	64
5.12.	estaciones meteorológicas respecto al viento efectivo. Diagramas estacionales de la frecuencia de criticidad de cada una de las	65
	estaciones meteorológicas respecto a la temperatura ambiente	65
5.13.	Diagramas estacionales de la frecuencia de criticidad de cada una de las secciones respecto a la temperatura del conductor.	66
5.14.	Diagrama de cajas de las diferencias entre las temperaturas de secciones	
	contiguas vs. a las temperaturas en un instante aleatorio.	67
6.1.	Diagrama de flujo del sistema general de cálculo.	72
6.2.	Diagrama de flujo del sistema de cálculo de la capacidad del conductor.	72
6.3.	Diagrama de flujo del sistema de cálculo de la temperatura del conductor.	73
6.4.	Histograma de error en el cálculo de la temperatura para CIGRE e	
6.5.	IEEE en estado estacionario. Histograma de error en el cálculo de la temperatura para CIGRE e	75
	IEEE en estado no estacionario	76
6.6.	Error de cálculo de temperatura frente al viento efectivo para diferentes	
	valores de temperatura ambiente y de temperatura del conductor	77

6.7.	Error de cálculo de temperatura frente a la intensidad para diferentes valores de temperatura ambiente y de temperatura del conductor.	78
6.8.	Diagrama de flujo del proceso iterativo de obtención de las variables	
	efectivas para la optimización del cálculo de la capacidad.	79
6.9.	Histograma de la diferencia entre las variables medidas y las efectivas	
	en estado estacionario.	80
6.10.	Histograma de la diferencia entre las variables medidas y las efectivas	
	en estado no estacionario.	80
71	Diagrama del proceso de predicción de las variables meteorológicas	
1.1.	cálculo de la capacidad predicha y corrección de la misma.	88
7.2.	Diagrama del proceso de predicción de la capacidad directa y corrección	00
	de la misma.	89
7.3.	Histograma de los errores en la predicción meteorológica a 1 hora.	92
7.4.	Histograma de los errores en la capacidad predicha a 1 hora	92
7.5.	Histograma de los errores en la predicción meteorológica a 2 horas	93
7.6.	Histograma de los errores en la capacidad predicha a 2 horas	93
7.7.	Histograma de los errores en la predicción meteorológica a 6 horas.	94
7.8.	Histograma de los errores en la capacidad predicha a 6 horas.	94
7.9.	Histograma de los errores en la capacidad predicha de manera directa	
- 10	a 1 hora	96
7.10.	Histograma de los errores en la capacidad predicha de manera directa	0.0
₩ 11	a 2 horas.	96
7.11.	Histograma de los errores en la capacidad predicha de manera directa	07
	$\mathbf{a} \mathbf{v}$ noras.	- 97

Índice de tablas

2.1.	Patrones de los correlogramas.
$3.1. \\ 3.2.$	Nomenclatura de las variables asociadas al procedimiento CIGRE Coeficientes B y n para el cálculo del número de Nusselt para vientos perpendiculares
3.3.	Coeficientes para el calculo del número de Nusselt en condiciones de convección natural.
3.4.	Nomenclatura de las variables asociadas al procedimiento IEEE.
5.1.	División estacional definida en el P.O. 1.2 [Boed].
5.2.	Coeficientes B y n para el cálculo del número de Nusselt para vientos perpendiculares.
5.3.	Coeficientes para el calculo del número de Nusselt en condiciones de convección natural.
5.4.	Estadística de variables meteorológicas en primavera
5.5.	Estadística de variables meteorológicas en verano
5.6.	Estadística de variables meteorológicas en otoño.
5.7.	Estadística de variables meteorológicas en invierno
5.8.	Percentiles de vientos efectivos mínimos en primavera con el procedi- miento de Davis.
5.9.	Percentiles de vientos efectivos mínimos en primavera con el procedi- miento de Morgan.
5.10.	Percentiles de vientos efectivos mínimos en verano con el procedimiento de Davis.
5.11.	Percentiles de vientos efectivos mínimos en verano con el procedimiento de Morgan.
5.12.	Percentiles de vientos efectivos mínimos en otoño con el procedimiento de Davis
5.13.	Percentiles de vientos efectivos mínimos en otoño con el procedimiento de Morgan
5.14.	Percentiles de vientos efectivos mínimos en invierno con el procedimien- to de Davis
5.15.	Percentiles de vientos efectivos mínimos en invierno con el procedimien- to de Morgan.
6.1.	Valores de emisividad obtenidos en los ensayos.
0.2.	medida y la calculada por ambos procedimientos en estado estacionario.

6.3. 6.4.	Error cuadrático medio y coeficiente de correlación entre la temperatura medida y la calculada por ambos procedimientos en estado no estacionario. Diferencias cuadráticas medias y coeficientes de correlación entre las diferentes variables efectivas y las medidas.	76 81
7.1.	Combinación de las variables explicativas para la entrada al algoritmo de entrenamiento de redes neuronales.	86
7.2.	Error en la predicción de cada una de las redes neuronales planteadas para la temperatura ambiente.	90
7.3.	Error en la predicción de cada una de las redes neuronales planteadas para la velocidad de viento.	90
7.4.	Error en la predicción de cada una de las redes neuronales planteadas	91
7.5.	Error en la predicción de cada una de las redes neuronales planteadas	01
7.6.	para la radiación solar. Resultados de los errores de predicción en las variables meteorológicas	91
7.7.	para los diferentes horizontes de predicción. Resultados de los errores de predicción en la capacidad del conductor	95
70	para los diferentes horizontes de predicción.	95
1.0.	de manera directa para los diferentes horizontes de predicción.	97

XVIII

Abreviaturas

CIGRE	The Council on Large Electric Systems
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
\mathbf{REE}	Red Eléctrica de España
\mathbf{SMT}	Sensor de Medida de Temperatura
\mathbf{SAW}	Surface Acoustic Wave
\mathbf{DTS}	Distributed temperature Sensing
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model
\mathbf{GFS}	Global Forecast System
${f Met}{f U}{f M}$	Met Office Unified Model
GEM	The Global Environmental Multiscale Model
$\mathbf{MM5}$	Mesoscale Model 5
\mathbf{NWS}	National Weather Services
\mathbf{AR}	Autorregresive
$\mathbf{M}\mathbf{A}$	Moving Averages
\mathbf{ARMA}	Autoregressive Moving Averages
\mathbf{SARMA}	Seasonal Autoregressive Moving Averages
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Averages
SARIMA	Seasonal Autoregressive Integrated Moving Averages
\mathbf{ECAR}	East Central Area Reliability Council

A mi tía Merce, que sé que estaría orgullosa de mí...

Capítulo 1

Introducción y objetivos de la tesis

1.1. Introducción a la gestión de las líneas eléctricas de alta tensión

1.1.1. Integración de energías renovables

Escenario actual de las energías renovables

El consumo de energía en España en los últimos años está evolucionando hacia un sistema más heterogéneo y equilibrado con un aumento de la participación de las energías renovables. La demanda energética ha sido creciente hasta el año 2004. A partir de ahí, ha descendido, motivada en un principio, por la caída de la demanda de los productos petrolíferos y el carbón y, a partir de 2008, por la situación económica. El descenso en la demanda de las fuentes energéticas convencionales ha sido parcialmente compensado por el aumento de las energías renovables, aproximadamente un 7,5 % en 2013 (un 14,2 % de la cobertura nacional). Dentro de este aumento de las energías renovables destaca un incremento del 79 % en la energía hidráulica debido a un año con elevada hidraulicidad. En cuanto a la solar y la eólica, los aumentos son del 18,5 % y 12,7 %, respectivamente. Al contrario, la biomasa, el biogás y los biocarburantes descendieron en sus demandas. En la figura 1.1 se observa la evolución del consumo de energía en España en los últimos años dividido en tipos de fuentes de energía.

Centrando la atención en la energía eólica, ésta supone la mitad de la producción bruta debida a fuentes renovables, convirtiéndose en la tercera tecnología en España en 2013 por detrás del gas natural y prácticamente igualada con la nuclear. En términos de potencia instalada España es la cuarta potencia mundial tras China, Estados Unidos y Alemania con una potencia de 22.949 MW. En la figura 1.2 se observa la evolución en la producción de energía renovable en España por tecnología.

El crecimiento de las energías renovables está intimamente ligado a cuestiones políticas. En varios países de Europa las subvenciones e inversiones en proyectos de energías renovables han sido reducidas considerablemente debido a la situación económica, por lo que el crecimiento ha sufrido una desaceleración.

Pese a esta leve desaceleración, el crecimiento de las energías renovables en España sigue su curso. En el caso de la energía eólica, la instalación de este tipo de plantas viene supeditada a las infraestructuras de la zona donde se instala. Actualmente se hacen



FIGURA 1.1: Evolución del consumo de la energía primaria en España por fuentes de energía. Adaptado de REE [Ind13].

necesarias grandes inversiones en las infraestructuras para poder adecuarse al aumento de las instalaciones renovables. Red Eléctrica de España (REE) ha realizado inversiones de aproximadamente 564 millones de euros en labores de mejoras y adecuación de la red, un 19,1 % inferior al año anterior. Este descenso se debe tanto a la situación económica y las restricciones medioambientales como a los esfuerzos en investigación para la búsqueda de soluciones alternativas más económicas que las tradicionales. En la figura 1.3 se representa la evolución de la potencia renovable instalada en España por tecnología.

Gestión de las líneas eléctricas supeditada a la integración de energías renovables

La situación económica y las restricciones, tanto legales como medioambientales, dificultan la creación de nuevas líneas eléctricas, de manera que las nuevas plantas deberán integrarse en la infraestructura existente.

La infraestructura existente a menudo puede ser insuficiente para la capacidad de generación, de manera que en numerosas ocasiones se deben plantear restricciones que limiten la generación para evitar saturar las líneas eléctricas, dimensionadas para solicitaciones más bajas. Las causas por las que se pueden plantear restricciones se describen a continuación.

En el procedimiento de operación P.O. 12.1 "Solicitudes de acceso para la conexión de nuevas instalaciones a la red de transporte" [Boeb], se establece que:

"El derecho de acceso sólo podrá ser restringido por falta de capacidad necesaria, cuya justificación se deberá exclusivamente a criterios de seguridad, regularidad o calidad del suministro."

Se describen, en el P.O. 3.7 "Programación de la generación de origen renovable no gestionable" [Boec], las causas que pueden obligar a reducir la producción:

 Congestión en la evacuación de generación. Aparición de sobrecargas inadmisibles en la red debidas a un exceso de producción que imposibilita la evacuación de la energía.



FIGURA 1.2: Evolución de la producción de energía renovable en España por tecnología. Adaptado de REE [En14]

- Estabilidad. Son problemas relativos a las inestabilidades producidas por huecos de tensión.
- Potencia de cortocircuito. Pueden existir momentos en que en algún nudo de la red de transporte el valor de potencia de cortocircuito ponga en riesgo la seguridad del sistema.
- Viabilidad de los balances de potencias. Teniendo en cuenta el escenario de operación y los límites técnicos, el operador debe garantizar el balance entre potencia activa y reactiva para cubrir la demanda.
- Excedentes de generación no integrables en el sistema. Cuando exista un desequilibrio entre la demanda prevista y la generación en unidades no gestionables.

Existen dos aspectos principales que afectan a la integración de las energías renovables en el sistema y que engloban las causas descritas por el P.O. 3.7 [Boec]. Por un lado, las capacidades máximas establecidas en las líneas eléctricas; congestión en la evacuación de generación y, por el otro, la prioridad en el despacho eléctrico en situaciones excepcionales; estabilidad, potencia de cortocircuito, viabilidad de los balances de potencias y excedentes de generación no integrables en el sistema.

Las líneas eléctricas, en la actualidad, poseen un límite¹ estático bastante restrictivo, por lo que la instalación de nuevas plantas hace que la mayoría de las líneas operen muy cerca de su límite estático. El cálculo de este límite se realiza a través de unos

 $^{^1\}mathrm{Existe}$ el término anglosajón "rating" extendido en el sector eléctrico para definir este tipo de límites.



FIGURA 1.3: Evolución de la potencia instalada de energías renovables en España por tecnología. Adaptado de REE [En14].

valores establecidos de viento, radiación y temperatura ambiente. Estos valores generalmente son muy restrictivos para permitir la operación con los mayores márgenes de seguridad, obteniendo un sistema muy seguro pero ineficiente.

Red Eléctrica de España (REE) establece un procedimiento de operación, P.O. 1.2 "Niveles admisibles carga red" [Boed], para la obtención de los niveles máximos de carga de la red. En él se establecen tanto los periodos de meses que forman los distintos límites térmicos estacionales como la metodología de cálculo de los límites.

Esta metodología combina varios modelos. Un modelo térmico de la aparamenta, en el que se tienen en cuenta las ecuaciones de comportamiento térmico de la misma, los valores estadísticos históricos de temperatura y la temperatura máxima admisible de la aparamenta. De la misma manera, se establece un modelo térmico de comportamiento de los conductores, los valores estadísticos históricos de la temperatura, la temperatura máxima admisible de los conductores y la radiación solar media del mes. Se establece una velocidad de viento efectivo de 0,6 m/s. Otro modelo térmico es el de los transformadores que se establece en la norma UNE-20-110-75 "Guía de carga para los transformadores en aceite" [AEN10]. Como resultado de este proceso se obtienen los límites térmicos estacionales.

Como consecuencia de los valores conservadores obtenidos en el proceso, el sistema aunque seguro es ineficiente. Debido a esta ineficiencia, en ocasiones los operadores de red deben aplicar restricciones a los generadores eólicos, llegando en algunos casos a generar vertidos de renovables.

La generación en régimen especial, en concreto la renovable, tiene prioridad por reglamentación tanto europea como española en el despacho eléctrico [Boea]. Aunque teóricamente es posible darle prioridad, existen una serie de limitaciones técnicas, descritas en el P.O. 3.7 [Boec].

Las energías de régimen especial, debido a su carácter fluctuante y no gestionable, son apartadas del despacho cuando la diferencia entre la demanda y la generación necesaria por seguridad no es suficiente para integrarlas. En ese momento se produce un vertido de renovables, que plantea además de un problema ético, un problema de ineficiencia del sistema, es decir, que teniendo la posibilidad de generar electricidad a través de tecnologías "verdes" se pierde ese potencial debido a las características del sistema y a las deficiencias de la infraestructura.

En 2010 los vertidos de renovables producidos por incapacidad de integración fue de un 0,5 % del recurso eólico y, debido a las restricciones de la red de transporte o de distribución, un 0,3 %. Red Eléctrica Española (REE) ha realizado estudios de estimación de vertidos en diferentes horizontes en los que se espera que aumente progresivamente.

Los vertidos de renovables no podrán ser erradicados completamente, pero con diferentes actuaciones podrán reducirse en gran medida. Para actuar en el 0,3 % debido a las restricciones de la red, una de las soluciones más adecuadas es el aumento de capacidad de las líneas eléctricas a través de la gestión dinámica de las mismas.

Esta solución no solo pasa por la gestión dinámica de las redes eléctricas en tiempo real, sino que abre la puerta a la posibilidad de que, como ocurre en la previsión de generación eólica, se pueda predecir la capacidad de las líneas en diferentes horizontes temporales para que, junto con la predicción de generación eólica, se pueda realizar un plan de operación más fiable.

Por lo tanto, desarrollando sistemas que eviten las restricciones por alguno de los criterios descritos en el P.O. 3.7 [Boec], se mejorará la eficiencia del sistema eléctrico. En el caso de estudio, la gestión adecuada de la capacidad de las líneas eléctricas permite minimizar la ocurrencia de restricciones por el criterio de seguridad debido a sobrecargas de la red.

1.1.2. Ampacidad

Como se ha comentado anteriormente, las líneas eléctricas en la actualidad se operan con un límite máximo de intensidad establecido por unos límites estáticos. Estos límites son obtenidos a través de procedimientos de cálculo en los que se supone una situación muy desfavorable, es decir, alta temperatura ambiente, viento bajo y alta radiación solar. De esta manera, y siendo muy conservadores, se obtienen unos límites que aportan al sistema gran seguridad. Estas condiciones desfavorables no se cumplen en la gran mayoría de las ocasiones, dependiendo de la ubicación de las líneas.

Definiendo la ampacidad como la intensidad máxima que puede transportar un conductor de manera continua sin sufrir daños, es intuitivo pensar que si esta ampacidad depende de las condiciones meteorológicas, conociéndolas se puede obtener el nivel de ampacidad en cada instante. En estos términos, y sabiendo que las condiciones meteorológicas en la gran mayoría de los casos van a ser más favorables que las establecidas para el cálculo del límite estático, se obtendrá una mayor capacidad de transporte en el conductor gestionándolo dinámicamente.

Los operadores necesitan de un conocimiento instantáneo del estado de la red, para poder operar con seguridad y eficiencia. La planificación en los centros de control de las empresas distribuidoras es una parte muy importante del trabajo. De la misma manera que en la generación eólica, es importante predecir el recurso eólico para planificar tanto el despacho energético como las posibles restricciones por capacidad de la red. Para los operadores de la red es necesario conocer el nivel de ampacidad en un futuro a corto plazo para poder operar de manera segura la red conociendo las predicciones futuras de generación.

Este tipo de soluciones, además de mejoras para los operadores de red, suponen un avance para los gestores de las plantas eólicas, ya que con la gestión dinámica de la red se prevén muchas menos restricciones y un consiguiente aumento de la potencia a generar.

1.2. Objetivos de la tesis

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de diferentes herramientas para la mejora de la gestión dinámica de las líneas aéreas de alta tensión. Actualmente, las principales ineficiencias del sistema de gestión dinámica de las líneas eléctricas son la falta de metodología en la instalación y las necesidades de sensores en el sistema, la desviación de los resultados de capacidad frente a la realidad y la imposibilidad de realizar una planificación de la gestión dinámica a corto plazo.

En primer lugar, se creará una metodología para el emplazamiento óptimo de los sensores y se plantearán las opciones que se pueden barajar para obtener un sistema de gestión dinámica eficiente. Se aplicará la metodología a la línea de estudio planteada, para contrastar los resultados.

A continuación, se tratarán las desviaciones en los cálculos de la capacidad de los conductores, primero utilizando algoritmos en estado no estacionario y, posteriormente, desarrollando procedimientos de optimización del cálculo de la capacidad para ajustar los valores a la realidad. Se planteará la metodología a seguir para aplicarla al caso de estudio.

Por último, se expondrán las posibilidades para el desarrollo de un sistema de planificación de la gestión dinámica a corto plazo basado en la predicción de las variables meteorológicas y en la predicción directa de la ampacidad. Igualmente, se expondrá la metodología a seguir y se aplicará posteriormente al caso de estudio. La calidad de los resultados estará estrechamente relacionada con la cantidad de datos históricos disponibles.

La aplicación de estos objetivos en líneas reales permitirán gestionar de manera completa y eficiente las líneas eléctricas y, junto con la planificación de la producción y la demanda, conocer perfectamente el estado de las líneas en tiempo real y en un futuro a corto plazo.

Para la consecución de los objetivos planteados como principales, es necesario plantear objetivos previos que resultan esenciales para el avance de la tesis. A continuación, se ordenan cronológicamente los diferentes objetivos específicos de la tesis:

1. Definición del escenario práctico en el que realizar las pruebas.

Se elige una línea de prueba en la que existan los sensores necesarios para realizar las pruebas y desarrollos de los modelos planteados en los objetivos.

2. Creación de una base de datos relacional para el almacenamiento de todos los datos necesarios para testar los modelos planteados.

La gestión de los datos es una parte muy importante para el desarrollo de todos los modelos, ya que deben tenerse almacenados y disponibles una gran cantidad de datos. La creación de una base de datos relacional permite el acceso y manejo de los datos de manera sencilla desde Matlab[®], que será la plataforma de desarrollo de los algoritmos.

 Cálculo de la capacidad del conductor a través de los valores históricos meteorológicos.

Un primer paso en los cálculos es la obtención de los datos de capacidad a través de los datos meteorológicos históricos de los que se dispone. Estos valores serán los utilizados para compararlos con las diferentes mejoras a aplicar.

4. Desarrollo y aplicación de los modelos en estado no estacionario del cálculo de la capacidad del conductor.

El siguiente paso para la mejora de los procedimientos de cálculo es la aplicación de los modelos no estacionarios que ajustan más los resultados a la realidad.

5. Desarrollo y aplicación del procedimiento de optimización de los modelos de cálculo de capacidad del conductor.

El paso final en la mejora de los algoritmos de cálculo es el desarrollo de un procedimiento en el que se adecúen más los resultados a la realidad. Debido a que no es posible medir la capacidad del cable de manera física, se utilizará la medida de la temperatura del conductor como base para la creación del procedimiento de optimización. Se aplicará a la línea de estudio y se obtendrán los valores necesarios para comparar con el modelo inicial.

6. Desarrollo y aplicación de los modelos de predicción basados en redes neuronales para diferentes horizontes temporales.

Una de las aportaciones de esta tesis se basa en crear modelos de redes neuronales analizando varias posibilidades y comparando resultados basados en la línea de estudio. Finalmente, se tendrán dos modelos con tres horizontes de predicción (1, 2 y 6 horas), uno basado en los valores meteorológicos y otro basado en el histórico de valores de capacidad del conductor. Se comparará los resultados para exponer la bondad de cada modelo.

1.3. Estructura de la tesis

El documento se divide en ocho capítulos. En el primer capítulo se recoge la introducción al tema sobre el que versa la tesis y los objetivos que se han planteado y se desarrollarán a lo largo de los capítulos posteriores.

En el Capítulo 2 se expone el estado del arte tanto de la gestión dinámica de las líneas eléctricas como de la predicción de variables meteorológicas. Se analizan las diferentes soluciones que se describen en la literatura técnica para monitorizar líneas de alta tensión y obtener los valores de capacidad de los conductores. Además, se exponen las diferentes opciones que se plantean en la técnica para predecir las variables meteorológicas y la capacidad del conductor. Se analizan los resultados que han sido obtenidos por otros autores en estudios previos y la posible adecuación al estudio de la capacidad.

En el Capítulo 3 el objetivo esencial es plantear los algoritmos existentes para el cálculo de la ampacidad en los conductores de manera clara para su implementación futura.

En el Capítulo 4 se define completamente el escenario práctico al que se aplicarán todos los modelos definidos para contrastar los resultados. En este capítulo también se expondrá la creación de la base de datos relacional.

En el Capítulo 5 se desarrolla la metodología de análisis del emplazamiento óptimo de cada uno de los sensores necesarios. Se analiza la sensibilidad de los procedimientos planteados en el Capítulo 3 a las variaciones de cada uno de los parámetros meteorológicos para conocer qué variables son las más importantes a tener en cuenta a la hora de emplazar los sensores. Además, es necesario obtener un estudio estadístico de los valores meteorológicos registrados en el histórico para evaluar las diferentes zonas de la línea y estudiar la evolución de la temperatura del conductor a lo largo de la misma. Tras desarrollar la metodología, se aplica a la línea de estudio.

En el Capítulo 6 se diseñan los algoritmos de cálculo siguiendo los procedimientos del Capítulo 3 y posteriormente desarrollando la optimización de los mismos. Además, se ejecutan los algoritmos para los datos de la línea de estudio para establecer cúal es más adecuado.

En el Capitulo 7 se exponen los modelos utilizados para la predicción de la capacidad de la línea y las razones por las que se han elegido. Se establecen todas las características del modelo de predicción utilizado junto con la metodología de cálculo y, finalmente, se aplica a los datos de estudio. Se expone una comparativa de los modelos realizados.

En el Capítulo 8 se recogen las conclusiones finales de la tesis, las aportaciones realizadas en el campo de la gestión dinámica de líneas eléctricas aéreas de alta tensión y las posibles líneas de investigación futuras con las que conseguir mejores resultados.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Gestión dinámica de líneas eléctricas aéreas de alta tensión

Las redes de transporte y distribución de energía eléctrica se encuentran sometidas a situaciones que dificultan su operación. Tanto la creación de instalaciones renovables, sobre todo plantas eólicas, como el cambio en los patrones de la transmisión de flujos de energía, son los principales factores que las afectan. Por todo esto, las líneas operan muy cerca de los límites estáticos establecidos por las empresas de transporte y distribución, lo que produce congestiones en las líneas que afectan a todo el sistema eléctrico, que no es capaz de integrar completamente la energía generada, por lo que disminuye su eficiencia. De igual forma, las empresas generadoras deben sufrir restricciones.

La solución más intuitiva es la creación de nuevas líneas, pero debido a los impedimentos tanto económicos como legales y medioambientales, esta solución es frecuentemente descartada. Ante la inviabilidad de esta propuesta, los operadores de red se centran en la modificación de las líneas existentes. Este tipo de soluciones se pueden dividir en tres grupos principales.

El primer grupo trata de realizar una nueva apreciación en la clasificación de las líneas y en los márgenes de seguridad. El límite estático tradicional adopta un nivel máximo de intensidad por las líneas muy conservador, asegurando un funcionamiento fiable con un gran margen de seguridad. Revisando este tipo de clasificaciones, haciéndolas más realistas y operando más cerca de los límites de capacidad dinámica del sistema, se puede aumentar en gran medida la capacidad de las líneas.

El segundo grupo está más dedicado a los puntos críticos de la línea, es decir, posibles modificaciones en la altura de los fustes y/o el uso de equipos de monitorización.

Por último, el tercer grupo se basa en la realización de labores de retensionado, sustitución de los conductores, aumento del número de circuitos y/o reconstrucción de estructuras existentes.

La presente tesis tratará en profundidad el segundo grupo, con principios importantes del primero.

El estado de la técnica incluye muchos estudios relacionados con esta problemática. La ampacidad, conocida como la intensidad máxima que puede circular de manera continua por un conductor eléctrico, está limitada por las características de diseño del conductor, las condiciones meteorológicas a las que está sometido y la situación de la línea. Los principales problemas derivados de la superación de la ampacidad de una línea son los debidos al aumento de la temperatura por encima de la máxima, pudiendo afectar a las propiedades del conductor e, incluso, llegando a la elongación del conductor de manera que supere los límites de seguridad en flecha al suelo marcado por la norma. A continuación se detallan las diferentes soluciones descritas en la literatura técnica.

• Retensionado de las líneas [KR09]

Es una solución interesante para líneas antiguas, donde la flecha es el factor limitador para el aumento de capacidad de la línea, o para líneas en las que las condiciones medioambientales o eléctricas no se tuvieron en cuenta en el diseño previo. Permite operar a temperaturas mayores a la definida en diseño pero reduce la vida útil del conductor y requiere la evaluación de apoyos y conductores para confirmar que soportan el retensionado.

• Cambio de conductores [SBB11] [KR09]

En el mercado se encuentran diferentes tipos de conductores dependiendo de las necesidades de cada línea. Conociendo las condiciones meteorológicas más desfavorables y las condiciones de operación a las que va a ser sometido, se pueden elegir diferentes conductores que resulten más adecuados. Otras mejoras unidas al cambio de conductor son los cambios en las cadenas de aisladores por cadenas en forma de salida flotante sin elemento vertical que consiguen una ganancia adicional en distancia al suelo.

• Métodos deterministas [HMF11]

En lugar de mantener los criterios tradicionales de utilizar las peores condiciones meteorológicas posibles para el cálculo de los límites estáticos, se tienen en cuenta periodos de tiempo como son las diferentes estaciones del año, el día y la noche, etc. A través de los históricos de las variables meteorológicas se pueden obtener límites día-noche, mensuales, estacionales, etc. Para los cálculos es necesario la temperatura ambiente, la radiación solar y la velocidad y dirección del viento. El método determinista deja la temperatura ambiente y la radiación solar en los valores máximos de los datos del histórico. En cuanto a la velocidad y dirección de viento, se obtendrá de la resta del valor esperado y la desviación estándar de los datos del histórico.

• Métodos probabilísticos [KWB10]

Esta opción va más allá en cuanto a la obtención de estimaciones más reales de los parámetros meteorológicos. Considerando las variables como estocásticas, éstas son modeladas a través de funciones de densidad de probabilidad. La temperatura ambiente se modela a través de una distribución normal, la radiación solar mediante una uniforme, la velocidad de viento utilizando Weibull y la dirección a través de Von Misses.

Monitorización en tiempo real

Es el primer paso para las redes de transporte y distribución inteligentes. La monitorización de variables críticas como la temperatura del conductor y la flecha aporta a los operadores de red una gran seguridad en la toma de decisiones.

Existen diferentes grados de monitorización, obteniendo con cada uno de ellos más precisión en los resultados.

• Monitorización de condiciones meteorológicas [Yan+09] [Alb+11a] [CIG92] [IEE93] [AMS13] [AMS15]

Es un sistema poco invasivo y simple, ya que no necesita colocarse en la línea. Se utilizan las variables meteorológicas como entrada de un algoritmo y junto con la intensidad que circula por la línea se calcula la temperatura a la que se encuentra el conductor. La ampacidad se calculará con las condiciones meteorológicas y la temperatura máxima que puede alcanzar el conductor.

Las debilidades de este sistema se basan en la incertidumbre de suponer que toda la línea está a las mismas condiciones que el lugar donde se sitúa la estación meteorológica.

• Monitorización de la temperatura del conductor [Alb+11a] [Alb+11b] [AMS15]

Se realiza, generalmente, a través de sensores de medida instalados sobre el conductor. Tiene incertidumbre debido a la suposición de que la medida puntual del sensor es la que existe en toda la línea. En estos casos se monitorizan las variables meteorológicas para obtener la ampacidad.

Existen numerosos sistemas de monitorización de la temperatura.

El Power Donut [SE90] es un toroide acoplado al conductor, autoalimentado a través de la tensión inducida por el campo magnético de la línea. Además de temperatura mide corriente.

Otro sistema similar al Power Donut es el SMT (Sensor de Medida de Temperatura) [Alb+11b] [Art09]. Se trata de un sensor montado en el conductor que mide la temperatura, a través de una sonda en contacto con el conductor, y la intensidad.

Otra alternativa es el sistema SAW (Surface Acustic Wave) [Ber+07] basado en la monitorización de la temperatura a través de ondas acústicas. Consta de un radar que emite y recibe ondas electromagnéticas de alta frecuencia y un sensor pasivo sobre el conductor. Este sensor está formado por un cristal piezométrico.

Un sistema más efectivo pero de precio más elevado es el DTS (Ditributed Temperature Sensing) [GK13] formado por fibra óptica instalada en el interior del conductor. Este sistema es inviable para líneas existentes.

• Monitorización de la tensión mecánica del conductor [Alb+11a] [Alb+13] [AMZ09]

La temperatura de un conductor puede obtenerse a través de las medidas de tensión mecánica del mismo. Existen sistemas que monitorizan la tensión del conductor, tanto mediante curvas de calibración Temperatura-Tensión como ecuaciones que lo relacionan, se obtiene la temperatura del mismo. Se suelen acompañar por sistemas de monitorización meteorológica para obtener la ampacidad.

• Monitorización de la flecha del conductor [Fer+12] [KD14]

De la misma manera que se monitoriza la tensión, se puede medir también la flecha del conductor. Los sistemas de monitorización son capaces de obtener la flecha a través del procesado de imágenes, por análisis de vibraciones del conductor y con la instalación de inclinómetros en el mismo. Con todos estos métodos se obtiene la flecha y tanto a través de curvas de calibración Temperatura-Flecha como mediante ecuaciones que lo relacionan se obtiene la temperatura del conductor.

2.2. Herramientas de gestión dinámica a corto plazo

Los operadores de red, además de tener la necesidad de conocer el estado de las líneas en tiempo real, requieren del conocimiento del estado a corto plazo, ya que las operaciones de red necesitan un tiempo de planificación que la gestión dinámica en tiempo real no puede alcanzar.

Para ello, es importante conocer a corto plazo el estado de todas las variables que afectan a la capacidad de las líneas. Lo más inmediato es plantear la predicción de las variables meteorológicas.

Saber lo que va a suceder en el futuro ha sido una de las grandes líneas de investigación durante toda la historia de la humanidad. En concreto, la predicción meteorológica ha sido objeto de investigación y literatura técnica durante mucho tiempo con grandes avances. En la actualidad, existen diferentes procedimientos para realizar predicciones meteorológicas utilizando los modelos numéricos que utilizan datos meteorológicos como entrada a complejos modelos físicos y matemáticos de la atmósfera. Estos procedimientos se basan en la aplicación de ciertas características de la atmósfera en un momento dado utilizando ecuaciones de dinámica de fluidos y termodinámica para calcular el estado de la atmósfera en un futuro. Por otro lado, se encuentra la predicción mediante modelos basados en los históricos de los datos. Se forman series de datos o series temporales, secuencias de datos ordenadas cronológicamente y normalmente espaciados a intervalos iguales, que se utilizan como entrada a algoritmos de diferente naturaleza para obtener las predicciones.

2.2.1. Modelos de predicción atmosférica

Como se ha comentado anteriormente, el conocimiento del estado de la atmósfera resulta muy importante para el desarrollo de muchas actividades humanas. Toda la red de sistemas de medida meteorológica, satélites y modelos numéricos se unen para obtener un mejor conocimiento del estado de la atmósfera.

Las predicciones meteorológicas requieren la determinación de la evolución en un futuro de los complejos procesos que van a ocurrir en la atmósfera a partir de conocimiento del estado en un instante inicial. Para ello, se utilizan modelos matemáticos que simulan la dinámica de la atmósfera en un tiempo determinado, a través de la resolución de complejas ecuaciones diferenciales. Estas ecuaciones expresan diferentes principios y leyes de la Física: segunda ley de Newton, primer principio de la Termodinámica, principio de conservación de la masa de aire y del agua en la atmósfera, ecuación hidrostática y ecuación de estado del aire. El sistema de ecuaciones necesita de modelos numéricos aproximados para resolverlos.
Las condiciones iniciales del proceso de predicción se obtienen a través de la observación de todas las variables meteorológicas con numerosos sistemas de medida. A partir de esos valores iniciales se resuelven numéricamente las ecuaciones que modelan el comportamiento de la atmósfera a través de supercomputadores, ya que exigen una gran cantidad de cálculos. Los resultados que se obtienen constan de múltiples variables para cada celda del modelo a lo largo del horizonte de predicción y frecuencia deseado.

Existe un gran número de modelos desarrollados por las diferentes agencias y organismos meteorológicos. Cada uno de ellos implementa diversas metodologías para la predicción de las variables meteorológicas. Entre los modelos existentes se encuentran:

• HIRLAM (High Resolution Limited Area Model):

El programa de investigación internacional HIRLAM está formado por diferentes institutos de investigación europeos. El objetivo es desarrollar y mantener un sistema de predicción meteorológica a corto plazo para uso operacional por los institutos meteorológicos participantes. HIRLAM es un modelo hidrostático de puntos de rejilla con una dinámica semi-lagrangiana, en el que son parametrizados los procesos radiativos y los que suceden a escala sub-rejilla (turbulencia, nubes y condensación, convección, intercambios de agua y energía con la superficie, etc.).

GFS (Global Forecast System) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EE.UU:

Es el sistema utilizado por el National Center of Environmental Prediction. Se dispone de numerosas variables tanto atmosféricas como del suelo y cubre toda la superficie terrestre. Tiene una resolución horizontal de 28 kilómetros que es utilizada para horizontes predictivos de 16 días y de 70 kilómetros para predicciones entre una y dos semanas. Este sistema está formado por cuatro modelos diferentes; un modelo atmosférico, un modelo oceánico, un modelo de suelo y un modelo de hielo marino, que unidos proporcionan una imagen precisa de las condiciones meteorológicas. Es un modelo en constante evolución, ya que se realizan cambios periódicos para aumentar su rendimiento y precisión.

• MetUM (Met Office Unified Model):

Es el modelo global utilizado por la Met Office. Se define como un modelo "sin fisuras". La última versión utiliza un modelo con dinámica no hidrostática y semilagrangiano. Es un modelo de punto de cuadrícula. Se representan una serie de procesos a escala sub-cuadrícula, incluyendo la convección, la turbulencia de la capa límite, la radiación, las nubes, la microfísica y la orografía. Se puede ejecutar como un modelo global o un modelo de área limitada, y también se pueden acoplar a la superficie terrestre los modelos oceánicos, modelos de olas, de parámetros químicos y los componentes del sistema de la Tierra.

• GME:

Es el modelo global de la oficina alemana Deutscher Wetterdienst. Este modelo está formado por una malla icosaedríca-hexagonal casi uniforme. El enfoque de los puntos de la malla del modelo evita las desventajas de las técnicas espectrales, así como el problema de polo en las redes de latitud y longitud. Proporciona una estructura de datos muy adecuada para una alta eficiencia en los ordenadores paralelos de memoria distribuida.

• Modelo global del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio:

Se opera con modelos y sistemas de asimilación de datos que simulan la dinámica, termodinámica y composición del fluido (atmósfera y océanos) que envuelve la Tierra, con vistas a proporcionar predicciones por medio de métodos numéricos. Entre sus objetivos se encuentra la distribución de las predicciones por todos los estados miembros del centro.

• GEM (The Global Environmental Multiscale Model):

Es el modelo global desarrollado por la Oficina Canadiense de Meteorología. Se opera con predicción global a medio plazo y con predicción regional a corto plazo. Las previsiones de mesoescala se producen durante la noche y están disponibles para los meteorólogos operacionales. Un número creciente de aplicaciones meteorológicas se basan ya en el modelo GEM.

• MM5 (Mesoscale Model 5):

Es un modelo de mesoescala no hidrostático, diseñado para predecir la circulación atmosférica de mesoescala y de escala regional. Ha sido desarrollado por la Universidad Estatal de Pensilvania y el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de Estados Unidos. El MM5 es el último modelo de una serie que se desarrolla a partir de un modelo de mesoescala desarrollado en los años 70. Ha sufrido muchos cambios diseñados para ampliar su uso. Entre ellos se encuentra:

- La capacidad de anidamiento múltiple, que facilita el estudio de fenómenos bajo distintas escalas espaciales y el diseño de predicciones a muy alta resolución, del orden del kilómetro.
- La formulación de una dinámica no hidrostática, que permite representar fenómenos de pocos kilómetros.
- Incorporación de esquemas de parametrización de diferentes procesos físicos relacionados con la radiación atmosférica, la microfísica de las nubes y precipitación, etc.

Es un modelo de gran utilización en investigaciones científicas y aplicaciones meteorológicas como puede ser, por ejemplo, la predicción en parques eólicos.

Este modelo físico resuelve una malla de ecuaciones de predicción de las variables meteorológicas principales para llevar a cabo una simulación. Se alimenta al MM5 con los campos de la salidas del modelo GFS.

Una de las primeras aportaciones a la predicción de variables meteorológicas para la planificación de la gestión dinámica fue en [CB89] dónde se plantea un sistema que predice la temperatura ambiente y el viento a 1 y 5 horas, estableciendo valores de temperatura constantes en periodos del día. Las predicciones se dan en una cuadrícula de 128x128 km dentro de la región. Más adelante en [Deb95] en el año 1995 se define un sistema experto de objetos orientados que obtiene predicciones meteorológicas utilizando el NWS (National Weather Services).

En [NLS13] se plantea la posibilidad de utilizar otros sistemas diferentes a la predicción basada en modelos numéricos ya que es complicado que este tipo de modelos tengan en cuenta las características locales a pequeña escala que afectan a la capacidad de las líneas, como por ejemplo vientos bajos.

2.2.2. Modelos de predicción basados en series temporales

Una serie temporal o cronológica es un conjunto ordenado de observaciones obtenidas en intervalos regulares de tiempo. La característica principal es la dependencia operacional: el valor de una variable en un determinado instante de tiempo depende de los valores de la propia variable en instantes anteriores. Las series temporales se pueden utilizar principalmente para dos aspectos:

- Analizar las características del fenómeno que describe la serie para comprender aspectos de la misma que pueden aportar mucha información.
- Predecir valores futuros a través de la información que aporta la tendencia y evolución de la serie de datos.

Esta tesis se centrará principalmente en el análisis de la predicción. Se supone una serie temporal observada y se desea predecir valores futuros denominados X_{N+h} , donde h es el horizonte de predicción y N es el instante desde el que se quiere predecir.

Los métodos de predicción pueden englobarse en tres grupos principalmente:

- Predicciones basadas en juicios subjetivos.
- Métodos univariantes donde las predicciones dependen de los valores presentes y pasados de la variable a predecir.
- Métodos multivariantes donde las predicciones dependen de la variable a predecir y de una o más variables explicativas.

En general, el método de predicción puede combinar las distintas opciones explicadas anteriormente.

Un paso previo a la realización de los modelos de una serie temporal es el conocimiento de las propiedades principales de la misma. Existen herramientas para la evaluación de las series, como la representación gráfica en el tiempo.

Las dos características principales a identificar en una serie temporal son la tendencia y la estacionaliad. Para el análisis, se trata de descomponer la serie temporal en componentes debidas a:

- Variación estacional.
- Tendencia.
- Otras variaciones cíclicas.
- Fluctuaciones irregulares.

Debido a la naturaleza de las propiedades de las series se pueden analizar con métodos clásicos, series con tendencias lineales regulares o con estacionalidad regular. Existen métodos más sofisticados como las series con cambios en las tendencias y en la estacionalidad.

Modelado Univariante: Modelos ARIMA

Los modelos ARIMA son una herramienta importante en la predicción, siendo la base de muchas de las ideas fundamentales en el análisis de series temporales. ARIMA es un modelo autorregresivo integrado de media móvil desarrollado por Box y Jenkins (1970) [BJ70], por lo que en ocasiones se denominan modelos Box-Jenkins. La metodología Box-Jenkins necesita series estacionarias (media y varianza constantes) o que sean estacionarias después de varias diferenciaciones.

Esta metodología aplica métodos autorregresivos, de media móvil, autorregresivos de media móvil y autorregresivos integrados de media móvil.

Proceso autorregresivo (AR)

Una serie temporal se dice que es un proceso autorregresivo de orden p(AR(p))si es una suma lineal ponderada de los últimos p valores de la serie más un valor aleatorio.

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + Z_t$$
(2.1)

donde:

 $Z_t,$ proceso aleatorio puro con media cero y varianza σ_z^2

Un proceso autorregresivo es estacionario si las raíces de $\phi(x) = 0$ se encuentran fuera del circulo unitario. La función de autocorrelación en un proceso AR(1) estacionario es dada por:

$$\rho_k = \phi^k \tag{2.2}$$

para k=0,1,2...

Para procesos AR de órdenes superiores, la función de autocorrelación es una mezcla de términos que decrecen exponencialmente o se atenúa en forma de senos o cosenos. La función de autocorrelación se puede hallar resolviendo las ecuaciones de Yule-Walker:

$$\rho_k = \phi_1 \rho_{k-1} + \phi_2 \rho_{k-2} + \dots + \phi_p \rho_{k-p} \tag{2.3}$$

para $k=1,2,\ldots$ donde $\rho_0=0$

Otra propiedad de los procesos AR(p) es que la función de autocorrelación parcial se hace cero o despreciable a partir de p.

En la literatura técnica existen muchas referencias a la predicción de la capacidad de los conductores basada en series temporales. Una de las primeras aportaciones fue en [HD88] en la que se desarrolla un sistema de predicción de las variables meteorológicas basado en un modelo estocástico de series temporales que utiliza

para la predicción de la temperatura ambiente y de la dirección del viento un modelo autorregresivo, mientras para la velocidad de viento y la corriente utiliza un modelo de función de transferencia. La radiación solar es calculada como una función determinista dependiente del tiempo. En [Pog+03] se calcula la velocidad de viento media horaria para las siguientes 3 horas a través de modelos autorregresivos mensuales.

Proceso de medias móviles (MA)

Una serie temporal se dice que es un proceso de medias móviles de orden q (MA(q)) si es una suma lineal ponderada de los últimos q valores aleatorios inesperados de la serie.

$$X_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-q} + Z_t$$
(2.4)

donde:

 Z_t , proceso aleatorio puro con media cero y varianza σ_z^2

Un proceso MA de orden finito es siempre estacionario. La función de autocorrelación de un proceso MA(q) se puede expresar como:

$$\rho_k = \begin{cases} 1 & k = 0\\ \frac{\sum_{i=0}^{q-k} \phi_i \phi_{i+k}}{\sum_{i=0} q \phi_i^2} & k = 1, 2, ..., q\\ 0 & k > q \end{cases}$$

donde:

 $\phi_0 = 1.$

La función de autocorrelación se hace cero o despreciable a partir del retardo q, por lo que se puede evaluar el orden de un proceso MA a partir de esta premisa.

Modelos ARMA

Es un modelo mixto autor regresivo de medias móviles con p términos autor regresivos y q términos de medias móviles, ARMA(p,q).

$$X_{t} = \phi_{1}X_{t-1} + \phi_{2}X_{t-2} + \dots + \phi_{p}X_{t-p} + Z_{t} + \phi_{1}Z_{t-1} + \phi_{2}Z_{t-2} + \dots + \phi_{p}Z_{t-q} + Z_{t}$$
(2.5)

En la literatura técnica existen múltiples artículos en los que utilizan ARMA para predecir la generación en los parques eólicos. Dentro de éstos existen modelos para predecir la velocidad del viento media durante ciertos periodos de tiempo. Estos sistemas podrían ser interesantes para predecir la velocidad de viento como entrada al algoritmo de capacidad del conductor. En [KJ97] se predice la velocidad de viento media horaria calculando intervalos de confianza para la predicción. Modelos ARIMA

Los modelos ARMA, definidos anteriormente, presentan problemas para series de datos no estacionarias, por lo que no es posible aplicar procesos AR, MA o ARMA directamente. Una de las opciones es aplicar diferenciación para hacer la serie estacionaria. La serie original se diferenciará d veces hasta hacer la serie estacionaria. Por lo tanto, se representará el proceso como ARIMA(p, d, q).

La mayor dificultad es evaluar el orden de los procesos AR y MA, además de estimar los coeficientes $\phi.$

Debido a la ineficiencia de los modelos atmosféricos para predecir valores meteorológicos muy locales, en [Hou+13] se plantea la utilización de modelos ARIMA junto con transformaciones de Wavelet para obtener las predicciones.

Modelos SARIMA

Los modelos ARIMA son suficientes para explicar procesos con tendencia pero no explican procesos estacionales. Si se cuenta con una serie estacional, con s periodos de tiempo por año se puede obtener un modelo ARIMA estacional (SARIMA) como una generalización del modelo ARIMA. Existe la posibilidad de combinar diferentes procesos para abordar todas las características de la serie temporal, y así reflejar tanto la tendencia como la estacionalidad. La combinación de ambos modelos se realiza mediante la multiplicación de sus coeficientes. Se representa como $SARIMA(p, d, q)x(P, D, Q)_s$, combinando los términos no estacionarios con los términos estacionales.

Para la construcción de un modelo ARIMA que englobe todas las características de la serie temporal a predecir es necesario seguir unos pasos:

• Análisis de la serie

Se debe realizar un análisis de las características de la serie mediante métodos gráficos y estadísticos para obtener la estacionariedad de la serie.

- Las gráficas de la serie temporal en función del tiempo se utilizan para observar a simple vista las características de tendencia, estacionariedad y ciclos de la serie.
- Los diagramas de caja se utilizan para analizar el comportamiento de la varianza. Si la varianza no es constante se aplica la prueba de Levene para ver si el estadístico es significativo. En caso afirmativo será necesario realizar alguna transformación para obtener una serie estacionaria.
- Identificación del modelo
 - Se debe seleccionar el rango de datos que se van a utilizar para la estimación y creación del modelo.
 - Se determinan los correlogramas o funciones de autocorrelación simple y parcial para observar el número de diferenciaciones que hay que aplicar a la serie para obtener un proceso estacionario. Existen numerosas pautas para relacionar lo observado en los correlogramas con el número de diferenciaciones.

• Se deben determinar los órdenes de las componentes autorregresivas (AR(p)) y de medias móviles (MA(q)) del modelo ARMA(p,q) observando los patrones, tabla 2.1, que se obtienen en los correlogramas.

Correlograma Simple	Correlograma Parcial	Modelo
Desciende lentamente	Se corta después del retardo p	AR(p)
Se corta después del retardo q	Desciende lentamente	MA(q)
Desciende lentamente	Desciende lentamente	ARMA(p,q)

Tabla	2.1:	Patrones	de	los	correlogramas.
-------	------	----------	----	-----	----------------

- Se estudia la estacionalidad. En caso de existir estacionalidad con periodo s se aplica una diferencia estacional para convertir la serie en estacionaria. La estacionalidad se observa en el gráfico en función del tiempo y en el correlograma simple.
- Se determinan los ordenes P y Q del modelo SARMA(P,Q) de la misma manera que para el ARMA pero considerando los correlogramas de retardos s, 2s, 3s...
- Especificación del modelo ARIMA y búsqueda de otros modelos posibles.
- Parámetros del modelo

Una vez identificado el modelo se estiman los parámetros del mismo, utilizando el método de mínimos cuadrados condicional o el método de mínimos cuadrados incondicional.

• Adecuación del modelo

Se trata de observar si la serie original y la estimada a través del modelo tienen grandes similitudes o grandes diferencias. En el caso de un modelo ARIMA si se obtienen unas diferencias entre los valores estimados y los reales aproximadas al comportamiento de un ruido blanco se establece que el modelo es adecuado a la serie temporal. Si los parámetros del modelo ARIMA son significativamente diferentes a cero y diferentes entre ellos es un indicativo de adecuación, junto con un grado de ajuste elevado en comparación con otros modelos.

Predicción

Se realiza la predicción a través del modelo identificado como el más adecuado, calculando los errores de predicción (error medio absoluto, raíz del error cuadrático medio, etc.)

Modelos basados en redes neuronales

Las redes neuronales son sistemas de inteligencia artificial basados en el comportamiento de las neuronas del ser humano. Estas neuronas artificiales constan de diferentes elementos como:

Nodos de entrada.

- Nodos de salida.
- Pesos. Representan la importancia de la entrada correspondiente.
- Punto de suma ponderada. Es donde se realiza la combinación lineal de todas las entradas multiplicadas por el peso.
- Función de activación. Limita el rango de salida de la neurona.
- Sesgo. Es un valor formado por una entrada fija igual a 1 multiplicada por el peso.

En las redes neuronales la definición de la arquitectura de la red es muy importante para la adecuación a la serie temporal correspondiente. La arquitectura de una red neuronal consta de:

- Entradas. Se debe establecer el número de entradas para alimentar a la red neuronal. Las entradas pueden estar formadas simplemente por la variable a predecir o por más variables denominadas explicativas. En este caso, la relación entre ciertas variables puede facilitar la obtención de resultados más precisos.
- Capas. Las redes neuronales requieren de varias neuronas que operen en paralelo. Esta agrupación se denomina capa. Una red con una capa se denomina unicapa y con más de una capa se denomina multicapa. El número de neuronas puede variar entre capas.
- Salidas. El número de salidas dependerá de lo que requiera el estudio.
- Interconexiones:
 - Totalmente conectadas. La salida de una neurona es la entrada a todas las neuronas de la capa siguiente.
 - Parcialmente conectadas. La salida de una neurona es la entrada de alguna de las neuronas de la capa siguiente.
- Dependiendo de la dirección que sigue la información se pueden distinguir diferentes redes:
 - Redes de alimentación adelantada. La información fluye de la entrada a la salida.
 - Redes de retroalimentación. Las salidas de una capa pueden ser las entradas de neuronas de capas anteriores.
 - Redes de alimentación lateral. Las salidas de las neuronas de una capa pueden ser las entradas de neuronas de la misma capa.
 - Redes recurrentes. Dentro de la red existen lazos cerrados de información.

Una vez definida la arquitectura completa de una red neuronal se debe pasar al siguiente proceso que es el entrenamiento de la red neuronal. El entrenamiento se lleva a cabo mediante una regla o algoritmo de aprendizaje, que consiste en la variación de los pesos de una red. De esta manera, y tras un proceso de aprendizaje, se obtienen las relaciones necesarias entre neuronas que, partiendo de un entrada, obtiene la salida deseada con un error minimizado. Existen diferentes métodos de entrenamiento.

- Algoritmos supervisados. Se trata de realizar el aprendizaje basándose en el conocimiento de las entradas y las salidas de manera que se ajustarán los pesos de la red hasta que la salida sea igual, con cierto error establecido, que la salida establecida.
- Algoritmos no supervisados. Se hacen los ajustes de los pesos basados sólo en las entradas a la red. Normalmente este tipo de algoritmos se utilizan para realizar agrupamientos.

En cuanto a la predicción, los algoritmos más adecuados son los supervisados. Dentro de este tipo de algoritmos existen muchas clases como el Perceptrón Discreto, el Perceptrón Discreto Unicapa, el Perceptrón Continuo, el algoritmo de Retropropagación, etc.

Por último, se realizará la prueba de la red, que consiste en alimentarla con valores de entrada diferentes a los utilizados para el entrenamiento y comparar las salidas con las salidas reales. En este proceso se pueden utilizar diversos parámetros estadísticos como el error cuadrático medio y el coeficiente de correlación, que permiten definir la calidad del modelo.

En la literatura técnica se desarrollan trabajos en los que la inteligencia artificial es la base para las predicciones meteorológicas o de capacidad [RML14]. En [FMA12] se expone un modelo basado en redes neuronales formadas por 2 capas con 20 neuronas ocultas para 15 parámetros de entrada y 3 rangos de tiempo. En general, no existen muchas referencias basadas en la predicción de las variables meteorológicas que se ponen en juego en el cálculo de la capacidad del conductor a través de redes neuronales.

2.2.3. Conclusiones

En la literatura técnica existen múltiples referencias en cuanto a la predicción de variables meteorológicas con modelos atmosféricos. Estos modelos son considerados clásicos en la predicción del tiempo. De hecho, son los más utilizados por meteorólogos. Los modelos atmosféricos actuales, aún a muy pequeña escala, no son capaces de ajustar el sistema a lo requerido para la predicción de la capacidad de las líneas. La ampacidad está muy supeditada a las condiciones meteorológicas que envuelven al conductor. Estas condiciones son muy locales, ya que dependen de variables muy difíciles de predecir y que plantean muchos gradientes de temperatura del conductor a lo largo de la línea. Tanto la orografía del terreno en el lugar de emplazamiento de la línea como las condiciones más próximas, árboles, otras líneas, etc. condicionan excesivamente las variables meteorológicas cercanas a la línea, por lo que los modelos atmosféricos de predicción no pueden alcanzar esa precisión.

Es necesario plantear otros sistemas que permitan tener en cuenta esos gradientes de temperatura. A través de la instalación de estaciones meteorológicas a lo largo de toda la línea se puede tener un histórico de cada una de las variables meteorológicas en múltiples puntos de la línea. De esta manera, se pueden aplicar métodos de series temporales para realizar la predicción. En la literatura técnica se encuentran trabajos en los que utilizando modelos ARIMA se consigue predecir el viento, que es la variable que más afecta al cálculo de la capacidad, pero no existen muchas referencias en cuanto a la predicción de otras variables. En cambio, la predicción de la capacidad del conductor a través de redes neuronales puede ser una alternativa interesante, pudiendo utilizarse para predecir las variables meteorológicas o para estimar la capacidad de la línea de manera directa.

Capítulo 3

Algoritmos de cálculo de ampacidad

3.1. Introducción

La ampacidad, como se ha definido anteriormente, es la intensidad máxima que puede circular de manera continua por un conductor sin que sufra daños. Esta intensidad máxima es dual a la temperatura que alcance el conductor, es decir, la ampacidad es la intensidad que circula por el conductor cuando el mismo se encuentra a la temperatura máxima admisible de diseño. Por lo tanto, es inherente describir el proceso como un problema térmico. De esta manera, se define el cálculo de la ampacidad de un conductor basándose en ecuaciones de equilibrio térmico que engloben todos los factores que afectan al conductor.

Existen dos guías principales que proporcionan métodos de cálculo del comportamiento térmico de conductores de líneas aéreas: CIGRE [CIG14] e IEEE [IEE12]. Los dos procedimientos se basan en una ecuación de equilibrio térmico. Esta ecuación agrupa términos que dependen de factores meteorológicos, de la situación de la línea, de las características del conductor y de la intensidad que circula por el mismo.

A continuación, se describirán ambos procedimientos y se analizarán sus principales diferencias.

3.2. CIGRE

El propósito de CIGRE en su norma "Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines" [CIG14] es presentar un método de cálculo de la relación entre la corriente y la temperatura de un conductor aéreo.

En primer lugar, se definen los parámetros que afectan a la temperatura del conductor y, por lo tanto, a la ampacidad de la línea:

- Propiedades de los materiales del conductor.
- Diámetro del conductor.
- Localización del conductor.
- Condiciones de la superficie del conductor.

- Condiciones ambientales.
- Intensidad que atraviesa el conductor.

Las tres primeras propiedades son inherentes al conductor y a la línea a estudiar, por lo que son variables de entrada conocidas. La cuarta se refiere a las condiciones de la superficie del conductor, que pueden cambiar con el tiempo (envejecimiento). La quinta varía en cada instante, por lo que es necesario la instalación de estaciones meteorológicas para obtener valores de temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento y radiación solar. La última depende de la operación del sistema, la carga, el despacho de generación y otros factores. Las dos vertientes que plantea el algoritmo de cálculo son:

- Cálculo de la temperatura del conductor a través de una intensidad conocida.
- Cálculo de la intensidad que produce la temperatura máxima admisible en el conductor (ampacidad).

3.2.1. Nomenclatura

En la tabla 3.1 se describe la nomenclatura utilizada.

Símbolo	Descripción	Unidades
С	Capacidad calorífica específica del conductor	J/kgK
D	Diámetro total del conductor	m
d	Diámetro de un conductor de la capa	m
D_1	Diámetro del núcleo	m
F	Coef. de albedo	W/m^2
F_{c-g}	Calor irradiado conductor-suelo	-
F_{c-sky}	Calor irradiado conductor-cielo	-
Gr \degree	Número de Grashof	-
h_c	Coef. transferencia de calor por convección	W/m^2K
H_s	Altitud del sol	0
Ι	Intensidad total del conductor	A
I_{ac}	Intensidad de corriente alterna	A
I_B	Radiación solar directa	W/m^2
I_d	Radiación solar difusa	W/m^2
I_{dc}	Intensidad de corriente continua	A
I_T	Radiación total	W/m^2
k_{sk}	Coeficiente de efecto skin	_
m	Masa del conductor	kg/m
N	Día del año	_
N_S	Coeficiente de claridad	-
Nu	Número de Nusselt	-

TABLA 3.1: Nomenclatura de las variables asociadas al procedimiento CIGRE.

Continuación en la siguiente página

Símbolo	Descripción	Unidades
P_c	Refrigeración por convección	W/m
P_i	Calentamiento por efecto corona	W/m
P_{j}	Calentamiento por efecto Joule	W/m
P_M	Calentamiento magnético	W/m
P_r	Refrigeración por radiación	W/m
Pr	Numero de Prandtl	-
P_s	Calentamiento por radiación solar	W/m
P_T	Potencia total	W/m
P_w	Refrigeración por evaporación	W/m
R_{dc}	Resistencia de corriente continua	Ω/m
Re	Número de Reynolds	-
R_s	Rugosidad del conductor	-
T_a	Temperatura ambiente	$^{\circ}\mathrm{C}$
T_{av}	Temperatura media del conductor	$^{\circ}\mathrm{C}$
T_c	Temperatura del núcleo del conductor	$^{\circ}\mathrm{C}$
T_{f}	Temperatura de película	$^{\circ}\mathrm{C}$
T_{g}	Temperatura del suelo	$^{\circ}\mathrm{C}$
T_s	Temperatura de la superficie del conductor	$^{\circ}\mathrm{C}$
T_{sky}	Temperatura del cielo	$^{\circ}\mathrm{C}$
V^{\top}	Velocidad del viento	m/s
y	Altura del conductor sobre el nivel del mar	m
Z	Ángulo horario solar	0
α	Coef. de variación lineal de la resistencia	1/K
α_s	Coef. de absortividad solar	-
γ	Densidad del aire relativa	kg/m^2
γ_c	Azimut del conductor	0
γ_s	Azimut del sol	0
δ	Ángulo de ataque del viento	0
δ_s	Declinación	0
ϵ_s	Coef. de emisividad solar	-
η	Ángulo de incidencia del sol	0
λ	Conductividad térmica radial efectiva	W/mK
λ_{f}	Conductividad térmica del aire	W/mK
μ_{f}	Viscosidad dinámica a la Tf	kg/ms
v_f	Viscosidad cinamática a la Tf	m^2/s
$\hat{\rho}$	Resistividad del conductor	$\Omega.m$
σ_B	Constante de Stefan-Boltzmann	W/m^2K^4
φ	Latitud (norte positivo)	0
ζ	Coef. de variación cuadrática de la resistencia	$1/K^2$

Tabla 3.1 – Continuación de la página anterior

3.2.2. Equilibrio térmico

CIGRE [CIG14] ha desarrollado una nueva guía del comportamiento térmico de conductores aéreos. En ella plantea un equilibrio térmico del conductor en el que, en estado estacionario, el calor disipado debe ser igual al calor aportado al conductor.

$$HEAT GAIN = HEAT LOSS$$
(3.1)

$$P_J + P_M + P_S + P_i = P_c + P_r + P_w ag{3.2}$$

El calentamiento por efecto corona es significativo en situaciones de humedad y viento elevados, pero normalmente es irrelevante. De la misma manera, la refrigeración por evaporación se considera despreciable.

El calentamiento magnético está habitualmente incluido en el efecto Joule aumentando la resistencia efectiva del conductor.

Por lo tanto, la ecuación final de equilibrio térmico quedaría de la siguiente forma:

$$P_J + P_S = P_c + P_r \tag{3.3}$$

A continuación, se describirá cada uno de los términos de la ecuación de equilibrio.

3.2.3. Calentamiento por intensidad

Es el calentamiento producido por los efectos de la corriente, incluyendo el efecto Joule, el efecto magnético y el efecto skin.

El efecto Joule es el calentamiento del conductor debido a la resistencia del mismo.

El efecto magnético se refiere al calentamiento del conductor debido al flujo magnético cíclico que causa calentamiento por corrientes de Foucault, histéresis y viscosidad magnética. Normalmente se desprecia en conductores no ferrosos, pero puede ser significativo para conductores con núcleo de acero.

El efecto skin produce un aumento de la resistencia del conductor en función de la frecuencia.

En general, la evaluación del calentamiento por intensidad, en conductores de núcleo de acero, es realizado de manera más adecuada teniendo en cuenta el hecho de que la potencia de entrada debe ser la misma para intensidades de corriente alterna y corriente continua, para la misma temperatura media del conductor.

• Corriente continua

$$P_j = I^2 R_{dc} \tag{3.4}$$

La resistividad del material a una temperatura determinada se expresa como:

$$\rho = \rho_{20}(1 + \alpha_{20}(T_{av} - 20) + \zeta_{20}(T_{av} - 20)^2)$$
(3.5)

El término cuadrático solo es significativo para temperaturas muy elevadas.

• Corriente alterna. Efecto skin

En el procedimiento anterior definido por CIGRE [CIG92] se establece un valor concreto como aproximación del coeficiente de efecto skin k_{sk} . En cambio, en la nueva guía [CIG14] puede obtenerse a través de las funciones de Bessel o a través de un gráfico de aproximación en el que el coeficiente depende de la relación entre el radio del núcleo y el radio total del conductor.

$$P_j = k_{sk} I^2 R_{dc} \tag{3.6}$$

• Calentamiento por efecto magnético

El calentamiento por efecto magnético se divide entre el calentamiento producido en el núcleo y el calentamiento producido por la redistribución de la corriente en las capas no ferrosas del conductor. En la mayoría de los casos en líneas de transmisión este calentamiento es despreciable.

3.2.4. Calentamiento por radiación solar

El cálculo del calentamiento por radiación solar tiene en cuenta la radiación global de manera que será

$$P_s = \alpha_s I_T D \tag{3.7}$$

Los valores de α_s varían en función de la antigüedad del conductor, desde 0,2 para un conductor nuevo brillante hasta 0,9 para un conductor desgastado en ambientes industriales.

La radiación global es fácilmente medible a través de piranómetros. Este procedimiento plantea la duda de extrapolar medidas puntuales a toda la línea en la medición de la radiación solar por lo que establece un cálculo de la radiación teórica para ser conservadores.

En el caso del cálculo teórico se realiza una combinación entre la radiación solar directa en un plano perpendicular a los rayos del sol, I_B , la radiación solar difusa en un plano horizontal, I_d , y la radiación reflejada procedente del suelo o albedo, F.

$$P_s = \alpha_s D[I_B(\sin(\eta) + \frac{\pi}{2}F\sin(H_s)) + I_d(1 + \frac{\pi}{2}F)]$$
(3.8)

En primer lugar, se define la radiación solar directa a nivel del mar.

$$I_{B(0)} = N_S \frac{1280\sin(H_s)}{\sin(H_s) + 0.314}$$
(3.9)

Posteriormente, se le aplica un factor dependiente de la altura a la que está situado el conductor.

$$I_{B(y)} = I_{B(0)} \left[1 + 1.4 \cdot 10^{-4} y \left(\frac{1367}{I_{B(0)}} - 1 \right) \right]$$
(3.10)

En el caso de CIGRE [CIG92] no se aplicaba el factor de claridad N_S ni la corrección por altura del conductor.

El ángulo de los rayos solares con respecto al eje del conductor se define como

$$\eta = \arccos[\cos(H_s)\cos(\gamma_s - \gamma_c)] \tag{3.11}$$

Siendo la altitud solar

$$H_s = \arcsin[\sin(\varphi)\sin(\delta_s) + \cos(\varphi)\cos(\delta_s)\cos(Z)]$$
(3.12)

el azimut del sol γ_s

$$\gamma_s = \arcsin\left[\frac{\cos(\delta_s)\sin(Z)}{\cos(H_s)}\right] \tag{3.13}$$

y la declinación del sol δ_s

$$\delta_s = 23,3 \sin\left[\frac{2\pi(284+N)}{365}\right]$$
(3.14)

La hora solar Z se calcula a través de la siguiente expresión

$$Z = 15(12 - hora) \tag{3.15}$$

En cuanto a la radiación difusa I_d está relacionada con la radiación directa por la expresión

$$I_d = (430, 5 - 0, 3288I_B)\sin(H_s) \tag{3.16}$$

Por último, el albedo F tiene valores dependientes de la superficie yendo desde 0,05 para agua hasta 0,8 para nieve.

3.2.5. Distribución de la temperatura del conductor

A altas densidades de corriente la temperatura que alcanza el núcleo del conductor se transfiere a las capas externas del mismo produciendo un descenso de la temperatura. Este descenso puede ser significativo en algunos tipos de conductores.

• Distribución radial de la temperatura

El calor generado en las capas internas del conductor se transfiere a las capas externas por conducción, convección y radiación. Este calor depende de muchas variables difíciles de modelar. En el procedimiento planteado en CIGRE se establece la ecuación 3.17 como modelo de transferencia del calor en el interior de los conductores.

Para conductores de núcleo hueco o con núcleo de acero se utiliza la fórmula,

$$T_c - T_s = \frac{P_T}{2\pi\lambda} \left[\frac{1}{2} - \frac{D_1^2}{D^2 - D_1^2} \ln \frac{D}{D_1} \right]$$
(3.17)

En el caso de conductores de aluminio o aleaciones de aluminio se establece que $D_1 = 0$.

$$T_c - T_s = \frac{P_T}{4\pi\lambda} \tag{3.18}$$

El coeficiente λ es la clave para la determinación del gradiente de temperatura.

• Distribución longitudinal de la temperatura

En el nuevo procedimiento descrito por CIGRE TB601 [CIG14] se plantea la distribución de temperatura longitudinal mientras que el antiguo [CIG92] no lo hace.

En general, las variaciones de temperatura a lo largo de la línea pueden ser muy elevadas, ya que para líneas muy largas las condiciones ambientales en diferentes puntos pueden ser muy distintas. La monitorización a través de múltiples estaciones meteorológicas puede ser una solución.

3.2.6. Refrigeración por convección

La refrigeración por convección es el término más importante en el procedimiento de cálculo. La superficie del conductor calienta el aire cercano a él y la densidad de éste disminuye causando que el aire ascienda, ya sea en el caso de convección natural (V = 0), como arrastrado en convección forzada. El aire frío ocupa el sitio del aire caliente refrigerando así el conductor. La refrigeración por convección se calcula a través de la fórmula,

$$P_c = \pi \lambda_f (T_s - T_a) \, N u \tag{3.19}$$

Se resumen, a continuación, las formulaciones de convección forzada y natural según el procedimiento de CIGRE TB601 [CIG14]

donde:

$$\lambda_f = 2,368 \cdot 10^{-2} + 7,23 \cdot 10^{-5} T_f - 2,763 \cdot 10^{-8} T_f 2 \tag{3.20}$$

y T_f es:

$$T_f = 0.5(T_s + T_a) \tag{3.21}$$

Existen dos posibles situaciones en las que el comportamiento es diferente:

- Convección forzada
 - Flujo de viento perpendicular

$$Re = \frac{DV}{v_f} \tag{3.22}$$

siendo $v_f = \mu_f / \gamma$. La viscosidad dinámica se expresa como,

$$\mu_f = (17,239 + 4,635 \cdot 10^{-2}T_f - 2,03 \cdot 10^{-5}T_f^2) \cdot 10^{-6}$$
(3.23)

La densidad del aire depende de la altura del conductor y de la temperatura de la película.

$$\gamma = \frac{1,293 - 1,525 \cdot 10^{-4}y + 6,379 \cdot 10^{-9}y^2}{1 + 0,00367T_f}$$
(3.24)

De entre todas las correlaciones definidas en la literatura técnica, el procedimiento de CIGRE [CIG14] utiliza la de Morgan [Mor73].

$$Nu_{90^{\circ}} = BRe^n \tag{3.25}$$

Los valores B y n se representan en la tabla 3.2 con

$$R_s = \frac{d}{2(D-d)} \tag{3.26}$$

TABLA 3.2: Coeficientes $B \ge n$ para el cálculo del número de Nusselt para vientos perpendiculares.

Conductores sin rugosidad			Conductor	rugoso	Rs < =0,05	Conductor	rugoso	Rs > 0,05
Re	B	n	Re	B	n	Re	B	n
35-5000	0,583	$0,\!471$	100-2650	0,641	0,471	100-2650	0,641	$0,\!471$
5000-50000	0,148	$0,\!633$	2650 - 50000	0,178	0,633	2650-50000	0,048	0,800
50000-200000	0,0208	0,814	-	-	-	-	-	-

• Dirección del viento

La ecuación 3.25 es válida sólo para vientos perpendiculares. Teniendo en cuenta que la dirección del viento juega un papel muy importante en la convección forzada, se necesitan expresiones que lo modelen. El número de Nusselt permite considerar otras orientaciones, ya que varía con el seno del ángulo de ataque del viento δ (respecto del eje del conductor). Las siguientes ecuaciones se basan en las aproximaciones de Morgan [Mor73].

Para conductores sin rugosidad

$$\frac{Nu_{\delta}}{Nu_{90^{\circ}}} = \sin^2(\delta) + 0.0169 \cos^2(\delta))^{0.225}$$
(3.27)

Para conductores trenzados con ángulo de ataque menor o igual de 24 $^{\circ}$

$$\frac{Nu_{\delta}}{Nu_{90^{\circ}}} = (0.42 + 0.68(\sin(\delta))^{1.08}$$
(3.28)

Para conductores trenzados con ángulo de ataque mayor de 24 $^\circ$

$$\frac{Nu_{\delta}}{Nu_{90^{\circ}}} = 0.42 + 0.58(\sin(\delta))^{0.9}$$
(3.29)

Estas ecuaciones son válidas para Re < 4000.

Para velocidades pequeñas (V < 0.5m/s), los registros de viento muestran que no hay una dirección de viento predominante.

• Régimen turbulento

Las turbulencias producen un efecto considerable en la refrigeración del conductor para vientos elevados. Sin embargo, es muy difícil evaluarlas en las líneas aéreas.

Convección natural

$$Nu_{nat} = A(GrPr)^m \tag{3.30}$$

Los valores de la ecuación 3.30 se representan en la tabla 3.3.

Rang	go Gr.Pr		
de	a		m
10^{1}	10^{2}	1,020	0,148
10^{2}	10^{4}	0,850	0,188
10^{4}	10^{7}	0,480	$0,\!250$
10^{7}	10^{12}	0,125	0,333

TABLA 3.3: Coeficientes para el calculo del número de Nusselt en condiciones de convección natural.

La inclinación del conductor con respecto a la horizontal reduce la refrigeración por convección. En la práctica las líneas eléctricas tienen diferentes ángulos de inclinación respecto a la horizontal a lo largo de la línea, ya que siguen un perfil de catenaria, por lo que no es muy significativo el coeficiente de corrección.

Velocidades bajas

Para vientos bajos existen diferentes tipos de enfoques que modelan el comportamiento de los conductores pero, en general, es muy complicado evaluarlo en la realidad. En el procedimiento TB601 se recomienda que, sin tener en cuenta si es convección natural o forzada, se calcule ambos números de Nusselt y se utilice el valor más elevado.

3.2.7. Refrigeración por radiación

La refrigeración por radiación es una pequeña fracción del total, especialmente con convección forzada. En general, la pequeña diferencia entre la temperatura ambiente y la del conductor hace que este término se pueda considerar despreciable, excepto en los casos de temperaturas del conductor muy altas. En el procedimiento de CIGRE [CIG14] se plantea la división de la refrigeración total en dos términos, el primero debido a la radiación del suelo y los alrededores y la segunda de la radiación al cielo.

$$P_r = \pi D\sigma_B F_{c-g} \epsilon_s [(T_s + 273)^4 - (T_g + 273)^4] + \pi D\sigma_B F_{c-sky} \epsilon_s [(T_s + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4]$$
(3.31)

En la práctica es más sencillo obtener la temperatura del conductor T_s y la temperatura ambiente T_a que obtener la temperatura del suelo T_g y la del cielo T_{sky} .

$$P_r = \pi D\sigma_B \epsilon_s [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$$
(3.32)

El valor de la emisividad ϵ_s aumenta rápidamente con la edad del conductor desde 0,2-0,3 cuando es nuevo a 0,8-0,9 con uno o dos años en operación en ambientes industriales. En [Die16] se proponen valores experimentales para diferentes conductores y niveles de envejecimiento que también se encuentran resumidos en el apartado 6.3.

3.2.8. Estado no estacionario

En los modelos térmicos simplificados se suele considerar el estado estacionario, es decir, en cada instante que se realiza el cálculo todos los parámetros son constantes durante un tiempo suficiente.

En la realidad ni los parámetros meteorológicos ni el estado del conductor (temperatura e intensidad) son constantes durante tiempos prolongados, por lo que para realizar un análisis lo más realista posible es necesario introducir parámetros de estado no estacionario.

Los cambios en la temperatura del conductor pueden tenerse en cuenta añadiendo un parámetro a la ecuación de equilibrio térmico.

$$mc\frac{dT_{av}}{dt} = P_J + P_M + P_s - P_c - P_r$$
 (3.33)

Este nuevo término considera la inercia térmica del conductor, por lo tanto, el resultado del estado actual dependerá del estado anterior del conductor.

3.3. IEEE

De la misma manera que en el procedimiento anterior, IEEE define en su norma "IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors" [IEE12] una guía para la obtención del estado térmico de conductores aéreos a través de la ecuación de equilibrio. Tanto los parámetros de los que depende el algoritmo como las opciones de cálculo que existen son las mismas que las definidas en el apartado 3.2.

Este procedimiento se basa en los estudios de House and Tuttle [HTb1] modificados por el ECAR [Panpe].

3.3.1. Nomenclatura

En la tabla 3.4 se describe la nomenclatura utilizada.

TABLA 3.4: Nomenclatura de las variables asociadas al procedimiento IEEE.

Símbolo	Descripción	Unidades
A'	Área del conductor proyectada	m^2/m
	Continuación er	1 la siguiente página

Símbolo	Descripción	Unidades
C	Azimut solar constante	0
D_0	Diámetro exterior del conductor	m
H_c	Altitud del sol	0
H_{e}	Elevación del conductor sobre el nivel del mar	m
Ι	Intensidad del conductor	A
I_D	Radiación solar medida	W/m^2
K_{angle}	Factor de dirección del viento	-
K_{solar}	Factor de corrección por altura	-
k_{f}	Conductividad térmica del aire radial efectiva	$W/m^{\circ}C$
Lat	$\operatorname{Latitud}$	0
mCp	Capacidad calorífica total del conductor	$J/m^{\circ}\mathrm{C}$
N	Día del año	-
N_{Re}	Número de Reynolds	-
q_{cn}	Refrigeración por convección natural	W/m
q_{c1}	Refrigeración por convección forzada a vientos bajos	W/m
q_{c2}	Refrigeración por convección forzada a vientos altos	W/m
q_c	Refrigeración por convección forzada final	W/m
q_j	Calentamiento por efecto Joule	W/m
q_r	Refrigeración por radiación	W/m
q_s	Calentamiento por radiación solar	W/m
Q_s	Radiación solar total	W/m^2
Q_{se}	Radiación solar total corregida por altitud	W/m^2
$R(T_{avg})$	Resistencia de corriente alterna a temperatura Tavg	Ω/m
T_a	Temperatura ambiente	$^{\circ}\mathrm{C}$
T_{avg}	Temperatura media de las capas de aluminio	$^{\circ}\mathrm{C}$
T_s	Temperatura superficial del conductor	$^{\circ}\mathrm{C}$
T_{film}	Temperatura medida de la capa límite del conductor	$^{\circ}\mathrm{C}$
V_w	Velocidad de viento	m/s
X	Azimut solar variable	-
Z_c	Azimut del sol	0
Z_1	Azimut de la línea	0
α	Absortividad solar	-
δ	Declinación solar	0
ϵ	$\operatorname{Emisividad}$	-
ϕ	Ángulo entre el viento y el eje del conductor	0
$ ho_f$	Densidad del aire	Kg/m^3
θ	Ángulo efectivo de incidencia de los rayos del sol	0
μ_f	Viscosidad dinámica del aire	Kg/ms
ω	Hora solar	0

Tabla 3.4 - Continuación de la página anterior

3.3.2. Equilibrio térmico

Para un conductor desnudo, si la temperatura del conductor superficial es T_s y los parámetros ambientales en estado estacionario V_w , ϕ , T_a y I_D son conocidos, las pérdidas de calor debidas a convección y a radiación, q_c y q_r , el valor de calentamiento por

radiación solar, q_s , y la resistencia del conductor, $R(T_{avg})$, pueden ser calculadas fácilmente. En IEEE [IEE12] también se desprecia el término del efecto de magnetización. La intensidad se obtiene de la ecuación de equilibrio térmico.

$$q_c + q_r = q_s + I^2 R(T_{avg}) aga{3.34}$$

El cálculo de la ampacidad, se basa en la expresión

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_{avg})}} \tag{3.35}$$

3.3.3. Calentamiento por intensidad

Como se ha expuesto en la ecuación anterior, el parámetro relativo al calentamiento por efecto Joule se expresa como:

$$q_j = I^2 R(T_{avg}) \tag{3.36}$$

3.3.4. Calentamiento por radiación solar

Para la radiación solar, al contrario que en CIGRE [CIG14], se tiene en cuenta una ecuación sencilla basada en valores tabulados. En el caso de IEEE [IEE12] el valor de Q_{se} se puede sustituir por los valores de irradiancia medidos por el piranómetro en el caso de que se monitorice la radiación solar. En el caso de medida teórica Q_{se} depende del tipo de atmósfera donde esté la línea, de la altitud solar en ese momento y de la altitud de la línea. En cuanto a las ecuaciones relativas al sol, altura solar, ángulo de incidencia, hora solar, etc. son similares a las que plantea CIGRE [CIG14].

$$q_s = \alpha Q_{se} \sin(\theta) A' \tag{3.37}$$

El ángulo de incidencia del haz solar se calcula como

$$\theta = \arccos[\cos(H_c)(Z_c - Z_1)] \tag{3.38}$$

donde

$$H_c = \arcsin[\cos(Lat)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(Lat)\sin(\delta)]$$
(3.39)

$$\omega = 15(hora - 12) \tag{3.40}$$

$$\delta = 23,46 \sin\left[\frac{284+N}{365}360\right] \tag{3.41}$$

El azimut del sol también se basa en valores tabulados

$$Z_c = C + \arccos(X) \tag{3.42}$$

$X = \frac{1}{\sin(Lat)\cos(Lat)}$	(3.43)		
Ángulo horario (ω)	$C ext{ si } X \leq 0$	$C ext{ si } X > 0$	
-180 $<\!\omega\!<\!0$	0	180	
$0{<}\omega{<}180$	180	360	

Por otro lado, la intensidad solar se obtiene mediante las siguientes ecuaciones, diferenciando entre atmósfera limpia e industrial.

$$Q_s = A + BH_c + CH_c + D^2H_c + E^3H_c^4 + FH_c^5 + GH_c^6$$
(3.44)

- Atmósfera limpia
 - A = -42,2391 B = 63,8044 C = -1,9220 $D = 3,46921 \cdot 10^{-2}$ $E = -3,61118 \cdot 10^{-4}$ $F = 1,94318 \cdot 10^{-6}$
 - $G = -4,07608 \cdot 10^{-9}$
- Atmósfera industrial
 - $$\begin{split} A &= 53,1821 \\ B &= 14,2110 \\ C &= 6,6138 \cdot 10^{-1} \\ D &= -3,1658 \cdot 10^{-2} \\ E &= 5,4654 \cdot 10^{-4} \\ F &= -4,3446 \cdot 10^{-6} \\ G &= 1,13236 \cdot 10^{-8} \end{split}$$

$$Q_{se} = K_{solar} Q_s \tag{3.45}$$

donde el factor de corrección por elevación es

$$K_{solar} = A + BH_e + CH_e^2 \tag{3.46}$$

 $\begin{array}{l} A = 1 \\ B = 1,148 \cdot 10^{-4} \\ C = -1,108 \cdot 10^{-8} \end{array}$

3.3.5. Refrigeración por convección

Como se ha indicado, el viento juega un papel decisivo en los mecanismos de refrigeración del conductor. De la misma manera que en CIGRE [CIG14], la refrigeración por convección se divide en dos tipos: forzada y natural. Dentro de todas las investigaciones realizadas respecto a la convección, IEEE [IEE12] utiliza las ecuaciones desarrolladas por McAdams [McA54]. En primer lugar se define el número de Reynolds como

$$N_{Re} = \frac{D_0 \rho_f V_w}{\mu_f} \tag{3.47}$$

Convección forzada

Existen diferentes expresiones para obtener la refrigeración por convección dependiendo del viento al que esté sometido el conductor.

• Vientos bajos

$$q_{c1} = K_{angle} [1,01+1,35 \ N_{Re}^{0,52}] k_f (T_s - T_a)$$
(3.48)

• Vientos altos

$$q_{c2} = K_{angle} 0.754 \cdot N_{Re}^{0.6} \cdot k_f \cdot (Ts - Ta)$$
(3.49)

siendo:

$$K_{angle} = 1,194 - \cos(\phi) + 0,194\cos(2\phi) + 0,368\sin(2\phi)$$
(3.50)

La ecuación de corrección de la refrigeración por convección por la dirección del viento se basa en los estudios de Davis [Dav77].

Convección natural

La convección natural se establece para vientos nulos

$$q_{cn} = 3.645\rho_f^{0.5} D_0^{0.75} \cdot (Ts - Ta)^{1.25}$$
(3.51)

La solución más adecuada para vientos bajos es, al igual que para CIGRE [CIG14], la elección del término más alto.

Los valores de los parámetros, de los que dependen las ecuaciones, se presentan a continuación

$$T_{film} = \frac{Ts + Ta}{2} \tag{3.52}$$

Donde la viscosidad dinámica es

$$\mu_f = \frac{1,45810^{-6} (T_{film} + 273)^{1,5}}{T_{film} + 383,4}$$
(3.53)

y la densidad del aire

$$\rho_f = \frac{1,293 - 1,525 \cdot 10^{-4} H_e + 6,379 \cdot 10^{-9} H_e^2}{1 + 0,00367 \cdot T_{film}}$$
(3.54)

Por último, se define la conductividad térmica del aire como

$$k_f = 2,424 \cdot 10^{-2} + 7,477 \cdot 10^{-5} T_{film} - 4,407 \cdot 10^{-9} T_{film}^2$$
(3.55)

3.3.6. Refrigeración por radiación

La importancia de la refrigeración por radiación en el estado del conductor se basa principalmente en la diferencia entre la temperatura del conductor y la temperatura ambiente. Para determinar de manera óptima la refrigeración por radiación es importante conocer la emisividad del conductor, ϵ . La emisividad es un parámetro de difícil estimación ya que varía mucho con la edad y entorno del conductor.

$$q_r = 17,8D_0\epsilon \left[\left(\frac{Ts + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{Ta + 273}{100} \right)^4 \right]$$
(3.56)

3.3.7. Estado no estacionario

Como se desarrolló en la descripción del modelo planteado por CIGRE, en los modelos simplificados se considera el estado estacionario, es decir, todos los valores que entran en juego en el cálculo de la ampacidad o de la temperatura se establecen constantes. En la realidad, es complicado asumir esta consideración, ya que ni los parámetros meteorológicos ni el estado del conductor (temperatura e intensidad) son constantes durante tiempos prolongados. Por lo tanto, es necesario incluir ecuaciones de estado no estacionario. La ecuación de estado estacionario descrita a continuación establece como única condición no estacionaria la temperatura del conductor.

$$q_c + q_r + mC_p \frac{dT_{avg}}{dt} = q_s + I^2 R(T_{avg})$$
(3.57)

Capítulo 4

Escenario práctico y gestión de datos

4.1. Definición del escenario práctico

Las aportaciones planteadas por esta tesis necesitan un escenario práctico en el que probar los modelos para demostrar su eficacia. El sistema de referencia para realizar todos los análisis de la tesis está formado por una red de distribución de 132 kV situada en el norte de España. De esta red se monitorizará una línea de 30 km de longitud y con un conductor LA-280.

La línea cuenta con 5 estaciones meteorológicas situadas tanto en las cabeceras como en diferentes apoyos a lo largo de la línea. Las estaciones meteorológicas nos aportan los datos necesarios para el cálculo de la ampacidad, es decir, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento e irradiancia.

La línea cuenta con un sistema de medida de la temperatura distribuida que permite observar su perfil longitudinal de temperatura. Además, se monitoriza la intensidad de la línea, haciendo posible calcular la temperatura del conductor con la intensidad, así como verificar la precisión del cálculo comparándolo con la temperatura del conductor medida.

A continuación, se adjuntan los datos necesarios para los cálculos de ampacidad y temperatura del conductor.

- 1. Características del conductor
 - Diámetro exterior : 2,18 cm
 - Diámetro interior alma acero: 0,804 cm
 - Resistencia a 20 °C: $0,1194 \ \Omega/km$
 - Coeficiente de resistencia a la temperatura por grado: 0,00410 1/°C
 - Coeficiente de dilatación: $18, 9 \times 10^{-6}$
 - Módulo de elasticidad: 7700 kg/mm^2
 - Masa por unidad de longitud: $0.977 \ kg/m$
 - Sección: 281,1 mm²
 - Capacidad calorífica: 800 J/kgK
 - Temperatura máxima del conductor: 80 °C

- Límite estático establecido: 572 A
- 2. Características de la instalación
 - Altitud sobre el nivel del mar: 622 m
 - Orientación respecto al norte: eje de la línea 31°

Se cuenta con un histórico tanto de datos meteorológicos como de intensidad y temperatura del conductor desde Julio de 2012. Aunque no es un registro continuo, existe gran cantidad de datos para poder realizar los diferentes análisis.

En cuanto al sensor de temperatura, se divide la línea en 20 cantones o secciones diferenciados por los cambios de ángulos en la dirección de la línea. El sistema de medida de temperatura obtiene una medida por cantón en cada instante de monitorización.

4.2. Creación de una base de datos relacional

Debido a la gran cantidad de datos generada, tanto por las estaciones meteorológicas como por los sensores de intensidad y temperatura, es necesaria la creación de una base de datos que facilite tanto el almacenamiento automático de los mismos, como su gestión posterior para los diferentes análisis a realizar. Se ha elegido un modelo de base de datos relacional, que se ha implementado sobre Microsoft SQL Server[®].

La base de datos se estructura por filas, en la que cada una de ellas corresponde a un instante de tiempo; en cada columna se almacenan los diferentes tipos de datos. El intervalo de tiempo entre cada registro es de ocho minutos, ya que es el intervalo de tiempo en el que las estaciones meteorológicas y los sensores envían los datos.

Se almacenan en tiempo real los valores aportados por los sensores, fecha, estación meteorológica, temperatura ambiente, velocidad de viento, dirección de viento, radiación solar, temperatura del conductor en cada punto de medida e intensidad de la línea. Adicionalmente, se construirán tablas que almacenarán los resultados tanto de gestión dinámica como de su planificación a corto plazo. Estas tablas facilitan la gestión de datos y la presentación de resultados. La utilización de un modelo de base de datos relacional posibilita la utilización de filtros SQL, así como su integración con herramientas de análisis como Matlab[®], R[®], Python[®] o .NET.

Capítulo 5

Metodología y análisis del emplazamiento de los sensores

5.1. Introducción

Como se ha indicado en el capítulo 1, el objetivo principal de esta tesis es la implantación y optimización de un sistema de monitorización continua de la capacidad dinámica de los conductores en una línea. Para la obtención de este objetivo es necesaria la realización de estudios previos que permitan definir los sensores de monitorización necesarios, su ubicación y la metodología a seguir para extrapolar los resultados de la línea en estudio a otras líneas. De esta manera, se crea una metodología que facilita la implantación de este sistema de monitorización en otras líneas, sin la necesidad de instalar más sensores de los necesarios.

En el apartado 2.1, se definen las necesidades para gestionar una línea eléctrica desde el punto de vista de la capacidad dinámica de la misma. Se requiere la implantación de diferentes sensores, tales como: estaciones meteorológicas que monitoricen temperatura ambiente, viento y radiación solar, medidores de intensidad y sensores de temperatura del conductor. El objetivo principal de este sistema es la obtención de la capacidad de la línea. En general, se entiende la capacidad de la línea como la intensidad máxima que puede ser transportada por una línea. Esta capacidad depende de las condiciones meteorológicas que son variables a lo largo de la línea. Por lo tanto, se define la capacidad de la línea como la capacidad del punto de la línea que tenga unas condiciones meteorológicas más restrictivas.

La situación de los sensores meteorológicos es un parámetro crítico en el estudio de la capacidad de los conductores, debiendo ser instalados en las zonas con condiciones meteorológicas más restrictivas; temperatura ambiente alta, vientos efectivos bajos e irradiancias elevadas.

5.2. Metodología de elección del emplazamiento óptimo de los sensores

5.2.1. Consideraciones previas

El sistema a instalar, como se ha definido en el apartado anterior consta de:

- Estaciones meteorológicas:
 - Termohigrómetro.
 - Anemoveleta ultrasónica.
 - Piranómetro.
- Sensores de medida de la temperatura superficial del conductor.
- Sensor de medida de la intensidad.

El sistema de medida de la temperatura óptimo sería un sistema de medida distribuida, ya que de esa manera se obtiene de forma más precisa el perfil de temperatura del conductor a lo largo de toda la línea. También se ha planteado la utilización de varios sensores de medida de la temperatura, ya que la instalación de un sistema de medida distribuida a través de fibra óptica resulta muy costoso en líneas ya existentes.

Ante la imposibilidad de monitorizar las variables meteorológicas de la línea de manera continua se deben instalar m estaciones meteorológicas que permitan adquirir suficientes datos meteorológicos para caracterizar lo mejor posible toda la línea. Tanto la cantidad como la situación de estas estaciones meteorológicas se define a través de un estudio microclimático previo de las características ambientales y de las peculiaridades de la zona donde se encuentra la línea. Este estudio se realiza con históricos de variables meteorológicas que son captadas en zonas cercanas al emplazamiento de la línea pero no directamente en el propio emplazamiento, por lo que una vez instaladas las estaciones se obtendrán datos más locales que definen claramente los gradientes de temperatura ambiente, viento y radiación a lo largo de la línea.

A través del estudio de los históricos de estas variables se obtienen las claves necesarias para la creación de una metodología que permita la implantación de un sistema de monitorización de carácter discreto.

Las secciones en las que se divide la línea son un parámetro importante a la hora de plantear la metodología para el emplazamiento de los sensores. Para el estudio las líneas eléctricas, estas son divididas en secciones, también denominados cantones, en las que cada una de ellas contiene vanos consecutivos sin cambio de dirección. En la figura 5.1 se observa la forma de dividir una línea. En el caso práctico planteado en este trabajo, se cuenta con una línea eléctrica dividida en 20 secciones.



FIGURA 5.1: Relación entre vanos y secciones.

5.2.2. Análisis de sensibilidad de los parámetros meteorológicos en los procedimientos de cálculo del comportamiento térmico de los conductores

Un paso previo necesario para la localización óptima de los sensores es el análisis de sensibilidad de los parámetros meteorológicos en los procedimientos de cálculo de comportamiento térmico de los conductores. De esta manera, se tendrá claro qué parámetros afectan en mayor medida a los resultados de capacidad del conductor para aportarles mayor peso en la toma de decisión en cuanto a la ubicación.

Es necesario tener en cuenta que las variables meteorológicas no afectan de la misma manera al conductor. La relevancia de cada variable en el procedimiento viene dada por las ecuaciones definidas tanto por CIGRE [CIG92] como por IEEE [IEE12].

Para definir claramente cómo afecta cada variable meteorológica al conductor se plantea un análisis de sensibilidad en el que se estudian diferentes casos para ambos procedimientos.

Análisis de sensibilidad del viento efectivo

El viento efectivo correspondiente al viento medido por la estación meteorológica (velocidad y dirección) se define como el viento perpendicular a la línea, de manera que la refrigeración aportada por este sea la misma que la aportada por el viento medido. Para realizar el estudio de sensibilidad respecto al viento efectivo se plantean como entradas a los procedimientos de cálculo de IEEE 3.3 y CIGRE 3.2 diferentes valores de viento con ángulos de ataque de 90°.

En este apartado se plantea cómo afecta la variación del viento en el cálculo de la capacidad, para diferentes escenarios de temperatura y radiación solar.

Los casos que se han considerado para el estudio son los siguientes:

- CASO 1: noche, a diferentes escalones de temperatura ambiente y variando el viento efectivo de 0 a 1 m/s.
- CASO 2: noche, a diferentes escalones de temperatura ambiente y variando el viento efectivo de 1 a 10 m/s.
- CASO 3: noche, a diferentes escalones de temperatura ambiente y variando el viento efectivo de 10 a 20 m/s.

A través de estos casos se puede discretizar cómo afecta cada parámetro a la capacidad de la línea. El método más inmediato, para identificar la afección de los parámetros a la capacidad, es la pendiente de las curvas de capacidad en cada escenario.

En estos casos se debe observar la variabilidad de la capacidad respecto al viento efectivo. Por lo tanto, si se observan pendientes altas en las curvas de capacidad se entiende que para pequeñas variaciones en el viento se obtienen grandes variaciones de la capacidad, por lo que en esta situación el viento sería un parámetro crítico. Al plantear diferentes tramos en los rangos de vientos: 0-1 m/s, 1-10 m/s y 10-20 m/s, se discretiza mejor la curva de capacidad, observando que dependiendo del rango de los vientos las pendientes cambian.

• CASO 4: radiación media, a diferentes escalones de temperatura ambiente y variando el viento efectivo de 0 a 1 m/s.

- CASO 5: radiación media, a diferentes escalones de temperatura ambiente y variando el viento efectivo de 1 a 10 m/s.
- CASO 6: radiación media, a diferentes escalones de temperatura ambiente y variando el viento efectivo de 10 a 20 m/s.

En estos casos se debe realizar el mismo procedimiento que en los casos 1, 2 y 3, ya que la única diferencia es que se ha aumentado el escalón de radiación. Si las pendientes son mayores que en los casos anteriores, se puede deducir que la radiación afecta más a los procedimientos de cálculo cuando tiene un valor medio que cuando tiene un valor nulo. Si las pendientes son similares se entiende que la radiación solar afecta a la capacidad de manera lineal.

- CASO 7: radiación alta, a diferentes escalones de temperatura ambiente y variando el viento efectivo de 0 a 1 m/s.
- CASO 8: radiación alta, a diferentes escalones de temperatura ambiente y variando el viento efectivo de 1 a 10 m/s.
- CASO 9: radiación alta, a diferentes escalones de temperatura ambiente y variando el viento efectivo de 10 a 20 m/s.

Por último, se realiza el mismo procedimiento para radiaciones altas con el objetivo de observar si el peso de la variable radiación afecta en mayor medida con rangos de radiaciones altas.

Análisis de sensibilidad de la temperatura ambiente

La criticidad de la temperatura ambiente se evalúa de la misma manera que el viento efectivo, planteando una variabilidad de la temperatura en diferentes escenarios de radiación solar y viento efectivo.

Los casos que se han planteado para el estudio son los siguientes:

- CASO 1: noche, a diferentes escalones de viento efectivo y variando la temperatura de -5 a 5 °C.
- CASO 2: noche, a diferentes escalones de viento efectivo y variando la temperatura de 5 a 20 °C.
- CASO 3: noche, a diferentes escalones de viento efectivo y variando la temperatura de 20 a 30 °C.

Las conclusiones respecto a estos casos se evalúan de la misma manera que para el viento efectivo; se plantean las pendientes de las curvas de capacidad y se estudia para cada caso si las pendientes son elevadas, otorgando un peso más significativo a esa variable en el procedimiento. En caso contrario, si son bajas, la ponderación de la variable en el procedimiento será menor.

 CASO 4: radiación media, a diferentes escalones de viento efectivo y variando la temperatura de -5 a 5 °C.

- CASO 5: radiación media, a diferentes escalones de viento efectivo y variando la temperatura de 5 a 20 °C.
- CASO 6: radiación media, a diferentes escalones de viento efectivo y variando la temperatura de 20 a 30 °C.

Con los diferentes casos, al igual que con el viento efectivo, se puede definir el peso relativo que tiene la radiación en el procedimiento de cálculo de la capacidad a través del cambio de pendiente respecto a las obtenidas con radiación nula, media o elevada.

- CASO 7: radiación alta, a diferentes escalones de viento efectivo y variando la temperatura de -5 a 5 °C.
- CASO 8: radiación alta, a diferentes escalones de viento efectivo y variando la temperatura de 5 a 20 °C.
- CASO 9: radiación alta, a diferentes escalones de viento efectivo y variando la temperatura de 20 a 30 °C.

Conclusiones

Las conclusiones a remarcar en este apartado se enfocan hacia los valores de las pendientes de las curvas, es decir, en el valor del aumento o disminución de la capacidad del conductor con la variación de una unidad de cada uno de los parámetros meteorológicos.

5.2.3. Estudios meteorológicos estadísticos

Tras realizar un análisis de sensibilidad, se lleva a cabo el análisis estadístico de los datos meteorológicos de cada una de las estaciones meteorológicas instaladas en la línea.

Se considera la agrupación estacional definida por el procedimiento de operación P.O. 1.2 "Niveles admisibles carga red" [Boed] definido por REE como referencia. En la tabla 5.1 se muestra la división por estaciones del año.

ESTACIÓN	MESES
Primavera	Abril y mayo
Verano	Junio, julio y agosto
Otoño	Septiembre y octubre
Invierno	Noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo

TABLA 5.1: División estacional definida en el P.O. 1.2 [Boed].

Análisis estadístico de las variables meteorológicas

En este apartado se calcula la estadística de las estaciones meteorológicas con la división estacional definida anteriormente.

- Velocidad de viento: media mensual de la velocidad de viento.
- Temperatura ambiente: media mensual de la temperatura ambiente en los meses de invierno y media mensual de las temperaturas máximas diarias en el resto de meses del año.
- Radiación: media mensual de la radiación diaria en las horas del sol y media mensual de las radiaciones máximas diarias.

La información que aporta la estadística de cada estación meteorológica permite observar en una primera aproximación qué estaciones tienen valores medios de los parámetros más críticos, es decir, temperaturas y radiaciones elevadas y vientos bajos.

Análisis del viento efectivo

Las estadísticas de viento se obtienen a partir del valor absoluto del mismo. Este valor no es claramente representativo en relación con la capacidad de la línea, ya que no se está teniendo en cuenta su ángulo de ataque. Para tener en cuenta este ángulo se define el parámetro denominado viento efectivo. En la estadística de viento efectivo se establece el viento efectivo mínimo con un 85 % de confianza.

• Cálculo del viento efectivo

El viento efectivo es una variable muy importante para el cálculo de la capacidad de los conductores, ya que engloba la velocidad de viento y el ángulo de ataque del mismo. El objetivo del cálculo del viento efectivo es la obtención de un viento que si fuera perpendicular al conductor produjera la misma refrigeración que el viento medido por la estación meteorológica. Para esa aproximación se debe analizar el procedimiento de cálculo de refrigeración por convección definido por IEEE [IEE12] y CIGRE [CIG14].

IEEE

El procedimiento IEEE plantea tres ecuaciones para el cálculo de la refrigeración debida a la convección. En primer lugar, la refrigeración por convección natural, es decir, para viento cero. En este caso, el cálculo de convección natural no interesa ya que el viento efectivo de un viento con módulo cero es cero. Por otra parte contempla dos ecuaciones: una para vientos bajos y otra para vientos altos¹. El criterio es escoger la más restrictiva, es decir, de la que se obtenga un valor de refrigeración menor. IEEE [IEE12] basa su procedimiento en las ecuaciones de Davis [Dav77].

$$q_{c1} = [1,01+1,35\left(\frac{D\rho_f V}{\nu_f}\right)^{0,52}]k_f K_{angle}(T_c - T_a)$$
(5.1)

¹Se entiende por vientos bajos los menores de 1 m/s.

La ecuación q_{c1} es aplicada para valores bajos de viento. El viento efectivo se obtiene igualando la ecuación con el viento y la dirección medidos con la ecuación con el viento efectivo (dirección perpendicular).

$$\begin{bmatrix} 1,01+1,35\left(\frac{D\rho_f V}{\nu_f}\right)^{0,52} \end{bmatrix} k_f K_{angle}(T_c - T_a) = \\ \begin{bmatrix} 1,01+1,35\left(\frac{D\rho_f V'}{\nu_f}\right)^{0,52} \end{bmatrix} k_f K'_{angle}(T_c - T_a)$$
(5.2)

$$K_{angle} = 1,194 - \cos(\phi) + 0,194\cos(2\phi) + 0,368\sin(2\phi)$$
(5.3)

 $K'_{angle} = 1$ para direcciones de viento perpendiculares a la línea.

$$V' = \sqrt[0.52]{\frac{1,01(K_{angle} - 1)}{1,35(\frac{D\rho_f}{\nu_f})^{0.52}} + V^{0.52}K_{angle}}$$
(5.4)

En el caso de la ecuación q_{c2} se representa el cálculo de la convección debida a vientos altos.

$$q_{c2} = 0.754 \left(\frac{D\rho_f V}{\nu_f}\right)^{0.6} k_f K_{angle} (T_c - T_a)$$
(5.5)

$$0,754 \left(\frac{D\rho_f V}{\nu_f}\right)^{0,6} k_f K_{angle}(T_c - T_a) = 0,754 \left(\frac{D\rho_f V'}{\nu_f}\right)^{0,6} k_f K'_{angle}(T_c - T_a)$$
(5.6)

$$V' = V \sqrt[0.6]{K_{angle}}$$
(5.7)

En el procedimiento de cálculo se utiliza la refrigeración por convección más restrictiva, es decir, se calcula la refrigeración natural, a vientos bajos y a vientos altos y se elige el valor más bajo. Siguiendo este enfoque, para el cálculo del viento efectivo se obtendrá el viento efectivo para vientos bajos y para vientos altos y posteriormente se identificará el valor menor. Sin embargo, existe una limitación en el cálculo de la estadística de vientos efectivos, ya que la ecuación 5.4 incluye términos de viscosidad dinámica y densidad, que dependen directamente de la temperatura del conductor, de la temperatura ambiente y de la altura sobre el nivel del mar. En ese caso, al estar realizando una estadística general, sin contemplar el estado del conductor, la viscosidad dinámica y la densidad no podrían calcularse, por lo cual se realizará el cálculo con la ecuación 5.7 que no contienen estos términos.

CIGRE

En el caso de CIGRE se plantea una única ecuación general.

$$P_c = \pi \lambda_f (T_c - T_a) N u \tag{5.8}$$

En esta ecuación se utilizan diferentes valores para el número de Nusselt dependiendo de diferentes hipótesis:

Convección forzada perpendicular

$$Nu_{90^\circ} = BRe^n \tag{5.9}$$

SiendoByn constantes dependientes del número de Reynolds y de la rugosidad del conductor, como se muestra en la tabla5.2

TABLA 5.2: Coeficientes $B \ge n$ para el cálculo del número de Nusselt para vientos perpendiculares.

Conductores sin rugosidad Conductor rugoso Rs<=0,05		Conductor	rugoso	Rs > 0,05				
Re	B	n	Re	B	n	Re	B	n
35-5000	0,583	$0,\!471$	100-2650	0,641	0,471	100-2650	0,641	$0,\!471$
5000 - 50000	0,148	$0,\!633$	2650 - 50000	0,178	0,633	2650 - 50000	0,048	0,800
50000-200000	0,0208	0,814	-	-	-	-	-	-

Convección forzada no perpendicular

Para ángulos de ataque del viento menor o iguales de 24° :

$$Nu_{\delta} = Nu_{90^{\circ}}(0.42 + 0.68sin(\delta)^{1.08})$$
(5.10)

Para ángulos de ataque del viento mayores que 24°:

$$Nu_{\delta} = Nu_{90^{\circ}}(0.42 + 0.58sin(\delta)^{0.9})$$
(5.11)

Estas ecuaciones se basan en las propuestas por Morgan [Mor73].

Convección natural

$$Nu_{nat} = A(GrPr)^m \tag{5.12}$$

En este caso la convección depende de Grashof y Prandtl. Los valores de la ecuación 5.12 se representan en la tabla 5.3.

De la misma manera que en IEEE, de todos los números de Nusselt se elige el menor.

Con este enfoque y para obtener un viento efectivo que produzca la misma refrigeración por convección que el viento medido, se plantea lo siguiente:

$$Nu_{\delta} = Nu_{90^{\circ}} \tag{5.13}$$

$$Nu_{90^{\circ}} \operatorname{coef}_{Morgan} = Nu'_{90^{\circ}}$$

$$(5.14)$$
Rang	go Gr.Pr		<i>~~~</i>
de	a		m
10^{1}	10^{2}	1,020	0,148
10^{2}	10^{4}	0,850	0,188
10^{4}	10^{7}	0,480	0,250
10^{7}	10^{12}	0,125	0,333

TABLA 5.3: Coeficientes para el calculo del número de Nusselt en condiciones de convección natural.

$$B(\frac{D\rho V}{\nu})^n \operatorname{coef}_{Morgan} = B(\frac{D\rho V'}{\nu})^n$$
(5.15)

$$V' = V \sqrt[n]{coef_{Morgan}}$$
(5.16)

Como se puede observar la forma de la ecuación es la misma que la obtenida en IEEE para vientos altos, pero en este caso la n sería necesaria obtenerla de la tabla 5.2. Observando esa tabla, el número n depende de la rugosidad del conductor y del número de Reynolds. De la misma manera que para IEEE, el número de Reynolds depende de la densidad y de la viscosidad dinámica y estas a su vez de la temperatura del conductor, de la temperatura ambiente y de la altura sobre el nivel del mar. Por lo tanto, ante la imposibilidad de calcular npara realizar la estadística, se toma la decisión de utilizar la n más restrictiva, es decir, la que haga el viento efectivo mínimo. En ese caso la n más restrictiva es la del mínimo valor, 0,471.

• Análisis estadístico del viento efectivo

De la misma manera que el análisis estadístico de las variables meteorológicas, se permite establecer un patrón respecto a las estaciones en las que los vientos efectivos mínimos son menores, estando éstas situadas, por tanto, en una zona crítica respecto a la capacidad de la línea. Las secciones de la línea tienen cada una asociada una estación meteorológica, por lo que cada sección obtendrá la velocidad y dirección del viento medidas de su estación meteorológica asociada. Las secciones tienen cada una dirección respecto al norte, por lo que para un viento medido en una estación se tendrán n vientos efectivos, siendo n el número de secciones asociadas a esa estación.

Se plantearán los dos procedimientos más ampliamente utilizados, Davis [Dav77] y Morgan [Mor73] y se dividirán los resultados por niveles de confianza, ya que es altamente probable que los vientos efectivos mínimos sean nulos o muy pequeños siendo, por tanto, valores no representativos.

Análisis de las rosas de los vientos

Otro análisis necesario, debido al gran peso relativo que tiene el viento en los cálculos de capacidad de los conductores, son las rosas de los vientos. Este estudio

aporta la información necesaria para observar los diferentes perfiles de intensidad y dirección del viento en cada estación meteorológica y poder ver si las direcciones predominantes del viento son paralelas (baja refrigeración) o perpendiculares (alta refrigeración).

En este apartado se representan las rosas de los vientos de cada estación meteorológica por cada estación del año. Se superpone la dirección predominante del viento sobre la dirección de la línea en el tramo en el que la estación meteorológica está instalada, por lo que se pueden obtener conclusiones sobre la perpendicularidad (zonas más refrigeradas) y paralelismo (zonas menos refrigeradas) de los vientos en la línea.

Los procedimientos del cálculo de capacidad de las líneas diferencian entre convección forzada y convección natural. Por lo tanto, para analizar este fenómeno será importante realizar los estudios de rosas de los vientos también para velocidades de viento bajas, por debajo de 1 m/s.

Estudio de la criticidad de las estaciones meteorológicas respecto a cada una de las variables

La criticidad de las estaciones meteorológicas viene dada por las situaciones en las que las variables meteorológicas sean restrictivas en su conjunto, de manera que se obtenga la capacidad de la línea mínima. Este enfoque se analiza más adelante en un apartado dedicado a los resultados de la capacidad de la línea. En este apartado se analiza la criticidad de las estaciones meteorológicas con respecto a cada una de las variables que afectan a la capacidad de la línea. Estas variables, como se ha comentado anteriormente, son el viento efectivo, la temperatura ambiente y la radiación. De esta manera se estudia la frecuencia con que cada estación tiene el viento efectivo mínimo. Posteriormente se examina la frecuencia con que cada estación tiene la temperatura ambiente máxima y por último la frecuencia con que cada estación tiene la radiación máxima.

Con esta metodología se pueden representar histogramas con la frecuencia en que cada estación meteorológica es crítica, con respecto a cada una de las variables meteorológicas. Por lo tanto, se podrán identificar claramente cuales son las estaciones meteorológicas críticas respecto a cada variable. Este estudio, junto al estudio estadístico de las variables, aporta gran información sobre la criticidad de los valores que adquieren cada una de las estaciones.

5.2.4. Estudio de la temperatura del conductor a lo largo de la línea

La temperatura del conductor es la variable más adecuada en cuanto al estudio de la criticidad de cada zona de la línea, ya que engloba todos las variables meteorológicas. Una zona con temperatura crítica establece que en ese punto la combinación de variables meteorológicas es crítica.

Criticidad de las secciones respecto a la temperatura del conductor

La criticidad de las secciones en las que se divide la línea se obtiene a través de un análisis de las temperaturas máximas del conductor. De la misma manera que para la criticidad de la línea respecto a las variables meteorológicas, se representará un histograma con la frecuencia en que cada punto de medición de la temperatura o cada punto definido como representativo es crítico. Este punto debe ser completado con un estudio de las diferencias entre cada una de las secciones y la crítica en cada instante para observar qué grado de criticidad tiene cada sección. Para ello, se calculará la desviación de la temperatura en cada instante respecto a la temperatura crítica y se hará la media. De esta manera se puede representar la criticidad de cada sección con su grado de criticidad. Se establece para el grado de criticidad una escala de colores, en la que el rojo es el mayor grado (temperaturas cercanas a la crítica) y el verde el menor (temperaturas alejadas de la crítica) que permita visualizar de manera sencilla qué zonas de la línea son más criticas cuantitativa y cualitativamente.

Relación entre los cambios de temperatura del conductor y la dirección de la línea

Un estudio interesante, basado en los cambios de dirección de la línea a lo largo de toda su longitud, es la identificación de los cambios bruscos de direcciones y su relación con saltos de temperatura. De esta manera es fácil identificar zonas críticas cuando una zona pase de un ángulo favorable respecto al viento, a uno desfavorable.

Se realiza el estudio estadístico de las diferencias de temperatura entre las secciones contiguas. En este estudio se calcula la estadística de las diferencias en valor absoluto en cada instante de una sección con la siguiente. Un buen sistema para representar los resultados de este estudio es un diagrama de cajas en el que se observen las diferencias medias, máximas y mínimas, así como los cuartiles.

5.2.5. Comparativa entre resultados meteorológicos y de temperatura del conductor

Por último, es necesario realizar una comparativa completa de todos los resultados obtenidos en este apartado. Para ello es interesante comparar la meteorología y la temperatura de la línea. Es inmediato comprender que debe existir cierta relación entre las estaciones que miden los parámetros más críticos y las zonas donde se obtienen temperaturas más elevadas. Realizando una valoración global de todos los estudios debe poder llegarse a la conclusión de que, con ciertos niveles de confianza, existen estaciones muy críticas que son necesarias y estaciones que pueden ser prescindibles.

5.3. Resultados de la aplicación de la metodología a la línea de estudio

En este apartado se aplica la metodología planteada en el apartado 5.2 a la línea de estudio, cuyas características se definen en el apartado 4.1. Para ello, se han seguido las pautas planteadas en la metodología y se han obtenido diferentes conclusiones que establecen los lugares más adecuados para la colocación de los sensores.

5.3.1. Análisis de sensibilidad de los parámetros meteorológicos en los procedimientos de cálculo del comportamiento térmico de los conductores

Análisis de sensibilidad del viento efectivo

La metodología planteada en el apartado 5.2.2 es aplicada al conductor LA-280, cuyas características se han definido en el apartado 4.1.

IEEE

En primer lugar se plantean las condiciones definidas en los casos 1, $2 \ge 3$ del apartado 5.2.2, donde la radiación es nula.



FIGURA 5.2: Evolución de la capacidad del conductor LA-280 con las variaciones de viento efectivo para IEEE.

Para el caso 1, en la figura 5.2 se observa una pendiente media que va desde 192 A/m/s a 0°C hasta 151 A/m/s para 30°C. Por lo tanto en el caso sin radiación y a vientos bajos con aumentos de 1 m/s se aumenta la capacidad entre 192 y 151 A para 0°C y 30°C respectivamente.

Para el caso 2, en la figura 5.2 la pendiente disminuye respecto al caso anterior obteniéndose pendientes medias desde 47 A/m/s a 0°C a 35 A/m/s a 30°C. Se puede asumir, por lo tanto, que a vientos medios sin radiación las capacidades del conductor para incrementos de viento de 1 m/s aumentan entre 47 y 35 A para 0°C y 30°C respectivamente.

Por último, para el caso 3, en la figura 5.2 la pendiente sigue disminuyendo respecto al caso anterior obteniéndose pendientes medias desde 22 A/m/s a 0°C a 17 A/m/s a 30° C. Por lo tanto, se puede asumir que sin radiación y a vientos altos los saltos de capacidad disminuyen respecto a los casos anteriores obteniéndose incrementos de entre 22 y 17 A para aumentos de viento efectivo de 1 m/s para 0°C y 30°C respectivamente.

CIGRE



ciones definidas en los casos 1, 2 y 3 en 5.2.2, donde la radiación es nula.

Para el procedimiento de CIGRE, al igual que para IEEE, se plantean las condi-

FIGURA 5.3: Evolución de la capacidad del conductor con las variaciones de viento efectivo para CIGRE.

Para el caso 1, en la figura 5.3 se observa una pendiente media que va desde 193 A/m/s a 0°C hasta 151 A/m/s para 30°C. Por lo tanto, en el escenario sin radiación y a vientos bajos con aumentos de 1 m/s se incrementa la capacidad entre 193 y 151 A para 0°C y 30°C respectivamente.

Para el caso 2, en la figura 5.3 la pendiente disminuye respecto al caso anterior obteniéndose pendientes medias desde 57 A/m/s a 0° C a 42 A/m/s a 30° C. Se puede asumir que a vientos medios sin radiación las capacidades del conductor para incrementos de viento de 1 m/s aumentan entre 57 y 42 A para 0° C y 30° C respectivamente.

Por último, para el caso 3, en la figura 5.3 la pendiente sigue disminuyendo respecto al caso anterior obteniéndose pendientes medias desde 33 A/m/s a 0°C a 25 A/m/s a 30°C. Por lo tanto, se puede asumir que a vientos altos los saltos de capacidad disminuyen respecto a los casos anteriores obteniéndose saltos de entre 33 y 25 A para aumentos de viento efectivo de 1 m/s para 0°C y 30°C respectivamente.

En los siguientes casos definidos por la metodología planteada en el apartado 5.2.2 se establecerán resultados relativos a los obtenido en los casos 1, 2 y 3.

En concreto, para el caso 4, en el que la radiación tiene un valor medio, tanto para IEEE como para CIGRE las pendientes han aumentado, respecto al caso 1, una media de 6 A llegando a 9 cuando la temperatura es muy alta. En los casos 5 y 6, en los que el valor de radiación también tiene un valor medio, los valores son prácticamente iguales a los obtenidos en los casos 1 y 2, respectivamente. A partir de este resultado se llega a la conclusión de que la radiación solar en valores medios es un factor poco determinante en la obtención de la capacidad de la línea, excepto si las temperaturas son muy altas y la velocidad de viento es baja.

Para los escenarios de alta radiación solar, casos 7, 8 y 9, se obtienen aumentos medios de pendiente de unos 17 A para el escenario de vientos bajos, caso 7 respecto al 1. Para vientos medios y altos, casos 8 y 9, los incrementos respecto a los casos

2 y 3, respectivamente, son muy pequeños. Por lo tanto, se puede determinar que la radiación solar afecta en mayor grado a la capacidad de la línea cuando se trata de radiaciones solares elevadas en condiciones de vientos bajos.

Análisis de sensibilidad de la temperatura ambiente

La metodología planteada en el apartado 5.2.2 es aplicada al conductor LA-280, cuyas características se han definido en el apartado 4.1.

IEEE

En primer lugar se plantean las condiciones definidas en los casos 1, 2 y 3 del apartado 5.2.2 en el que la radiación es nula.



FIGURA 5.4: Evolución de la capacidad del conductor LA-280 con las variaciones de temperatura ambiente para IEEE.

Para el caso 1, en la figura 5.4 se observa una pendiente media que va desde -3 A/ $^{\circ}$ C a 0 m/s a -9 A/ $^{\circ}$ C a 20 m/s. Por lo tanto, en el caso de radiación nula y para temperaturas bajas con aumentos de 1°C se obtienen disminuciones de la capacidad de entre 3 y 9 A.

En el caso 2, en la figura 5.4 con temperaturas medias las pendientes medias no varían mucho respecto al caso anterior encontrándose entre -4 A/°C a 0 m/s y -10 A/°C a 20 m/s. A diferencia del viento efectivo, en el que al variar los rangos las pendientes de las curvas variaban bastante, en el caso de la temperatura ambiente la variación de la capacidad con respecto a la temperatura ambiente es prácticamente lineal. En este caso a aumentos de temperatura de 1°C se producen disminuciones de la capacidad de entre 4 y 10 A.

Para el caso 3, en la figura 5.4 se repiten los patrones anteriores por el que las pendientes no varían mucho con el aumento de la temperatura ambiente. Para aumentos de temperatura de 1°C se obtienen disminuciones de capacidad de entre 4 y 10 A.

<u>CIGRE</u>

Para el procedimiento de CIGRE, al igual que para IEEE, se plantean las condiciones definidas en los casos 1, 2 y 3 en 5.2.2, donde la radiación es nula.



FIGURA 5.5: Evolución de la capacidad del conductor con las variaciones de temperatura ambiente para CIGRE.

En el caso de CIGRE las pendientes son muy similares a las de IEEE excepto en el escenario de altas temperaturas, caso 3, que aumenta sensiblemente respecto a IEEE. Se puede determinar que CIGRE a temperaturas altas obtiene capacidades menores que IEEE para los mismos aumentos de temperatura.

Para los escenarios de radiación media definidos en 5.2.2, casos 4, 5 y 6 tanto para IEEE como para CIGRE las pendientes se mantienen iguales a las de los casos 1, 2 y 3, respectivamente. A partir de este análisis se llega a la conclusión de que la radiación solar en valores medios no produce un aumento de las pendientes por lo que las radiación en valores medios no es determinante en el cálculo de la capacidad.

Por último, para los escenarios de alta radiación definidos en 5.2.2, casos 7, 8 y 9, tanto IEEE como CIGRE tienen pendientes similares a las obtenidas para radiaciones medias y bajas. Se puede determinar que la radiación solar no es uno de los factores determinantes en los cálculos de la capacidad.

Conclusiones

A través de los diferentes estudios realizados en los procedimientos de cálculo se ha determinado que el factor que más afecta a la capacidad de los conductores es el viento efectivo, llegando a obtener aumentos de capacidad de alrededor de 190 A para aumentos de 1 m/s en el viento a vientos bajos, entre 0 y 1 m/s, y temperaturas bajas, 0 °C. Sin embargo, la temperatura ambiente obtiene disminuciones máximas de la capacidad de alrededor de 10 A para aumentos de 1 °C en la temperatura ambiente a vientos altos, independientemente de la radiación solar.

El análisis desarrollado en el apartado 5.3.1 indica la necesidad de realizar estudios exhaustivos de la variable viento efectivo o viento y dirección de manera conjunta, ya que es la variable con más peso en los cálculos.

5.3.2. Estudios meteorológicos estadísticos

Tras realizar un análisis de sensibilidad que ha definido al viento como el factor más influyente en el cálculo de la capacidad del conductor, se ha llevado acabo el análisis estadístico de los datos meteorológicos de cada una de las estaciones meteorológicas instaladas en la línea. En el caso de estudio, apartado 4.1, se aplica la metodología definida en el apartado 5.2.3 a 5 estaciones meteorológicas situadas en los puntos de la línea definidos como críticos por los estudios microclimáticos.

Análisis estadístico de las variables meteorológicas

Las estadísticas meteorológicas mostradas en las tablas de resultados responden a la metodología planteada en el apartado 5.2.3.

Se definen como variables más críticas las que hacen que la capacidad del conductor tenga valores más bajos. Las variables meteorológicas más críticas son la temperatura ambiente más alta, la radiación solar más alta y el viento más bajo.

Se muestran en rojo las estadísticas meteorológicas de las variables que son más críticas respecto a la capacidad del conductor y en verde las menos críticas. Los datos obtenidos en la tablas de resultados se desagregan en estaciones del año.

De las tablas 5.4 a 5.7 se pueden obtener algunas conclusiones interesantes. En cuanto a temperatura ambiente, se observan diferencias de hasta 4 °C en primavera llegando a los 6 °C en otoño entre los diferentes emplazamientos de las estaciones meteorológicas.

Primavera

TABLA 5.4: Estadística de variables meteorológicas en primavera.

	EM1	EM2	EM3	EM4	EM5
Temperatura ambiente (°C)	$19,\!14$	20,73	$23,\!32$	$21,\!20$	$21,\!50$
Radiación media $(W\!/m^2)$	$427,\!43$	$446,\!58$	$548,\!29$	446,91	$442,\!16$
Radiación máxima (W/m^2)	$965,\!10$	1049,5	990,6	$1047,\!2$	$1051,\!4$
Velocidad de viento media (m/s)	$2,\!85$	3,36	3,76	3,02	$3,\!08$

Verano

TABLA 5.5: Estadística de variables meteorológicas en verano.

	EM1	EM2	EM3	EM4	EM5
Temperatura ambiente (°C)	$_{30,05}$	$30,\!38$	30,70	$31,\!34$	$30,\!91$
Radiación media (W/m^2)	461,61	$488,\!52$	474,11	$493,\!60$	$496,\!05$
Radiación máxima $(W\!/m^2)$	$932,\!40$	997	984,30	$995,\!52$	998,81
Velocidad de viento media (m/s)	2,81	$2,\!57$	3,01	$2,\!67$	2,71

Otoño

EM1EM2EM3 EM4 EM5Temperatura ambiente ($^{\circ}C$) 19,3024,9425,1125,1725,46Radiación media (W/m^2) 410,02 409,58 434,91 411,27414,34Radiación máxima (W/m^2) 808,10777,50 810,48827,05 836,86 Velocidad de viento media (m/s)3,193,333,843,05 3,25

TABLA 5.6: Estadística de variables meteorológicas en otoño.

Invierno

TABLA 5.7: Estadística de variables meteorológicas en invierno.

	EM1	EM2	EM3	EM4	EM5
Temperatura ambiente (°C)	8,80	$10,\!85$	$11,\!27$	$10,\!48$	10,78
Radiación media $(W\!/m^2)$	331,44	$331,\!01$	367,83	$347,\!95$	$348,\!37$
Radiación máxima (W/m^2)	717,48	$738,\!26$	757,16	$773,\!58$	802,90
Velocidad de viento media (m/s)	$2,\!88$	$3,\!25$	$4,\!05$	$3,\!19$	3,17

La variabilidad en cuanto a radiación solar media y a radiación solar máxima es pequeña. Solo sería reseñable en situaciones en las que existiera una zona de sombra debida a la orografía del terreno o a la existencia de árboles, edificios, etc.

El viento medio es un parámetro que solo aporta información sobre la intensidad del viento en las diferentes zonas de instalación de las estaciones, ya que en cuanto a la capacidad del conductor es necesario analizar el viento efectivo. Aun así, se puede observar que en invierno las medias de la velocidad de viento aumentan respecto a las demás estaciones del año.

Respecto a la capacidad del conductor, como se ha comentado anteriormente, lo interesante es la instalación de las estaciones en lugares poco refrigerados, poco viento y elevada temperatura ambiente y radiación. Por lo tanto, comparando las estaciones entre sí para tener una idea del grado de criticidad de cada una, se observa que la EM1 se encuentra situada en un lugar con valores menos críticos, es decir, temperaturas ambiente y radiaciones solares generalmente menores y vientos mayores. En el otro extremo, se encuentran la EM3 y la EM5, en las que la temperatura ambiente es usualmente mayor, al igual que la radiación, y el viento es medio.

Posteriormente se realiza un estudio más conciso sobre la criticidad de cada estación meteorológica respecto a las variables meteorológicas.

Análisis del viento efectivo

Siguiendo las pautas del apartado 5.2.3 se calculan todos los vientos efectivos para todas las secciones de la línea para las que se ha decidido hacer el cálculo en cada instante. Una vez almacenados en la base de datos los valores de viento efectivo se realizan los cálculos estadísticos, obteniendo el mínimo viento efectivo a diferentes niveles de confianza para cada estación meteorológica. Al igual que en el análisis estadístico general, se utiliza el criterio de desagregar los datos por estaciones del año.

Primavera

	EM1	$\mathbf{EM2}$	EM3	$\mathbf{EM5}$	$\mathbf{EM5}$
100~%	$0,\!05$	0,02	0,02	$0,\!02$	0,02
99~%	$0,\!16$	$0,\!10$	$0,\!13$	$0,\!13$	0,12
98~%	$0,\!20$	$0,\!13$	$0,\!17$	$0,\!17$	$0,\!15$
95~%	$0,\!28$	$0,\!19$	$0,\!26$	$0,\!25$	0,22
90~%	$0,\!36$	0,28	$0,\!38$	$0,\!36$	0,31
85~%	0,41	0,38	$0,\!49$	$0,\!45$	0,39

TABLA 5.8: Percentiles de vientos efectivos mínimos en primavera con el procedimiento de Davis.

TABLA 5.9: Percentiles de vientos efectivos mínimos en primavera con el procedimiento de Morgan.

	EM1	$\mathbf{EM2}$	EM3	$\mathbf{EM5}$	$\mathbf{EM5}$
100~%	0,04	0,03	0,04	0,02	0,03
99~%	$0,\!15$	0,09	$0,\!12$	$0,\!11$	0,11
98~%	$0,\!19$	0,11	$0,\!16$	$0,\!15$	$0,\!14$
95~%	$0,\!28$	0,16	$0,\!23$	$0,\!22$	0,20
90~%	$0,\!36$	0,24	0,32	$0,\!29$	0,27
85~%	$0,\!41$	0,29	$0,\!40$	$0,\!37$	0,33

En primavera, en las tablas 5.8 y 5.9, los valores de vientos efectivos mínimos son bastante bajos y bastante similares entre cada una de las estaciones. No obstante se observa, para Davis, que las estaciones meterorológicas 1 y 3 son las que tienen valores más elevados y la 2, seguida de la 5, la que mide valores más pequeños. En cuanto al análisis a través de procedimiento planteado por Morgan se obtiene que la estación 1 es la que almacena valores más elevados y la 2 los más pequeños.

Las empresas distribuidoras y los fabricantes de conductores calculan las capacidades estáticas de los mismos a través de valores muy conservadores. En el caso del viento el valor más generalizado que se utiliza para el cálculo es 0,6 m/s. A través de las tablas de primavera se llega a la conclusión de que en ninguno de las estaciones meteorológicas se alcanzan 0,6 m/s de viento efectivo para el nivel de confianza inferior, 85 %. Por lo que si los valores de viento efectivo mínimo con un nivel de confianza del 85 % son inferiores al 0.6 m/s establecido, puede que, con la manera de operar actualmente, se esté sobre estimando el viento, y por lo tanto, la capacidad del cable.

Verano

	$\mathbf{EM1}$	$\mathbf{EM2}$	EM3	$\mathbf{EM4}$	$\mathbf{EM5}$
100~%	$0,\!04$	0,02	0,02	0,02	0,02
99~%	$0,\!12$	0,08	$0,\!10$	0,10	0,09
98~%	$0,\!15$	$0,\!10$	$0,\!13$	$0,\!13$	$_{0,11}$
95~%	$_{0,21}$	$0,\!15$	$0,\!20$	$0,\!19$	$0,\!16$
90~%	$0,\!27$	$0,\!22$	$0,\!29$	0,27	$0,\!23$
85~%	0,31	$0,\!29$	$0,\!37$	0,35	$0,\!30$

TABLA 5.10: Percentiles de vientos efectivos mínimos en verano con el procedimiento de Davis.

TABLA 5.11: Percentiles de vientos efectivos mínimos en verano con el procedimiento de Morgan.

	EM1	$\mathbf{EM2}$	EM3	EM4	$\mathbf{EM5}$
100~%	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02
99~%	$0,\!12$	$0,\!07$	$0,\!10$	0,09	0,08
98~%	$0,\!15$	$0,\!08$	$0,\!12$	0,11	$_{0,11}$
95~%	$_{0,21}$	$0,\!12$	$0,\!18$	0,16	$_{0,15}$
90~%	$0,\!27$	$0,\!18$	$0,\!24$	$0,\!23$	$0,\!20$
85~%	0,31	$0,\!22$	$0,\!30$	0,28	$_{0,25}$

En verano, en las tablas 5.10 y 5.11, los valores de vientos efectivos mínimos son bastante bajos, incluso inferiores que en primavera, y bastante similares entre cada una de las estaciones. Se observa el mismo patrón de comportamiento que en primavera. Para Davis las estaciones meteorológicas 1 y 3 son las que mayores valores aportan y la 2, seguida de la 5, la que menores. Para Morgan la 1 almacena valores más altos y la 2 más bajos.

En relación con el valor de 0,6 m/s establecido para el cálculo de los límites estáticos sucede los mismo que en primavera pudiendo, en ciertos casos estar, sobre estimando el viento, y por lo tanto, la capacidad del cable.

Otoño

En otoño, en las tablas 5.12 y 5.13, los valores de vientos efectivos también son bajos, pero son superiores a los obtenidos en primavera y verano. Se observa un patrón de comportamiento similar que en las estaciones anteriores. En este caso tanto para Davis como para Morgan la estación meteorológica 1 es la que mayores valores aporta y la 2, seguida de la 5, la que menores.

	EM1	EM2	EM3	EM4	EM5
100~%	$0,\!07$	0,02	0,02	0,02	0,03
99~%	$0,\!11$	0,09	$0,\!16$	$0,\!11$	0,11
98~%	$0,\!15$	0,11	0,20	$0,\!13$	0,14
95~%	$0,\!35$	0,16	$0,\!30$	$0,\!21$	$_{0,20}$
90~%	$0,\!48$	0,23	$0,\!42$	$0,\!32$	0,29
85~%	$0,\!56$	0,30	$0,\!53$	$0,\!40$	0,36

TABLA 5.12: Percentiles de vientos efectivos mínimos en otoño con el procedimiento de Davis.

TABLA 5.13: Percentiles de vientos efectivos mínimos en otoño con el procedimiento de Morgan.

	EM1	$\mathbf{EM2}$	EM3	EM4	$\mathbf{EM5}$
100~%	$0,\!05$	0,02	0,02	$0,\!02$	0,02
99~%	$0,\!09$	0,07	$0,\!12$	$0,\!08$	0,08
98~%	$0,\!11$	0,08	$0,\!15$	$0,\!10$	0,10
95~%	$0,\!26$	0,12	$0,\!23$	$0,\!16$	0,15
90~%	$0,\!37$	$0,\!18$	$0,\!32$	$0,\!24$	0,22
85~%	$0,\!42$	0,23	0,40	$0,\!31$	0,27

En relación con el valor de 0,6 m/s establecido para el cálculo de los límites estáticos sucede los mismo que en los casos anteriores pudiendo, en ciertos casos, estar sobre estimando el viento, y por lo tanto, la capacidad del cable.

Invierno

TABLA 5.14: Percentiles de vientos efectivos mínimos en invierno con el procedimiento de Davis.

	EM1	$\mathbf{EM2}$	EM3	$\mathbf{EM4}$	$\mathbf{EM5}$
100~%	$0,\!04$	0,00	$0,\!00$	0,00	0,00
99~%	$0,\!14$	0,08	$_{0,11}$	$0,\!10$	0,11
98~%	$0,\!19$	0,11	$_{0,15}$	$0,\!15$	$0,\!14$
95~%	$0,\!28$	$0,\!17$	$_{0,25}$	$0,\!26$	0,22
90~%	$0,\!38$	0,26	$0,\!40$	$0,\!39$	0,32
85~%	$0,\!44$	0,35	$0,\!56$	$0,\!50$	0,42

En invierno, en las tablas 5.14 y 5.15, los valores de vientos efectivos también son bajos, siendo superiores a los de verano e inferiores a los de otoño. Se observa un patrón de comportamiento similar que en las estaciones anteriores. En este caso tanto para Davis como para Morgan las estaciones meteorológicas 1 y 3 son las que mayores valores aportan y la 2, seguida de la 5, las que menores.

	$\mathbf{EM1}$	$\mathbf{EM2}$	EM3	$\mathbf{EM4}$	$\mathbf{EM5}$
100~%	0,03	$0,\!00$	0,00	0,00	$0,\!00$
99~%	$0,\!11$	0,06	$0,\!08$	0,08	$0,\!08$
98~%	$0,\!14$	$0,\!08$	$0,\!12$	$0,\!12$	0,11
95~%	$0,\!22$	$0,\!13$	$0,\!19$	0,20	$_{0,17}$
90~%	$0,\!29$	$0,\!20$	$0,\!31$	0,30	0,24
85~%	$0,\!34$	$0,\!27$	$0,\!43$	0,38	0,32

TABLA 5.15: Percentiles de vientos efectivos mínimos en invierno con el procedimiento de Morgan.

En relación con el valor de 0,6 m/s establecido para el cálculo de los límites estáticos sucede los mismo que en los casos anteriores pudiendo, en ciertos casos, estar sobre estimando el viento, y por lo tanto, la capacidad del cable.

En general los valores de vientos efectivos mínimos son bastante bajos. A través de las tablas anteriores se llega a la conclusión, que en ninguno de los casos se llega al valor de 0,6 m/s de viento efectivo, es decir, en todas las estaciones el valor restrictivo establecido para el cálculo de los límites estáticos está por encima con niveles de confianza menores al 85 %. A la conclusión que se puede llegar es que, si los valores con un nivel de confianza del 85 % son inferiores al 0,6 m/s establecido, puede que en ciertos instantes se esté sobre estimando el viento, y por lo tanto, la capacidad del cable cuando se opera la línea con límites estáticos.

Por otra parte, el procedimiento planteado por Morgan es más restrictivo que el de Davis, pero las diferencias son mínimas, ya que los valores máximos se encuentran alrededor de 0.15 m/s.

En cuanto a criticidad de las estaciones, en general la 2 y la 5 son las que registran vientos efectivos más restrictivos, por lo que en cuanto a viento efectivo son las más críticas. Sabiendo que el valor de viento efectivo es muy influyente en el valor de la capacidad se puede asimilar que estas estaciones pueden ser las más criticas.

Análisis de las rosas de los vientos

Se representan las rosas de los vientos junto a la dirección de la línea en la zona de influencia de cada estación. De esta manera se observa la relación entre la dirección predominante del viento y la dirección de la línea.

• EM1

En la figura 5.6 se observa que para todas las estaciones del año la dirección predominante es Noroeste que, trasladada al tramo de la línea sobre el que la estación 1 tiene influencia, se traduce en una dirección de viento predominante que forma un ángulo de unos 45° con la línea en la parte más cercana a la estación meteorológica y casi paralela en el tramo siguiente.



FIGURA 5.6: Rosas de los vientos estacionales para la estación meteorológica 1.

• EM2

En la estación 2 la dirección predominante, al igual que en la anterior, es Noroeste, como se observa en la figura 5.7. Superponiendo esta dirección sobre la línea se observa que el ángulo de ataque del viento predominante es de 45 °en una pequeña parte del inicio de la zona de la línea a la que afecta esta estación, prácticamente perpendicular para la siguiente sección y de unos 20 °para las secciones finales de la zona.



FIGURA 5.7: Rosas de los vientos estacionales para la estación meteorológica 2.

• EM3

En la figura 5.8 se observa que en la estación meteorológica 3 se conserva la dirección predominante del Noroeste. En este caso, en la primera parte de la zona que se ve afectada por la estación 3, existiría un ángulo de ataque predominante paralelo. En la segunda parte formaría un ángulo de unos 45°, mientras en la parte final es prácticamente perpendicular.



FIGURA 5.8: Rosas de los vientos estacionales para la estación meteorológica 3.

• EM4

En el caso de la estación 4 existe una gran variabilidad en las direcciones de los vientos, como se puede observar en la figura 5.9, lo que hace difícil definir un ángulo predominante. Aunque puede establecerse una dirección predominante del Noroeste, en otoño y en invierno la dirección es más Suroeste, por lo que no es posible determinar en esta estación el ángulo de ataque del viento sobre la línea.



FIGURA 5.9: Rosas de los vientos estacionales para la estación meteorológica 4.

■ EM5

En la estación 5, observando la figura 5.10, se establece que la dirección predominante es Noroeste, con mayor tendencia hacia el Norte. Superponiendo la dirección predominante sobre la línea se obtiene que, en la primera parte de la zona afectada por la estación 5, el ángulo de ataque predominante es prácticamente perpendicular. En la última parte se hace cada vez más paralelo.



FIGURA 5.10: Rosas de los vientos estacionales para la estación meteorológica 5.

En conjunto, la dirección predominante a lo largo de toda la línea en la mayor parte de las estaciones meteorológicas es Noroeste. Por lo tanto, el ángulo predominante de ataque del viento sobre la línea variará dependiendo de la dirección de la línea. En general las zonas más paralelas, es decir menos refrigeradas e ideales para instalar los sensores meteorológicos, son las situadas en la primera mitad de la línea, englobando las estaciones 1, 2, 3 y 4.

Estudio de la criticidad de las estaciones meteorológicas respecto a cada una de las variables

• Criticidad de las estaciones respecto al viento efectivo

En la figura 5.11 se representa un histograma con la frecuencia con la que cada estación meteorológica mide el viento efectivo mínimo.

Se observa que la estación 3 es crítica menos veces que las demás, excepto en otoño que la 1 es menos veces crítica. En general, los vientos efectivos mínimos se concentran, excepto en el otoño, en los extremos de la línea. Por lo tanto, coincide con el planteamiento de las rosas de los vientos, ya que el viento mínimo se obtendrá cuando existan vientos más paralelos y en el caso de la estación 1 y la 5 existen tramos paralelos a la dirección predominante del viento.



FIGURA 5.11: Diagramas estacionales de la frecuencia de criticidad de cada una de las estaciones meteorológicas respecto al viento efectivo.

• Criticidad de las estaciones respecto a la temperatura ambiente

Otra de las variables que afectan al cálculo de la capacidad del conductor, aunque en menor medida que el viento, es la temperatura ambiente. En la figura 5.12 se representa la frecuencia con que cada estación mide la temperatura máxima.



FIGURA 5.12: Diagramas estacionales de la frecuencia de criticidad de cada una de las estaciones meteorológicas respecto a la temperatura ambiente.

En este caso existe una estación clave en cuanto a criticidad de la temperatura ambiente. La estación 5, es la que con mayor frecuencia tiene la temperatura ambiente más alta de todas las estaciones. En este caso, las diferencias son pequeñas, ya que como se observó en el apartado 5.2.3, las diferencias medias de temperatura ambiente entre las estaciones no variaban mucho.

5.3.3. Estudio de la temperatura del conductor a lo largo de la línea

La evolución de la temperatura de la línea depende en gran medida de la dirección de los vanos de la misma. Como se describió anteriormente se ha dividido la línea de estudio en 20 secciones en las cuales cada una de ellas está formada por vanos consecutivos de igual dirección. Teniendo en cuenta que el viento es el factor predominante en el cálculo de la temperatura de la línea, y suponiendo constante el viento en magnitud y dirección en los vanos de una misma sección, se puede realizar un análisis por vanos de la distribución de la temperatura de la línea.

Estudio de la evolución de la temperatura del conductor a lo largo de la línea

• Criticidad de las secciones respecto a la temperatura del conductor

En la figura 5.13 se representa la frecuencia con que cada una de las secciones tiene la temperatura crítica, por estaciones del año. Además, se representa con un código de colores el grado de criticidad de las estaciones.



FIGURA 5.13: Diagramas estacionales de la frecuencia de criticidad de cada una de las secciones respecto a la temperatura del conductor.

En primer lugar, en la figura 5.13 se observa que la sección 1 es claramente la que más veces es crítica, entre un 35% y un 48% de los casos, dependiendo de la estación del año. Las secciones cercanas a la subestación de inicio de la línea son críticas aproximadamente en un 80% de los casos. Estas secciones se encuentran en el área de influencia de las estaciones 1 y 2 que registran direcciones de vientos predominantes aproximadamente paralelas a la dirección de la línea. En cuanto al grado de criticidad, se observa que las secciones más veces críticas son las secciones con más criticidad, tal como era de esperar.

En cuanto a la sección 20, en invierno existe un aumento considerable de las veces que es crítica. En cambio, el grado de criticidad es bajo, por lo que sus temperaturas, en general, son muy alejadas de la temperatura crítica.

 Relación entre los cambios de temperatura del conductor y la dirección de la línea

En la figura 5.14 se representa la estadística de las diferencias entre las temperaturas de cada sección y se superpone una curva de un día concreto en el que existen diferencias importantes en las temperaturas de secciones contiguas. Para el diagrama de cajas, en cada elemento del eje x se representa la estadística de las diferencias entre esa sección y la anterior, por lo que en la abscisa 1 se representa la estadística de las diferencias entre la sección 1 y la 0. En cuanto a la curva de temperaturas de un día concreto, cada abscisa hace referencia a la temperatura de su sección.



FIGURA 5.14: Diagrama de cajas de las diferencias entre las temperaturas de secciones contiguas vs. a las temperaturas en un instante aleatorio.

En la figura 5.14 se puede apreciar que las medianas de las diferencias son menores que 1 °C excepto en el caso de la diferencia entre la sección 19 y la 20 que es de aproximadamente 2 °C. Además, se observa que entre estas dos secciones la diferencia máxima es muy superior a las otras secciones, de la misma manera que los *outliers*.

Por otro lado, se han representado a través de unos rectángulos de colores los cambios sustanciales de dirección de la línea (más de 20°) para observar si afectan a la temperatura del conductor que mide el sistema. Los colores de los rectángulos representan el nivel de diferencia entre direcciones siendo el verde las diferencias pequeñas (20-26°) y el rojo las elevadas (>80°). Se observa que no existe una correlación clara entre diferencias elevadas de temperatura frente a diferencias elevadas entre direcciones.

Se ha representado a la vez una curva con las temperaturas de cada sección en un instante en que existían diferencias elevadas. Se observa que los mayores saltos de temperatura se obtienen en las cercanías de cambios pronunciados, pero no es un factor determinante.

5.3.4. Comparativa entre resultados meteorológicos y de temperatura del conductor

Como se ha descrito en los apartados anteriores, se ha realizado un análisis tanto de la criticidad de las diferentes zonas de la línea respecto a las variables meteorológicas y de la temperatura del conductor medida. En una primera aproximación las zonas más críticas en cuanto a temperatura ambiente y viento efectivo deberían coincidir con las zonas más críticas en temperatura del conductor. En la realidad esto no se cumple de manera generalizada, ya que existen momentos en los que no coinciden la temperatura ambiente crítica con el viento efectivo crítico, por lo que la temperatura calculada no será la crítica. Aunque no se cumpla de manera generalizada, sí que debe existir una tendencia.

En la estadística de criticidad respecto al viento efectivo, factor con mayor peso en el cálculo de la temperatura, las zonas con vientos más críticos se encuentran en los extremos de la línea, mientras en el caso de la temperatura ambiente las zonas más críticas se encuentran en el final. Por lo tanto, según la hipótesis planteada, la zona más crítica de la línea se encontraría en el final de la misma. En cambio, en el perfil de ocurrencia de temperatura del conductor máximas por secciones la zona más crítica se encuentra cercana al inicio de la línea. Esta diferencia ente los resultados de meteorología y de temperatura del conductor se deben principalmente a dos motivos; que las variables meteorológicas críticas no se den a la vez y que ciertas secciones pueden ser críticas por temperatura con diferencias muy pequeñas con otras secciones.

5.3.5. Conclusiones

Tras el análisis de los datos obtenidos, tanto de las estaciones meteorológicas como de las medidas de temperatura del conductor, se pueden obtener conclusiones que permiten disponer de un diseño óptimo de la monitorización de las líneas y una metodológia clara para extender el análisis a otras líneas. En primer lugar, es necesario realizar un análisis exhaustivo de los parámetros meteorológicos de la línea. Las variables más importantes a la hora de decidir en qué emplazamiento colocar los sensores son las zonas con poca refrigeración; secciones paralelas a la dirección predominante del viento, secciones con vientos efectivos bajos debidos a encontrarse en zonas con alta vegetación u orografías que impidan la acción del viento sobre la línea, zonas con mayor temperatura ambiente y zonas en que la radiación solar sea más incidente.

En el caso de este estudio, a través de los valores de temperatura del conductor, se han establecido con más exactitud las zonas en que la temperatura del conductor es más elevada, por lo que son las zonas donde se deberían implantar los sensores meteorológicos. Desde el punto de vista de la línea analizada con todos los datos estudiados se establece que las estaciones meteorológicas más útiles para la monitorización de la línea serían la 1 y la 2, que abarcan de la sección 0 a la 9, y que se ha observado en la figura 5.13 que son las secciones más críticas.

Capítulo 6

Diseño y comparativa de los algoritmos de cálculo

6.1. Introducción

En general, los dos procedimientos de cálculo descritos en el capítulo 3.1 se basan en el mismo concepto de equilibrio térmico, considerándose el balance entre calor disipado y calor adquirido.

Aunque tienen en cuenta idénticos parámetros de entrada, cada uno define de manera diferente los cálculos a realizar dentro de la ecuación de equilibrio térmico.

Teóricamente, el procedimiento planteado por CIGRE [CIG14] tiene en cuenta el calentamiento por efecto Joule, por efecto magnético, por la radiación del sol, por el efecto corona y el enfriamiento por convección, radiación y evaporación, mientras el procedimiento planteado por IEEE [IEE12] no tiene en cuenta ni el calentamiento por efecto magnético, ni el efecto corona, ni la refrigeración por evaporación. En la práctica CIGRE desprecia el efecto corona y la refrigeración por evaporación, por lo que ambos procedimientos son casi idénticos.

El calor debido al sol se realiza teniendo en cuenta de manera precisa la posición del sol dependiendo de la hora y día del año. Aunque se basa en lo mismo, la manera de calcularlo difiere. CIGRE es más complejo, ya que tiene en cuenta además de la radiación directa, la radiación difusa y la radiación reflejada. Los valores de CIGRE-92 son entre un 10 % y un 15 % superiores a los de IEEE-93 [Sch99]. Una comparativa similar con los procedimientos actualizados de CIGRE e IEEE puede verse en [Arr+15]

En el caso de la refrigeración por convección, ambos procedimientos utilizan fórmulas que diferencian entre convección forzada y natural. Mientras el procedimiento de CIGRE utiliza números adimensionales para calcular los parámetros de las ecuaciones, IEEE los mantiene constantes.

El análisis adecuado para identificar el procedimiento más apropiado se basa en los datos que se puedan obtener de manera práctica. La ampacidad es una variable teórica, es decir, no se puede medir de manera física, por lo que valorar de forma directa la precisión de los resultados no es posible. Sin embargo, se puede valorar la precisión del procedimiento utilizando el algoritmo de cálculo de temperatura y comparando los resultados con valores medidos.

De esta manera, se obtendrán de un sistema definido los valores de temperatura del conductor a través de los dos procedimientos, se compararán los resultados con los valores medidos de temperatura del conductor y se analizará la precisión de ambos para definir el algoritmo más adecuado.

6.2. Diseño y adaptación de los algoritmos de cálculo

Se diseñarán dos algoritmos por cada procedimiento, ya que existe la necesidad de obtención de dos variables, la ampacidad y la temperatura del conductor y, aunque se utilice el mismo algoritmo, el procedimiento de cálculo no es el mismo.

En primer lugar se dispone de una base de datos SQL con todas las variables necesarias para el cálculo de la ampacidad y la temperatura del conductor. Esta base de datos enlaza directamente con Matlab[®] de manera que en esta plataforma se desarrollan los algoritmos obteniendo los valores de entrada a través de consultas SQL. Posteriormente los valores de salida del algoritmo se integrarán en la base de datos para una gestión eficiente.

La aplicación de los procedimientos a un sistema de monitorización real no es directa, ya que existen términos que exigen una modificación.

El calentamiento por radiación solar depende de muchos factores que, según la radiación solar, se calculan a través del día del año y la hora del día y a través de constantes definidas como el albedo o la absortividad. En los procedimientos la radiación solar se calcula de manera teórica, es decir, conociendo el día del año y la hora del día se estima tanto la altura y azimut del sol como la intensidad de radiación directa, difusa y reflejada en el caso de CIGRE y la total en el caso de IEEE. Este cálculo del calentamiento por radiación solar será, en la mayoría de los casos, muy conservador, ya que no tiene en cuenta los posibles fenómenos que hagan que al conductor no llegue la radiación teórica. Para evitar la falta de precisión que se plantea en este cálculo, se ha instalado en las estaciones meteorológicas un piranómetro que mide la radiación global que llega a la zona donde está instalado el conductor. Esta medida de irradiancia permite de manera más precisa obtener el valor de radiación real que le llega al conductor en cada instante. Además, se plantearán las ecuaciones de los procedimientos para obtener el ángulo de incidencia de la radiación sobre el conductor. Por lo tanto, las entradas al modelo serán las descritas a continuación.

Entradas meteorológicas:

- Velocidad de viento.
- Dirección del viento.
- Temperatura ambiente.
- Radiación solar.
- Fecha.

Entradas del conductor:

- Resistencia.
- Diámetro del conductor.
- Diámetros de los conductores externos.
- Coeficiente de aumento de la resistencia con la temperatura.

- Emisividad.
- Absortividad.
- Peso del conductor.
- Capacidad calorífica del conductor.
- Coeficiente de aumento de la capacidad con la temperatura.

Entradas de la línea:

- Altura sobre el nivel del mar.
- Latitud.
- Ángulo de la línea respecto al norte.
- Albedo.

Entradas de operación:

- Intensidad de la línea.
- Temperatura máxima admisible en operación.

Una vez identificadas todas las entradas necesarias para los procedimientos se debe definir el tipo de cálculo a realizar, bien el de la capacidad a través de la temperatura máxima admisible o el de la temperatura del conductor a través de la intensidad de la línea. Además, se debe definir si el cálculo se realiza de manera estacionaria o no estacionaria.

En la figura 6.1 se representa un diagrama de flujo del sistema de cálculo general en el que se describe el tipo de cálculo que se puede obtener a través de los procedimientos realizados en este trabajo.

Los algoritmos utilizados para el cálculo de las variables necesarias para el desarrollo de este trabajo están formados por las distintas ecuaciones definidas en las secciones 3.2 y 3.3. El cálculo de ampacidad se realiza de una forma directa a través de las ecuaciones ya que los procedimientos está dirigidos a obtener la ampacidad.

En cuanto a la temperatura del conductor, se necesita un proceso iterativo, ya que varias de las ecuaciones que se plantean en los procedimientos de cálculo de la ampacidad dependen de la temperatura del conductor, por lo que no se puede despejar de manera directa. El proceso iterativo se basa en variar la temperatura del conductor hasta obtener un valor de intensidad que sea igual que el medido.

En la figura 6.2 se representa el diagrama para obtener la capacidad, en el que se describen las variables de entrada, los cálculos intermedios y la elección entre la capacidad en estado estacionario y no estacionario.

En la figura 6.3 se representa el diagrama de flujo de la estructura interna del algoritmo de cálculo de la temperatura, en el que se observa el proceso iterativo descrito anteriormente. Para obtener una convergencia más rápida, el proceso iterativo se divide en pasos. En un primer momento se varia la temperatura del conductor en valores más elevados disminuyéndolos a medida que se va acercando al valor final.



FIGURA 6.1: Diagrama de flujo del sistema general de cálculo.



FIGURA 6.2: Diagrama de flujo del sistema de cálculo de la capacidad del conductor.



FIGURA 6.3: Diagrama de flujo del sistema de cálculo de la temperatura del conductor.

6.3. Ensayos de emisividad

Existen variables importantes en los procedimientos de cálculo que no se definen claramente en los procedimientos. Los valores de emisividad afectan en gran medida a los resultados de capacidad del conductor y de temperatura, por lo que deben ser definidos de manera clara. Aunque CIGRE e IEEE aportan valores aproximados dependiendo de la antigüedad del conductor, se hace necesaria la obtención práctica de estos valores en el conductor que se estudia. Para ello, se ha enviado una muestra del conductor al Centro Español de Metrología para la obtención experimental de la emisividad y la absortividad [Cen15].

La metodología del ensayo consiste en:

- Pintar una zona de la muestra de conductor con pintura de alta emisividad.
- Medir con una sonda de temperatura la zona pintada.
- Medir con una sonda de temperatura la zona sin pintar.
- Medir la temperatura de radiación de la zona pintada.
- Medir la temperatura de radiación de la zona sin pintar.
- Se modifica el parámetro de emisividad en el sensor de temperatura de radiación hasta que se obtenga una temperatura igual a la temperatura de contacto.

Mediante este ensayo se obtiene la tabla de resultados 6.1. Se observa en la tabla que, para conductores nuevos a bajas temperaturas, la emisividad es cercana a la unidad, mientras que para temperaturas altas los valores son cercanos a 0,5. En el caso de conductores usados tanto para bajas como para altas temperaturas los valores se encuentran cercanos a 0,9. Por lo tanto, lo obtenido por el ensayo se aproxima a lo que indican las normas: para conductores nuevos la emisividad se encuentra en valores cercanos a 0,5 y para conductores usados próxima a 0,9. Además, a través de este ensayo, se ha llegado a la conclusión de que los conductores nuevos con temperaturas bajas tienen una emisividad muy alta, pero en este caso no se aplicará a los procedimientos de cálculo ya que la situación normal del conductor será a temperaturas superiores a los 5 °C del ensayo.

	Temperatura nominal (°C)	Emisividad
	5	0,99
	22	-
Cable nuevo	50	0,52
	80	0,47
	5	0,93
	22	-
Cable usado	50	0,89
	80	0,88

TABLA 6.1: Valores de emisividad obtenidos en los ensayos.

6.4. Comparativa entre los procedimientos de IEEE y CIGRE

Anteriormente se han descrito las diferencias principales entre los procedimientos planteados por IEEE y por CIGRE. Aún siendo procedimientos muy similares, es necesario un análisis de los datos para verificar tanto la validez de los mismos como para comparar cual es más adecuado al escenario práctico planteado.

En primer lugar, una vez desarrollados los algoritmos y enlazados con la base de datos SQL, se realiza un cálculo tanto de la ampacidad como de la temperatura del conductor para todo el histórico de datos existente y para estado tanto estacionario como no estacionario.

Tras el cálculo se continua con el análisis de los datos. Para ello, como se describió anteriormente, no existe magnitud física con la que comparar la ampacidad, ya que es una variable teórica. Sin embargo, el cálculo de la temperatura del conductor se realiza con las mismas ecuaciones características, por lo que analizando la precisión del cálculo de temperatura se puede definir la precisión del algoritmo.

En la tabla 6.2 se representa el error cuadrático medio de cada algoritmo y su coeficiente de correlación, para poder tomar una decisión sobre el procedimiento más adecuado.

TABLA 6.2: Error cuadrático medio y coeficiente de correlación entre	е
la temperatura medida y la calculada por ambos procedimientos er	1
estado estacionario.	

	CIGRE	IEEE
$ecm (^{\circ}C)$	2,36	3,25
coef correlación	0,952	$0,\!914$



FIGURA 6.4: Histograma de error en el cálculo de la temperatura para CIGRE e IEEE en estado estacionario.

En la figura 6.4 se representa la distribución de los errores de la temperatura estimada en estado estacionario, respecto a la temperatura medida en el conductor, obtenidos como la diferencia entre el valor medido y el calculado.

Se observa que, aunque los valores obtenidos son muy cercanos, el procedimiento de CIGRE obtiene resultados ligeramente mejores que el de IEEE para el escenario planteado.

Posteriormente se analiza el caso no estacionario, en el que se tiene en cuenta la inercia térmica del conductor. Estos resultados se muestran en la tabla 6.3 y en la figura 6.5. En este caso, se obtienen valores ligeramente mejores que en el caso estacionario y además se sigue manteniendo como algoritmo óptimo el de CIGRE.

la temperatura medida y la calculada por ambos procedimientos e	\mathbf{en}
estado no estacionario.	

TABLA 6.3: Error cuadrático medio y coeficiente de correlación entre

	CIGRE	IEEE
ecm (°C)	2,28	2,8
coef correlation	0,950	0,934



FIGURA 6.5: Histograma de error en el cálculo de la temperatura para CIGRE e IEEE en estado no estacionario.

6.5. Optimización de los algoritmos de cálculo

6.5.1. Introducción

Una vez obtenidos los resultados de temperatura de ambos algoritmos y tomar la decisión de que el procedimiento de CIGRE es más adecuado al escenario práctico planteado, se debe realizar un estudio en profundidad de las causas de los errores obtenidos en el cálculo de la temperatura. En primer lugar, los errores cometidos en

el cálculo de la temperatura del conductor, y por lo tanto, los que se comenten en el cálculo de la capacidad del conductor pueden deberse a diferentes factores como errores en los sensores meteorológicos, en los sensores de temperatura del conductor, en la medida de la intensidad del conductor o deficiencias en los procedimientos de cálculo. Los errores en los sensores son difíciles de evitar, ya que cada sensor tiene su precisión, pero pueden corregirse, cuando son sistemáticos, planteando una optimización del procedimiento de cálculo.

Es importante definir en qué condiciones se obtienen los errores, para ello se realiza un estudio de los errores en la estimación de la temperatura del conductor frente a las diferentes variables de entrada.

En primer lugar, se estudia la importancia del viento efectivo en los errores de cálculo, ya que el viento efectivo es uno de los parámetros más importantes.

En la figura 6.6 se observa que para vientos efectivos bajos, si la temperatura ambiente es baja, los errores en el cálculo de la temperatura del conductor aumentan. Además, para un mismo rango de temperatura ambiente el error aumenta con el aumento de la temperatura del conductor.



FIGURA 6.6: Error de cálculo de temperatura frente al viento efectivo para diferentes valores de temperatura ambiente y de temperatura del conductor.

Por otro lado, se evalúa otra de las variables que más afectan al cálculo de la temperatura, la intensidad.

En la figura 6.7 se observa que en el caso de la intensidad el aumento del error es lineal, es decir, el error en el cálculo de la temperatura aumenta al aumentar la intensidad.

Por lo tanto, las debilidades del algoritmo de cálculo de temperatura del conductor se encuentran en las ecuaciones de convección, relacionadas con el viento, para vientos bajos y la ecuación de efecto Joule, relacionada con la intensidad.



FIGURA 6.7: Error de cálculo de temperatura frente a la intensidad para diferentes valores de temperatura ambiente y de temperatura del conductor.

6.5.2. Optimización del algoritmo de cálculo de capacidad del conductor

El procedimiento de cálculo de la capacidad del conductor posee diversos focos de error en los resultados. Tanto en los sensores de medida de variables meteorológicas, como en el propio algoritmo de cálculo pueden obtenerse errores que afectarán al resultado final de capacidad del conductor. Como se ha descrito anteriormente el procedimiento de cálculo es esencialmente el mismo para la capacidad que para la temperatura del conductor. De esta manera es posible variando las entradas, variables meteorológicas, obtener el valor de temperatura del conductor medido por el sensor. Se obtendrán unas variables meteorológicas denominadas 'efectivas' que ajustan el resultado de temperatura del conductor. De la misma forma que se ajusta el resultado de la temperatura del conductor, es posible utilizando esas variables 'efectivas' ajustar el resultado de la capacidad del conductor. Al modificar las variables de entrada hasta conseguir el resultado adecuado se logra neutralizar tanto los errores propios de los sensores de medida como los errores cometidos por el algoritmo de cálculo.

Para la realización del procedimiento de optimización de los resultados de capacidad del conductor, se plantea un procedimiento basado en la modificación de variables de manera iterativa.

El objetivo de este tipo de optimización es variar secuencialmente las variables meteorológicas, obtener la temperatura del conductor medida y posteriormente utilizar esas variables para calcular la capacidad. Este tipo de variación se basa en los estudios realizados en la sección 5.2.2. En esta sección se establece claramente que la variable que más afecta al cálculo tanto de la temperatura del conductor como de la capacidad es el viento efectivo, seguida de la temperatura y por último de la radiación solar. Basándose en esta premisa se establece que la iteración se realizará en primer lugar variando el viento efectivo hasta el momento en que supere ciertos límites establecidos; posteriormente se varia la temperatura ambiente también hasta unos límites establecidos y lo mismo con la radiación solar. En la figura 6.8 se representa un diagrama del proceso.



FIGURA 6.8: Diagrama de flujo del proceso iterativo de obtención de las variables efectivas para la optimización del cálculo de la capacidad.

De esta manera, se obtiene la capacidad efectiva del conductor, que es la capacidad corregida a través de la temperatura del conductor.

Una vez diseñados los algoritmos de optimización del cálculo de la capacidad del conductor, se representan los resultados obtenidos de capacidad efectiva frente a la capacidad sin corrección. Además, es esencial representar la diferencia entre los valores meteorológicos efectivos y los medidos por las estaciones meteorológicas ya que, aún siendo los valores efectivos un instrumento de corrección, deben tener sentido físico y no desviarse en exceso de las variables medidas.



FIGURA 6.9: Histograma de la diferencia entre las variables medidas y las efectivas en estado estacionario.

En la figura 6.9 se observa que en el caso de la ampacidad un 80% de las veces existe una diferencia entre -50 y 50 A. En el caso del viento efectivo, en el 80% de las ocasiones existe una diferencia de entre -0,5 y 0,5 m/s.



FIGURA 6.10: Histograma de la diferencia entre las variables medidas y las efectivas en estado no estacionario.

Se observa también en la figura 6.9 que para diferencias de las temperaturas entre

-1 y 1 °C la ocurrencia es de aproximadamente 98 %. Por último, en el caso de la radiación solar aproximadamente en el 100 % de los casos el valor medido y el efectivo son iguales.

Respecto a la figura 6.10 se observa que las diferencias disminuyen respecto a lo que ocurre en el caso estacionario. Este comportamiento se debe a que el estado estacionario incurre en errores al trabajar sin tener en cuenta la inercia térmica del conductor, por lo tanto necesita un mayor cambio en las variables de entrada para obtener el resultado óptimo. En el caso no estacionario se tiene en cuenta la inercia térmica del conductor, por lo que se obtienen resultados más cercanos a la realidad.

TABLA 6.4: Diferencias cuadráticas medias y coeficientes de correlación entre las diferentes variables efectivas y las medidas.

	Capacidad (A)		Viento efectivo (m/s)		Temperatura ambiente (°C)		Radiación solar (W/m^2)	
	Estacionario	No estacionario	Estacionario	No estacionario	Estacionario	No estacionario	Estacionario	No estacionario
dcm	143,79	75,07	0,90	0,61	0,42	0,35	0	0
coef. Corr.	0,791	0,893	0,815	0,897	0,997	0,998	1	1

En la tabla 6.4 se observa lo comentado anteriormente; los valores de diferencias cuadráticas medias son menores en el caso no estacionario y la correlación es más alta.

6.6. Conclusiones

En este apartado se han definido de manera clara las diferentes opciones, en cuanto a los algoritmos de cálculo. En primer lugar se ha llegado a la conclusión de que para el caso práctico que se tiene en cuenta en esta tesis, el procedimiento definido por CIGRE es más adecuado. Además, se han planteado diferentes procedimientos de optimización de los resultados de capacidad del conductor, que aportan una mejora significativa en cuanto a los resultados arrojados. La mejora se basa en que al ajustar los valores meteorológicos para que la temperatura del conductor sea igual a la medida, se reducen los errores de 2,36 °C en estado estacionario y 2,28 °C en estado no estacionario, en el cálculo de la temperatura a prácticamente nulos. Esta disminución del error cuadrático medio en el cálculo de la temperatura se traslada, utilizando los valores meteorológicos efectivos, al cálculo de la capacidad de la línea.

Otro paso importante es la verificación de los valores meteorológicos efectivos. En general, los errores aportados por los elementos de medida son pequeños y los aportados por el procedimiento de cálculo no deberían ser excesivos. Por lo tanto, los valores meteorológicos efectivos deberían parecerse bastante a los valores medidos. La existencia de valores efectivos muy alejados de los medidos implicaría la existencia de un error grande en los sensores de medida, ya sea un error en uno de los sensores o una acumulación de errores en varios sensores, o la variación excesiva en la iteración de uno de los parámetros sin variar los otros. En el apartado 8.3 se plantea la posibilidad de realizar investigaciones para realizar una iteración de los valores meteorológicos basados en los valores pasados y siguiendo una lógica más adecuada en cuanto al orden de variación de los datos.

Capítulo 7

Planificación de la gestión dinámica a corto plazo

7.1. Introducción

La gestión dinámica de las líneas eléctricas aporta la información necesaria al operador para conocer el estado de la red en cada instante. Esto supone una gran ventaja frente a la operación en estático, donde la información acerca de la red se reducía a la monitorización de la intensidad de las líneas. En el caso de la gestión dinámica, además de la temperatura de los conductores, se obtienen los valores de capacidad de las líneas en tiempo real. Conociendo la capacidad de las líneas, el operador de red es capaz de realizar las maniobras necesarias para redistribuir la energía de una manera óptima. El principal problema de la gestión dinámica son los márgenes de actuación de los operadores de red. Estos márgenes son demasiado reducidos para poder tomar decisiones, por lo que el siguiente paso para la completa gestión dinámica de las líneas aéreas se basa en la planificación a corto plazo. Esta planificación consiste en la predicción de los valores de ampacidad con diferentes horizontes temporales. La predicción de la ampacidad puede realizarse mediante dos aproximaciones: i) prediciendo cada una de las variables meteorológicas, a un horizonte temporal definido y ii) calculando la capacidad en cada instante o prediciendo directamente la ampacidad. En la aproximación de predicción de las variables meteorológicas el cálculo de la capacidad del conductor se realiza a través del modelo de capacidad en estado estacionario, sin utilizar el procedimiento de optimización. Aunque se ha demostrado que el procedimiento no estacionario se aproxima más a la realidad que el estacionario, en el caso de la predicción con horizontes del orden de horas no existe la posibilidad de plantear transitorios, ya que en esos periodos de tiempo se alcanza el estado estacionario. El motivo para no utilizar la optimización en el cálculo de la capacidad se basa en que ésta necesita valores medidos de temperatura del conductor como entrada al procedimiento, y el caso de la predicción no es posible pronosticar valores de temperatura del conductor ya que dependen principalmente de la carga que va a tener la línea.

7.2. Modelos de predicción atmosférica

En el apartado 2.2 se describen los diferentes procedimientos que existen en la actualidad para predecir tanto variables meteorológicas como otro tipo de variables. En cuanto a las variables meteorológicas la primera aproximación y más utilizada en la predicción son los modelos atmosféricos. Estos modelos se utilizan de manera extendida en todo el mundo para la obtención de variables meteorológicas a corto y largo plazo y para innumerables objetivos. La predicción mediante modelos atmosféricos se encuentra fuera del alcance de esta tesis debido a la complejidad de su desarrollo, y a que no es una opción atractiva para las empresas que gestionan las líneas eléctricas. La contratación de servicios meteorológicos que ya tengan implantados los sistemas de predicción mediante modelos atmosféricos y que aporten la predicción necesaria para la obtención de la capacidad a corto plazo es una opción interesante. Sin embargo, el coste económico de estos servicios es muy elevado. Los operadores de red buscan soluciones integradas en el sistema de cálculo de gestión dinámica que no necesiten de empresas externas.

7.3. Modelos de predicción basados en series temporales

Otra opción para la predicción de las variables meteorológicas es la basada en series temporales. Este tipo de predicción tiene, además, la ventaja de que no importa la naturaleza de la variable a predecir, por lo que también se puede plantear la predicción directa de la capacidad de las líneas. En el apartado 2.2.2 se describe de manera concreta en qué consiste la predicción mediante modelos basados en series temporales y los tipos de modelos adaptables a los requerimientos de la gestión dinámica. Se ha planteado el modelado ARIMA y las redes neuronales como posibilidades a tener en cuenta para la realización de los algoritmos de predicción.

7.3.1. Modelado ARIMA

En el apartado 2.2.2 se describen las ecuaciones en las que se basa este tipo de modelado. En la literatura técnica existen numerosos trabajos en los que se utiliza la predicción basada en modelos ARIMA, en ocasiones creando modelos híbridos con otro tipo de técnicas. Los sistemas de predicción basados en este tipo de modelos necesitan de un análisis exhaustivo de las variables a predecir, es decir, se necesita estudiar el comportamiento de cada una de las variables y aplicarle el proceso más adecuado dependiendo de sus características. Esto hace de los modelos ARIMA un sistema más complejo que otro tipo de soluciones basadas en series temporales, por lo que se queda fuera del alcance de esta tesis.

7.3.2. Modelado basado en redes neuronales

Los diferentes modelos posibles para la creación de redes neuronales está definidos en el apartado 2.2.2. Como se describe en la literatura técnica, existen diversas herramientas que simplifican la creación e implantación de sistemas de redes neuronales. Esta simplicidad en cuanto al proceso de creación y en cuanto a la integración dentro del sistema de gestión dinámica es la clave por la que se decide utilizar este tipo de modelado en la predicción de la capacidad.
7.4. Desarrollo de un sistema de redes neuronales para la gestión dinámica a corto₈₅ plazo

En este apartado se describe la metodología y las características en la creación y aplicación de las redes neuronales para la planificación en la gestión dinámica. El siguiente paso es la obtención de los resultados y errores en la aplicación de la metodología y la creación de un modelo de óptimización si fuera necesario.

7.4. Desarrollo de un sistema de redes neuronales para la gestión dinámica a corto plazo

7.4.1. Metodología en la predicción de la capacidad dinámica de las líneas eléctricas

1. Integridad de datos.

Un paso previo importante al desarrollo de los modelos es el análisis de la integridad de los datos de los que se dispone. Para el análisis de modelos de redes neuronales se necesitan series de datos continuas, con una longitud lo suficientemente grande para crear un modelo sólido. Las series de datos se obtienen de la estación o estaciones meteorológicas colocadas en la línea. En la mayoría de las ocasiones, ya sea por problemas de mantenimiento, de alimentación o de comunicaciones, los datos aportados por las estaciones tienen discontinuidades. Para evitar esto es necesario crear una aplicación que analice los datos disponibles e informe de los periodos en los que cada estación ha estado activa y en los que no, obteniendo series de datos continuas.

2. Modelo de redes neuronales.

La elección del modelo de redes neuronales se realiza en función de las variable a predecir. Como se ha descrito en el apartado 2.2.2 existen diferentes parámetros que definen la arquitectura de las redes neuronales. La correcta elección de los parámetros permite obtener predicciones óptimas. Para establecer la arquitectura más adecuada de las diferentes redes se analizarán distintos casos. En los diferentes casos analizados, y en base a las variables a predecir, se establece que una red de dos capas con alimentación directa, neuronas ocultas sigmoidales y neuronas de salida lineales es la más adecuada. Se entrena dicho modelo a través de un algoritmo de Levenberg-Marquardt de retropropagación [Lev44] [Mar63]. Este modelo cuenta con un entrenamiento supervisado en el que se proporcionan los valores de entrada (la variable a predecir y sus variables explicativas, si las hubiese) y, como salida, se establece un vector con los valores objetivo de la variable a predecir, es decir, el vector de entrada desplazado un tiempo igual al horizonte de predicción. Para esta tesis se plantean tres horizontes de predicción a corto plazo: 1, 2 y 6 horas. La utilización de variables explicativas se basa en la importante correlación entre sí de las variables meteorológicas. Por lo tanto, para obtener resultados óptimos en la predicción, es necesario predecir una variable utilizando las demás.

Los objetivos principales para obtener la predicción de la capacidad de la línea son, en primer lugar, predecir los cuatro valores meteorológicos que forman la entrada al algoritmo de capacidad y, posteriormente, predecir la ampacidad sin utilizar variables explicativas. Para la primera opción se entrenarán diferentes redes neuronales, con varias combinaciones de variables explicativas, para obtener el conjunto de entrada óptimo para cada variable. Cada red solo será válida para predecir la variable para la que se ha entrenado.

La metodología a seguir en este punto es la creación de una aplicación que entrene todas las combinaciones de redes neuronales y obtenga los diferentes errores cuadráticos medios para cada una. De esta manera, es sencillo localizar la combinación óptima para cada variable. Para cada variable meteorológica a predecir existirán las siguientes combinaciones, siendo V1 la variable principal y V2, V3 y V4 las variables explicativas. En la tabla 7.1 se resumen las combinaciones de variables explicativas.

TABLA 7.1: Combinación de las variables explicativas para la entrada al algoritmo de entrenamiento de redes neuronales.

V2	V3	V4
1	1	✓
1	\checkmark	X
\checkmark	X	\checkmark
\checkmark	X	X
X	\checkmark	✓
X	1	X
X	X	1
X	X	X

En cuanto a la segunda opción, no se plantea la utilización de variables explicativas; simplemente se entrena la red neuronal, utilizando como entrada los valores de capacidad del conductor y como objetivo los valores de capacidad del conductor desplazados un tiempo igual al horizonte de predicción.

Para el entrenamiento de las redes se utiliza una herramienta del software Matlab^(B) llamada "Neural Network Fitting Tool" [Mat15]. Esta herramienta utiliza el 70 % de las muestras para entrenar la red, el 15 % para validar, medir la generalización de la red y detener el entrenamiento cuando se detiene la mejora en la generalización, y 15 % para realizar las pruebas, en las que se obtiene el rendimiento de la red una vez entrenada.

Una vez definidas y entrenadas las cuatro redes neuronales más óptimas en el caso de predicción meteorológica y la red neuronal en el caso de la predicción directa de la capacidad, se simulan con el histórico de variables meteorológicas y de capacidad, respectivamente. De esta manera, se obtienen los valores de predicción de capacidad del conductor en cada instante. Posteriormente, se comprueba con valores estadísticos, como el error cuadrático medio y con la representación gráfica de los histogramas, la bondad de cada red neuronal y el resultado final en forma de capacidad de la línea.

Se plantea también la posibilidad de entrenar las redes neuronales periódicamente, para que los resultados se aproximen a la realidad más cercana a los datos reales. 3. Optimización del algoritmo de predicción.

Tras la evaluación de los modelos de predicción de la capacidad a corto plazo, puede ser necesario un proceso de optimización de la predicción, tanto con las variables meteorológicas como con la predicción directa. Para esto, se aplica una corrección operativa en tiempo real que consiste en corregir las desviaciones de la predicción, en base al error cometido en los instantes previos.

La corrección del error operacional se realiza obteniendo la recta de regresión lineal del error cometido por la predicción en las N horas anteriores al instante a corregir. A través de esta recta de regresión se puede estimar el error que se va a cometer y corregirlo.

Tras la corrección operacional se realiza el mismo proceso de comprobación de la bondad del sistema para observar si la optimización del modelo es adecuada.

4. Diagramas de los sistemas de predicción de la capacidad a corto plazo

En la figura 7.1 y 7.2 se detalla el proceso de predicción de la capacidad a través de las variables meteorológicas y a través de la ampacidad directa respectivamente, donde Ta es la temperatura ambiente (°C), Vw es la velocidad de viento (m/s), theta es la dirección del viento (°), ID es la radiación solar (W/m^2) , N es el número de muestras del horizonte de predicción, Amp es la capacidad de la línea (A), PAmp es la predicción de la capacidad de la línea (A), PAmp es la predicción de la capacidad de la línea (A), e_p es el error de la predicción (A), A es la pendiente de la recta de regresión y B es el término independiente de la recta de regresión.



FIGURA 7.1: Diagrama del proceso de predicción de las variables meteorológicas, cálculo de la capacidad predicha y corrección de la misma.

7.4. Desarrollo de un sistema de redes neuronales para la gestión dinámica a corto $_{\ensuremath{89}}$ plazo



FIGURA 7.2: Diagrama del proceso de predicción de la capacidad directa y corrección de la misma.

7.4.2. Aplicación de la metodología al caso de estudio

Integridad de los datos

Tras analizar la continuidad de los datos, se ha elegido un periodo en el que existen 14.982 registros continuos, de los cuales se utiliza la mitad para entrenar las redes y la otra mitad para comprobar los resultados y poder localizar la red neuronal más adecuada para cada variable. Este paso es muy importante, ya que los resultados estarán fuertemente relacionados con los registros que se utilicen para entrenar las redes. Para la industrialización de este sistema se realizarán entrenamientos periódicos de las redes neuronales para adaptarlas dinámicamente al históricos de datos.

Modelo de redes neuronales

 Modelos óptimos de redes neuronales para predicción basada en series de variables meteorológicas.

Como se a descrito en el apartado 7.4.1, tras un análisis, el modelo más adecuado a los datos de entrada es una red de dos capas con alimentación directa. El análisis posterior se basa en la búsqueda de las combinaciones de variables a predecir y variables explicativas más adecuadas. Siguiendo los pasos establecidos en la metodología, se proponen todas las combinaciones de las entradas planteadas y se representan los errores cuadráticos medios de cada una para establecer la red más adecuada para cada variable a predecir en las tablas 7.2, 7.3, 7.4 y 7.5.

Var. explicativas			ecm Ta (°C)				
Vw	theta	ID	1h	2h	$6\mathrm{h}$	${ m media}$	
1	1	1	4,18	$3,\!19$	5,74	$4,\!37$	
1	1	X	2,40	1,97	$5,\!66$	$3,\!34$	
1	X	\checkmark	0,86	1,50	$3,\!39$	$1,\!91$	
1	X	X	1,06	1,85	$3,\!69$	2,20	
×	1	\checkmark	1,32	1,55	$13,\!98$	5,61	
×	1	X	3,89	$_{3,51}$	$8,\!98$	5,46	
×	X	\checkmark	0,97	1,73	$3,\!66$	2,12	
×	×	×	1,40	1,92	$3,\!94$	2,42	

TABLA 7.2: Error en la predicción de cada una de las redes neuronales planteadas para la temperatura ambiente.

TABLA 7.3: Error en la predicción de cada una de las redes neuronales planteadas para la velocidad de viento.

Var. explicativas			ecm Vw (m/s)				
Та	theta	ID	1h	$2\mathrm{h}$	$6\mathrm{h}$	media	
1	1	1	1,58	$4,\!43$	$4,\!24$	$_{3,52}$	
1	1	X	3,89	4,09	3,76	$3,\!92$	
\checkmark	X	\checkmark	0,90	$1,\!07$	1,65	1,21	
\checkmark	X	X	0,93	$1,\!19$	1,85	$1,\!32$	
X	1	\checkmark	1,30	$1,\!56$	3,08	$1,\!98$	
X	1	X	2,00	$1,\!48$	$1,\!89$	1,78	
X	×	1	0,87	$1,\!03$	$1,\!61$	$1,\!17$	
X	×	X	0,94	1,17	1,76	$1,\!29$	

7.4. Desarrollo de un sistema de redes neuronales para la gestión dinámica a corto₉₁ plazo

Var.	explica	tivas		ecm theta (°)					
Та	Vw	ID	1h	$2\mathrm{h}$	$6\mathrm{h}$	media			
1	1	1	32,40	$33,\!37$	48,88	38,22			
\checkmark	\checkmark	X	30,01	$31,\!57$	$131,\!11$	64,23			
\checkmark	X	\checkmark	50,71	$25,\!44$	$74,\!02$	50,06			
\checkmark	X	X	50,65	$32,\!86$	$28,\!64$	37,38			
X	1	\checkmark	39,44	$34,\!07$	$118,\!22$	63,91			
X	1	X	45,27	$46,\!44$	$35,\!81$	42,51			
X	X	\checkmark	34,37	$24,\!68$	$103,\!25$	$54,\!10$			
X	×	X	38,48	$31,\!46$	$34,\!56$	34,83			

TABLA 7.4: Error en la predicción de cada una de las redes neuronales planteadas para la dirección del viento.

TABLA 7.5: Error en la predicción de cada una de las redes neuronales planteadas para la radiación solar.

Vai	. expli	cativas		ecm ID (W/m^2)				
Та	Vw	theta	1h	$2\mathrm{h}$	$6\mathrm{h}$	media		
1	1	1	310,10	$508,\!86$	$1345,\!91$	721,62		
\checkmark	\checkmark	X	$329,\!22$	$329,\!69$	$304,\!64$	$321,\!28$		
\checkmark	X	1	$317,\!12$	$1270,\!50$	$849,\!26$	812,30		
1	X	×	$337,\!45$	$321,\!53$	286,74	$315,\!24$		
X	1	1	319,89	$1285,\!94$	$1342,\!27$	982,70		
X	1	×	$327,\!23$	$322,\!67$	$285,\!295$	311,73		
X	X	1	$284,\!85$	$360,\!01$	1852,72	$832,\!53$		
X	×	×	$338,\!67$	$314,\!98$	$248,\!38$	$300,\!68$		

La columna denominada **media** calcula la media de los valores de error cuadrático medio de los distintos horizontes de predicción de las redes neuronales planteadas.

A continuación se incluye la elección más adecuada de variables explicativas para cada una de las redes neuronales, seleccionando los valores mínimos de las tablas 7.2, 7.3, 7.4 y 7.5.

Red neuronal temperatura ambiente: velocidad de viento y radiación solar.

Red neuronal velocidad de viento: radiación solar.

Red neuronal dirección de viento: sin variables explicativas.

Red neuronal radiación solar: sin variables explicativas.

Una vez definida la red neuronal más adecuada para cada una de las variables meteorológicas, el siguiente paso es la simulación del histórico de todos los datos. En las figuras de la 7.3 a la 7.8 se representan los histogramas del error en la predicción tanto de las variables meteorológicas como del resultado final de capacidad del conductor. Se complementa el análisis con los valores de error cuadrático medio de las predicciones presentados en la tablas 7.6 y 7.7.



FIGURA 7.3: Histograma de los errores en la predicción meteorológica a 1 hora.



FIGURA 7.4: Histograma de los errores en la capacidad predicha a 1 hora.



7.4. Desarrollo de un sistema de redes neuronales para la gestión dinámica a corto $_{\begin{subarray}{c} 93 \\ 93 \end{subarray}}$

FIGURA 7.5: Histograma de los errores en la predicción meteorológica a 2 horas.



FIGURA 7.6: Histograma de los errores en la capacidad predicha a $2~{\rm horas}.$



FIGURA 7.7: Histograma de los errores en la predicción meteorológica a 6 horas.



FIGURA 7.8: Histograma de los errores en la capacidad predicha a $6~{\rm horas}.$

	Tem	peratura a	mbiente	Vel	ocidad del	viento	Dire	ección del v	viento	R	adiación s	olar
ecm	$^{1h}_{1,29}$	$^{2h}_{8,88}$	$^{6\mathrm{h}}$ 14,97	$^{1h}_{1,30}$	$^{2h}_{1,54}$	$^{6h}_{2,26}$	$^{1\mathrm{h}}_{160,11}$	$^{2h}_{162,39}$	$^{6h}_{163,02}$	$^{1{ m h}}_{125,63}$	2h 166,40	$^{6h}_{255,47}$

TABLA 7.6: Resultados de los errores de predicción en las variables meteorológicas para los diferentes horizontes de predicción.

TABLA 7.7: Resultados de los errores de predicción en la capacidad del conductor para los diferentes horizontes de predicción.

	Capacidad del conductor			Capacidad del conductor corregida		
ecm	$^{1\mathrm{h}}_{129,76}$	$^{2\mathrm{h}}_{195,97}$	$^{6\mathrm{h}}_{267,81}$	$^{1\mathrm{h}}_{97,94}$	$^{2\mathrm{h}}_{105,59}$	$^{6\mathrm{h}}_{133,4}$

En estas gráficas y tablas se observa que, como cabía esperar, las predicciones con menor error son las relativas a una hora y las que tienen un error más elevado son las predicciones a seis horas. En cuanto a los valores meteorológicos predichos con un horizonte de predicción de una hora se obtienen errores cuadráticos medios muy bajos, 1,29 °C en temperatura ambiente, 1,30 m/s en velocidad de viento, 160°en la dirección del viento y 125 W/m^2 en radiación. Se observa que, aunque individualmente los valores de error en la predicción de las variables son bajos, al combinarlos en el procedimiento de cálculo generan un error cuadrático medio de 129,76 A, lo que supone un error cuadrático medio del 22 % del valor de límite estático establecido en esta línea.

Por otra parte se encuentran los valores de predicción de la capacidad corregida. La obtención de estos valores se basan en las estimación del error de predicción, teniendo en cuenta los errores de los instante anteriores. A través de esta optimización del modelo de predicción, es posible obtener una disminución del error de un 24 % para un horizonte de predicción de una hora, de un 46 % para un horizonte de dos horas y de un 50 % para un horizonte de seis horas. En base a los resultados, se obtiene un procedimiento de mejora del algoritmo que produce una óptimización muy alta, con errores cuadráticos medios finales de la predicción que suponen un 17 %, 18 % y 23 % del límite estático para una, dos y seis horas de horizonte de predicción, respectivamente.

• Modelo de redes neuronales para predicción directa de la capacidad de la línea

En el caso de la predicción directa no se cuenta con variables explicativas, por lo que se genera directamente la red neuronal cuya entrada es la capacidad de la línea calculada, en estado estacionario y sin aplicarle la optimización, y la salida es la misma serie de datos desplazada un tiempo igual al horizonte de predicción. Al igual que en el modelo basado en las series meteorológicas, se representan los histogramas de error en las figuras 7.9, 7.10, 7.11 y el error cuadrático medio en la tabla 7.8 para observar como se comporta el modelo respecto a los datos reales.



FIGURA 7.9: Histograma de los errores en la capacidad predicha de manera directa a 1 hora.



FIGURA 7.10: Histograma de los errores en la capacidad predicha de manera directa a 2 horas.





FIGURA 7.11: Histograma de los errores en la capacidad predicha de manera directa a 6 horas.

TABLA 7.8: Resultados de los errores de predicción en la capacidad del conductor de manera directa para los diferentes horizontes de predicción.

		Capacidad del co	nductor	Capa	cidad del conduc	tor corregida
ecm	$^{1\mathrm{h}}_{126,12}$	$^{2\mathrm{h}}_{138,16}$	$^{6\mathrm{h}}_{17,06}$	$^{1\mathrm{h}}_{114,06}$	$^{2\mathrm{h}}_{119,08}$	$^{6\mathrm{h}}_{145,98}$

En el caso de la predicción en base a las series de datos de ampacidad, se obtienen valores bastante cercanos a los obtenidos a través de los valores meteorológicos e incluso con errores más bajos. Para un horizonte de predicción de una hora se obtienen un error cuadrático medio de 126,12 A, lo que supone un 22 % del valor de límite estático establecido para esa línea.

En el caso de la corrección de la predicción, ésta no optimiza tanto como la realizada a la predicción basada en valores meteorológicos. Se obtiene una disminución del error cuadrático medio de un 10 % para horizontes de una hora, y de un 14 % para horizontes de dos y de seis horas. Finalmente, se obtienen unos errores cuadráticos optimizados que suponen un 20 %, 21 % y 26 % del límite estático establecido para una, dos y seis horas, respectivamente.

7.4.3. Conclusiones

Debido a la complejidad de los modelos atmosféricos, se ha considerado que resultan más adecuados los modelos basados en series temporales. Dentro de estos modelos distinguimos los modelos ARIMA y las redes neuronales. En base a las características de los datos que se manejan en el caso práctico, a la simplicidad y a las referencias estudiadas en la literatura técnica, se considera más adecuada la utilización de modelos basados en redes neuronales. En un primer paso se obtienen predicciones de los valores meteorológicos bastante precisas, con errores cercanos a los establecidos de los sensores. Estos errores aumentan al combinar las variables meteorológicas para obtener la capacidad predicha, pero manteniendo valores bajos en cuanto al error. Se ha creado un procedimiento de cálculo que permite disminuir los errores de predicción obteniendo mejoras de hasta un 50 % para horizontes de seis horas, obteniendo unos valores finales del error cuadrático medio del 17 %, 18 % y 23 % del límite estático para una, dos y seis horas, respectivamente.

Para la predicción de la capacidad basada en sus propios valores históricos los resultados son bastante mejores, ya que aunque para horizontes de una hora el error cuadrático medio es similar al obtenido con las variables meteorológicas, para dos y seis horas la mejora en el error cuadrático medio, pasando de utilizar variables meteorológicas a utilizar la propia capacidad, es de un 29 % y de un 36 % respectivamente. En cuanto a la optimización de la predicción, en el caso de predicción directa de la capacidad las mejoras no son tan elevadas como en el caso de las variables meteorológicas, obteniendo disminuciones del error de hasta el 14 % para horizontes de dos y seis horas. Los errores cuadráticos finales posteriores a la optimización suponen un 20%, 21 % y 26 % del límite estático para una, dos y seis horas, respectivamente.

Se llega a la conclusión de que, a pesar de que en la primera parte de la predicción los valores obtenidos a través de la predicción directa de la capacidad son mejores que en el caso de las variables meteorológicas, los errores de predicción corregida son mejores en el caso de la predicción de las variables meteorológicas, por lo que será este el modelo adecuado para la posible industrialización del sistema.

Capítulo 8

Conclusiones

8.1. Conclusiones

Tanto las empresas relacionadas con el transporte y la distribución de energía eléctrica como las empresas generadoras, sobre todo de energía eólica, necesitan un sistema sólido de gestión de la energía. Los generadores necesitan unas infraestructuras adecuadas para integrar toda la energía potencial de sus plantas. Por otro lado, las empresas distribuidoras mantienen un acuerdo con los generadores para gestionar una cantidad de energía establecida que, en ocasiones, no son capaces de manejar debido a congestiones de la red. Una de las principales causas de congestiones en la red es la capacidad de la infraestructura actual, con línea creadas en el pasado que tienen capacidades insuficientes para evacuar la energía generada. La solución más inmediata pasaría por la construcción de nuevas líneas o la sustitución de las actuales por unas nuevas con mayor capacidad. Esta solución, además de tener un coste económico muy elevado, presenta restricciones debido a cuestiones burocráticas y medioambientales. Las empresas propietarias de las líneas eléctricas necesitan plantearse otras opciones que repotencien las líneas y no conlleven un elevado coste. El planteamiento de esta tesis se basa en la monitorización de las líneas eléctricas para gestionarlas de manera dinámica. En la actualidad, la gestión dinámica se encuentra en un estado primario en el que muy pocos distribuidores operan de forma efectiva con ella. Es necesario, por lo tanto, realizar aportaciones necesarias a la gestión dinámica de líneas eléctricas aéreas que permitan mejorar el sistema y posibilitar su utilización global.

En esta tesis se ha planteado en un principio una metodología para la creación de un sistema para la gestión dinámica. Siguiendo el procedimiento planteado se puede realizar el emplazamiento de sensores de manera sencilla y cuasi-óptima, respecto de los resultados a obtener.

Para acercar los resultados de gestión dinámica a un óptimo, además de plantear los resultados derivados de operar en estado no estacionario, se realiza un procedimiento de cálculo de la capacidad del conductor corregida a través de la medida de temperatura. Los resultados obtenidos en este apartado son muy buenos, ya que las variables denominadas efectivas se encuentran cercanas a la medidas por los sensores, pero minimizando el error cometido. Conociendo la equivalencia entre el cálculo de la temperatura del conductor con el cálculo de la capacidad, si se disminuye el error en el cálculo de la temperatura, esta disminución se trasladará al cálculo de la capacidad.

Una vez definida por completo la gestión dinámica en tiempo real, los operadores de red necesitan ampliar el tiempo de operación para poder tener margen de actuación respecto a la gestión de las líneas. Por lo tanto, el siguiente paso es la creación de un procedimiento de planificación de la gestión dinámica en la que se ha obtenido que el sistema más adecuado es la predicción de las variables de entrada al algoritmo de cálculo de la capacidad, a través de redes neuronales con corrección del error operacional. Los resultados obtenidos permiten a los operadores de red gestionar las líneas eléctricas con errores cuadráticos medios de alrededor de 98 A, 106 A y 133 A para horizontes de una, dos y seis horas, respectivamente, en el caso práctico establecido. Estos valores suponen un error cuadrático medio, respecto al rate estático tradicional establecido por la empresa distribuidora, de un 17 %, un 18 % y un 23 % para cada horizonte de predicción. Valores muy adecuados para la planificación en la gestión de las líneas por parte de los operadores de red.

8.2. Aportaciones de la tésis

Las aportaciones originales de los trabajos de investigación realizados por esta tesis se enumeran a continuación.

- 1. Desarrollo de una metodología para la implantación de los sensores necesarios para la completa gestión dinámica de líneas eléctricas aéreas.
- 2. Elaboración de un procedimiento para la mejora de los resultados de gestión dinámica.

Se ha planteado un algoritmo de creación de variables meteorológicas efectivas que permiten mejorar el valor de capacidad de la línea a partir del ajuste de la temperatura del conductor calculada con la temperatura del conductor medida.

- 3. Desarrollo de un sistema de planificación de la gestión dinámica de líneas eléctricas aéreas basado en redes neuronales con horizontes de predicción de una, dos y seis horas.
 - Se ha planteado una red neuronal basada en la predicción de variables meteorológicas obteniendo las entradas para los entrenamientos adecuados para cada variable.
 - Se ha creado una red neuronal basada en la predicción de la capacidad de la línea de manera directa.
 - Se ha elaborado un procedimiento de corrección operativa de los valores predichos a través de la estimación del error de predicción futuro en base a los errores previos.

8.3. Líneas de investigación futuras

Existen varias líneas de investigación futuras que están actualmente en pleno desarrollo.

Una línea que se pretende investigar en un futuro es la mejora del procedimiento de obtención de las variables efectivas para la optimización de los valores de capacidad a través de Monte Carlo. El método de Monte Carlo es un método no determinista en el que se generan números pseudoaleatorios para obtener soluciones aproximadas al problema. En el planteamiento futuro se tratará de desarrollar diferentes distribuciones acumuladas de probabilidad de cada una de las variables meteorológicas de un tiempo pasado establecido respecto al instante de optimización. Una vez obtenidas las distribuciones, se genera un número pseudoaleatorio que se establecerá como un valor de probabilidad acumulada asociado a un valor de la variable correspondiente. De esta manera se tendrá una terna de valores meteorológicos pseudoaleatorios basados en su distribución de probabilidad acumulada. Se obtienen resultados de variables efectivas de manera más lógica, sin que los resultados estén supeditados al orden de variación de las variables en la iteración.

Por otra parte, una línea de investigación futura en referencia a la predicción de la capacidad es la mejora de los algoritmos mediante la creación de modelos híbridos de redes neuronales con otros sistemas como puede ser ARIMA, algoritmos genéticos o lógica difusa. Mediante la combinación de algoritmos de inteligencia artificial se pueden complementar las deficiencias de un sistema con las bondades de otro.

Bibliografía

- [AEN10] AENOR. Transformadores de potencia. Parte 7: Guía de carga para transformadores de potencia sumergidos en aceites. UNE-IEC 60076-7:2010. 2010.
- [Alb+11a] I. Albizu y col. «Hardware and software architecture for overhead line rating monitoring». En: PowerTech, 2011 IEEE Trondheim. 2011, págs. 1
 -6. DOI: 10.1109/PTC.2011.6019151.
- [Alb+11b] I. Albizu y col. «Influence of the conductor temperature error on the overhead line ampacity monitoring systems». En: Generation, Transmission Distribution, IET 5.4 (2011), págs. 440-447. ISSN: 1751-8687. DOI: 10.1049/iet-gtd.2010.0470.
- [Alb+13] I. Albizu y col. «Tension and Ampacity Monitoring System for Overhead Lines». En: Power Delivery, IEEE Transactions on 28.1 (2013), págs. 3-10. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2213308.
- [AMS13] R. Martínez M. Manana E. Hervás A. Arroyo P.B. Castro A. Madrazo A. González y D. Silió. «Increasing Grid Integration of Wind Energy by using Ampacity Techniques». En: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13). 2013.
- [AMS15] R. Martínez M. Manana E. Hervás A. Arroyo P.B. Castro A. Madrazo A. González y D. Silió. «Analysis of a real case of ampacity management in a 132 kV network integrating wind energy.» En: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'15). 2015.
- [AMZ09] I. Albizu, A.J. Mazón e I. Zamora. «Flexible Strain-Tension Calculation Method for Gap-Type Overhead Conductors». En: Power Delivery, IEEE Transactions on 24.3 (2009), págs. 1529-1537. ISSN: 0885-8977. DOI: 10. 1109/TPWRD.2009.2016631.
- [Arr+15] Alberto Arroyo y col. «Comparison between IEEE and CIGRE Thermal Behaviour Standards and Measured Temperature on a 132-kV Overhead Power Line». En: Energies 8.12 (2015), pág. 12391. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en81212391. URL: http://www.mdpi.com/1996-1073/8/12/ 12391.
- [Art09] Arteche. Temperature and current measurement sensor for high voltaje lines. SMT. 2009.
- [Ber+07] C. Bernauer y col. «Temperature measurement on overhead transmission line (OHTL) utilizing surface acoustic wave (SAW) sensors». En: 19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED). 2007.

[BJ70]	G. E. P. Box y G. M. Jenkins. <i>Time Series Analysis. Forecasting and Control.</i> 1970.
[Boea]	Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico. España. BOE 17/12/2013.
[Boeb]	Resolución de 11-02-2005 de la Secretaría General de la Energía, por la que se aprueba un conjunto de procedimientos de carácter técnico e instrumental necesarios para realizar la adecuada gestión técnica del Sistema Eléctrico, BOE 01/03/05. Ministerio de Insutria, Turismo y Comercio.
[Boec]	Resolución de 18-5-2009, de la Secretaría de Estado de Energía, por la que se aprueban los procedimientos de operación del sistema 1.6, 3.1, 3.2, 3.3, 3.7, 7.2, 7.3 y 9 para su adaptación a la nueva normativa eléctrica, BOE 28/05/09. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
[Boed]	Resolución de 30-7-1998 de la sectretaría de Estado de Energía y Recur- sos Minerales, por la que se aprueba un conjunto de procedimientos de carácter técnico e instrumental necesarios para realizar la adecuada ges- tión técnica del sistema eléctrico, BOE 18/08/98. Ministerio de Industria y Energía.
[CB89]	W.A. Chisholm y J.S. Barrett. «Ampacity studies on 49 ° C-rated trans- mission line». En: <i>Power Delivery, IEEE Transactions on</i> 4.2 (1989), págs. 1476-1485. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/61.25635.
[Cen15]	Centro. «Medidas de emisividad de cables de alta tensión y esfera para la Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía de la Universidad de Cantabria.» 2015.
[CIG14]	CIGRE. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines. Working Group B2.43. TB 601, 2014.
[CIG92]	CIGRE. Mathematical Model for Evaluation of Conductor Temperature in The Steady (or Quasi-Steady) State (Normal Operation). ELECTRA No. 144, Oct. 1992, pp. 109-115, 1992.
[Dav77]	Murray W. Davis. «A new thermal rating approach: The real time ther- mal rating system for strategic overhead conductor transmission lines – Part II: Steady state thermal rating program». En: <i>Power Apparatus and</i> <i>Systems, IEEE Transactions on</i> 96.3 (1977), págs. 810-825.
[Deb95]	A.K. Deb. «Object oriented expert system estimates line ampacity». En: <i>Computer Applications in Power, IEEE</i> 8.3 (1995), págs. 30-35. ISSN: 0895-0156. DOI: 10.1109/67.392024.
[Die16]	Antonio Gónzalez Diego. «Aumento de la Eficiencia de las Redes de Dis- tribución de la Energía utilizando Técnicas de Calibrado Dinámico». Tesis doct. Universidad de Cantabria, 2016.
[En14]	Red Eléctrica de España. <i>El sistema eléctrico español 2014</i> . Inf. téc. REE, 2014.
[Fer+12]	E. Fernández y col. «System for ampacity monitoring and low sag over- head conductor evaluation». En: <i>Electrotechnical Conference (MELECON)</i> , 2012 16th IEEE Mediterranean. 2012, págs. 237-240. DOI: 10.1109/

MELCON.2012.6196422.

- [FMA12] J. Fu, D.J. Morrow y S.M. Abdelkader. «Modelling and prediction techniques for dynamic overhead line rating». En: Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE. 2012, págs. 1-7. DOI: 10.1109/PESGM.2012. 6344733.
- [GK13] A. Gunday y S.E. Karlik. «Optical fiber distributed sensing of temperature, thermal strain and thermo-mechanical force formations on OPGW cables under wind effects». En: *Electrical and Electronics Engineering* (*ELECO*), 2013 8th International Conference on. 2013, págs. 462-467. DOI: 10.1109/ELEC0.2013.6713885.
- [HD88] J.F. Hall y A.K. Deb. «Prediction of overhead transmission line ampacity by stochastic and deterministic models». En: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 3.2 (1988), págs. 789-800. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/61. 4319.
- [HMF11] J. Heckenbergerova, P. Musilek y K. Filimonenkov. «Assessment of seasonal static thermal ratings of overhead transmission conductors». En: *Power and Energy Society General Meeting*, 2011 IEEE. 2011, págs. 1-8. DOI: 10.1109/PES.2011.6039393.
- [Hou+13] Zhangshuan Hou y col. «Standardized Software for Wind Load Forecast Error Analyses and Predictions Based on Wavelet-ARIMA Models – Applications at Multiple Geographically Distributed Wind Farms». En: System Sciences (HICSS), 2013 46th Hawaii International Conference on. 2013, págs. 5005-5011. DOI: 10.1109/HICSS.2013.495.
- [HTb1] H. E. House y P. D. Tuttle. «Current carrying capacity of ACSR». En: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 1169-1178,* (Feb.1978).
- [IEE12] IEEE. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. Std 738, 2012.
- [IEE93] IEEE. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. Std 738, 1993. DOI: 10.1109/IEEESTD. 1993.120365.
- [Ind13] Energía y Turismo. Gobierno de España. Ministerio de Industria. La Energía en España 2013. Inf. téc. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Gobierno de España., 2013.
- [KD14] S. Kamboj y R. Dahiya. «Case study to estimate the sag in overhead conductors using GPS to observe the effect of span length». En: T D Conference and Exposition, 2014 IEEE PES. 2014, págs. 1-4. DOI: 10. 1109/TDC.2014.6863337.
- [KJ97] Lalarukh Kamal y Yasmin Zahra Jafri. «Time series models to simulate and forecast hourly averaged wind speed in Quetta, Pakistan». En: Solar Energy 61.1 (1997), págs. 23-32. ISSN: 0038-092X. DOI: http://dx.doi. org/10.1016/S0038-092X(97)00037-6.

- [KR09] K. Kopsidas y S.M. Rowland. «Evaluation of potentially effective ways for increasing power capacity of existing overhead lines». En: Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference on. 2009, págs. 1 -7. DOI: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348005.
- [KWB10] T. Krontiris, A. Wasserrab y G. Balzer. «Weather-based loading of overhead lines - Consideration of conductor's heat capacity». En: Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010 Proceedings of the International Symposium. 2010, págs. 1-8.
- [Lev44] Kenneth Levenberg. «A method for the solution of certain non-linear problems in least squares.» En: Quarterly Journal of Applied Mathematics II.2 (1944), págs. 164-168.
- [Mar63] Donald W. Marquardt. «An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters». En: Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics 11.2 (1963), págs. 431-441. DOI: 10.1137/0111030. eprint: http://dx.doi.org/10.1137/0111030. URL: http://dx.doi. org/10.1137/0111030.
- [Mat15] Matlab. MathWorks. Neural Network Toolbox. 2015.
- [McA54] W. H. McAdams. *Heat Transmission, 3rd ed. 1954.* Ed. por McGraw-Hill. 1954.
- [Mor73] V.T. Morgan. «The heat transfer from bare stranded conductors by natural and forced convection in air». En: International Journal of Heat and Mass Transfer 16.11 (1973), págs. 2023 -2034. DOI: http://dx.doi.org/ 10.1016/0017-9310(73)90105-1.
- [NLS13] Huu-Minh Nguyen, J.-L. Lilien y P. Schell. «Dynamic line rating and ampacity forecasting as the keys to optimise power line assets with the integration of res. The European project Twenties Demonstration inside Central Western Europe». En: Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on. 2013, págs. 1-4. DOI: 10.1049/cp.2013.1011.
- [Panpe] Transmission Advisory Panel. Transmission Conductors Thermal Ratings. Inf. téc. East Central Area Reliability Coordinatiomn Agreement, Paper 68-TAP-28.
- [Pog+03] P. Poggi y col. «Forecasting and simulating wind speed in Corsica by using an autoregressive model». En: Energy Conversion and Management 44.20 (2003), págs. 3177 -3196. ISSN: 0196-8904. DOI: http://dx.doi.org/10. 1016/S0196-8904(03)00108-0.
- [RML14] A. Madrazo M. Manana M.A. Cavia R. Domingo A. Sierra R. Martínez A. González y A. Laso. «Ampacity forecasting using neural networks». En: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14). 2014.
- [SBB11] A.A.P. da Silva y J.M. de Barros Bezerra. «A Model for Uprating Transmission Lines by Using HTLS Conductors». En: Power Delivery, IEEE Transactions on 26.4 (2011), págs. 2180-2188. ISSN: 0885-8977. DOI: 10. 1109/TPWRD.2011.2151887.

- [Sch99] N.P. Schmidt. «Comparison between IEEE and CIGRE ampacity standards». En: Power Delivery, IEEE Transactions on 14.4 (1999), págs. 1555 -1559.
- [SE90] N.D. Sadanandan y A.H. Eltom. «Power donut system laboratory test and data analysis». En: Southeastcon '90. Proceedings., IEEE. 1990, 675-679 vol.2. DOI: 10.1109/SECON.1990.117902.
- [Yan+09] Yi Yang y col. «Thermal modeling and real time overload capacity prediction of overhead power lines». En: Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2009. SDEMPED 2009. IEEE International Symposium on. 2009, págs. 1-7. DOI: 10.1109/DEMPED.2009.5292772.





RAQUEL MARTÍNEZ TORRE

METODOLOGÍA PARA GESTIÓN DINÁMICA DE CAPACIDAD EN LÍNEAS AÉREAS DE ALTA TENSIÓN BASADA EN MÚLTIPLES MEDIDAS DISCRETAS DE CONDICIONES AMBIENTALES