

ÍNDICE

ÍNDICE	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XXII
ÍNDICE DE FIGURAS	XXI
ABSTRACT	XXX
RESUMEN	XXXII
RESUM	XXXIV
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1-1
1.1 INTRODUCCIÓN	1-1
1.2 OBJETIVOS	1-3
1.3 CRITERIOS Y METODOLOGÍA	1-4
1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS	1-5
CAPÍTULO 2: EL TRANSPORTE Y LA DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	2-1
2.1 INTRODUCCIÓN	2-1
2.2 CADENA DE VALOR DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO	2-2
2.2.1 GENERACIÓN	2-3
2.2.2 TRANSPORTE	2-4
2.2.3 DISTRIBUCIÓN	2-6
2.2.4 COMERCIALIZACIÓN	2-7
2.2.5 RELACIÓN ENTRE AGENTES	2-7
2.2.6 GESTIÓN FÍSICA DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO	2-8
2.3 FUTURO SOSTENIBLE DE LAS REDES	2-10
2.3.1 GENERACIÓN DISTRIBUIDA	2-10
2.3.2 SOSTENIBILIDAD (ECONÓMICA, MEDIO AMBIENTAL Y SOCIAL)	2-11
2.3.3 SMART METERS	2-11
2.3.4 OTROS	2-11
2.4 EVOLUCIÓN DEL MODELO RETRIBUTIVO	2-13
2.4.1 SEPARACIÓN DE ACTIVIDADES Y DESREGULACIÓN: MERCADO ELÉCTRICO	2-14
2.4.2 BASES PARA EL NUEVO MERCADO ELÉCTRICO	2-16
2.4.3 METODOLOGÍAS PARA RETRIBUIR LA ACTIVIDAD DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	2-17
2.4.4 NUEVO MODELO ENERGÉTICO	2-21
2.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 2	2-21

CAPÍTULO 3: COBERTURA DE LA DEMANDA ELÉCTRICA Y DESARROLLO SOSTENIBLE **3-1**

3.1	INTRODUCCIÓN	3-1
3.2	MODELO ENERGÉTICO Y SU PROSPECTIVA	3-2
3.3	SEGURIDAD ENERGÉTICA, COMPETITIVIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO	3-3
3.4	COBERTURA DE LA DEMANDA DE ELECTRICIDAD	3-6
3.5	OPCIONES DESDE LA OFERTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA	3-7
3.5.1	TECNOLOGÍAS RENOVABLES	3-8
3.5.2	TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES	3-13
3.5.3	SERVICIOS PARA LA COBERTURA DE LA DEMANDA	3-16
3.5.4	COMPARATIVA DE COSTES ENTRE TECNOLOGÍAS	3-18
3.5.5	EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA	3-19
3.6	INFRAESTRUCTURAS DE RED	3-21
3.7	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3	3-21

CAPÍTULO 4: EFECTOS DE LA INTEGRACIÓN DE LAS FUENTES INTERMITENTES DE ENERGÍA RENOVABLE SOBRE EL MERCADO ELÉCTRICO Y LAS REDES ELÉCTRICAS **4-1**

4.1	INTRODUCCIÓN	4-1
4.2	ORDEN DE MÉRITO EN EL DESPACHO DE GENERACIÓN	4-2
4.3	CONSIDERACIONES BÁSICAS SOBRE LA FORMACIÓN DE PRECIOS	4-4
4.3.1	INDUCTORES DEL PRECIO SPOT	4-4
4.3.2	VOLATILIDAD DE PRECIOS A CORTO PLAZO	4-5
4.3.3	TENDENCIA DE LOS PRECIOS SPOT EN EL MERCADO MAYORISTA	4-6
4.3.4	PRECIOS NEGATIVOS	4-8
4.3.5	ESQUEMAS DE APOYO Y RESPALDO	4-11
4.3.6	MECANISMOS DEL MERCADO	4-12
4.3.7	OBJETIVOS COMPARTIDOS EN MATERIA DE EMISIONES DE CO ₂	4-12
4.4	SERVICIOS DE ESTABILIDAD DEL SISTEMA	4-13
4.5	ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO DISTRIBUIDO	4-14
4.6	CAPACIDAD DE RESPUESTA DE LA DEMANDA	4-15
4.7	SOLUCIONES DE MERCADO PARA LA SEGURIDAD Y EFICIENCIA DEL SISTEMA	4-16
4.8	INTEGRACIÓN DE LOS MERCADOS.	4-17
4.9	INVERSIONES EN LA RED Y EN EL SISTEMA	4-18
4.10	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4	4-19

CAPÍTULO 5: REDES INTELIGENTES **5-1**

5.1	INTRODUCCIÓN	5-1
5.2	SITUACIÓN ACTUAL	5-1
5.3	SISTEMAS DE GESTIÓN AVANZADA DE DISTRIBUCIÓN	5-3
5.4	CONCEPTO DE RED INTELIGENTE	5-3
5.5	DOMINIOS FUNCIONALES EN LA RED INTELIGENTE	5-6
5.5.1	USUARIO DE RED	5-8

5.5.2	COMERCIALIZACIÓN	5-8
5.5.3	SERVICIOS COMPLEMENTARIOS	5-9
5.5.4	OPERACIONES DE RED	5-9
5.5.5	GENERACIÓN	5-9
5.5.6	TRANSPORTE	5-9
5.5.7	DISTRIBUCIÓN	5-10
5.5.8	ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO	5-10
5.5.9	MERCADO ELÉCTRICO	5-11
5.5.10	MARCO REGULATORIO	5-11
5.6	TRATAMIENTO DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS EN LA RED INTELIGENTE	5-13
5.7	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 5	5-14

CAPÍTULO 6: PLANIFICACIÓN EN DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA **6-1**

6.1	INTRODUCCIÓN	6-1
6.2	CONTEXTO TÉCNICO Y REGULATORIO	6-2
6.3	CRITERIOS DE ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN DE REDES	6-4
6.3.1	CRITERIO ANALÍTICO	6-5
6.3.2	ANÁLISIS EXHAUSTIVO	6-6
6.3.3	PROGRAMACIÓN LINEAL (LP)	6-7
6.3.4	PROGRAMACIÓN NO LINEAL (NLP)	6-8
6.3.5	TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS	6-15
6.3.6	MÉTODOS MULTIOBJETIVO.	6-18
6.3.7	MÉTODOS PROBABILÍSTICOS.	6-19
6.3.8	COMPARACIÓN DE MÉTODOS Y CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS	6-20
6.4	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 6	6-21

CAPÍTULO 7: CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN ACTIVA DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA **7-1**

7.1	INTRODUCCIÓN	7-1
7.2	DISEÑO TRADICIONAL DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN	7-3
7.3	INTEGRACIÓN DE LOS RECURSOS DE ENERGÍA DISTRIBUIDOS	7-5
7.3.1	RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS: CONSIDERACIONES PREVIAS Y ALCANCE	7-6
7.3.2	CAPACIDAD DE LA RED PARA INCORPORAR RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS	7-7
7.3.3	ASPECTOS TÉCNICOS QUE LIMITAN LA CAPACIDAD DE ACCESO A LA RED	7-10
7.3.4	EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA CAPACIDAD DE ACCESO	7-14
7.3.5	MEDIDAS PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD PARA INCORPORAR RECURSOS DER-DG	7-17
7.3.6	EFFECTOS SOBRE LA OPERACIÓN DE RED DERIVADOS DEL ACCESO DE LOS RECURSOS DER-DG	7-18
7.4	EVOLUCIÓN DE LAS FUNCIONES DEL DNO Y SUS NUEVOS RETOS (DSO)	7-23
7.4.1	PLANIFICAR Y DESARROLLAR LA CAPACIDAD DE LA RED	7-23
7.4.2	OPERAR Y GESTIONAR LA RED DE DISTRIBUCIÓN APOYANDO AL SISTEMA DE TRANSPORTE	7-25
7.4.3	GESTIONAR LOS FLUJOS DE ENERGÍA PRESERVANDO LA CALIDAD Y SEGURIDAD DEL SUMINISTRO	7-27
7.4.4	EVOLUCIÓN DE LAS FUNCIONES DEL GESTOR DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	7-29

7.5	SISTEMAS AVANZADOS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	7-31
7.5.1	ACCESO Y CONEXIÓN A LA RED	7-32
7.5.2	EL SUMINISTRO ELÉCTRICO EN EL CONTEXTO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN AVANZADO	7-34
7.6	GESTIÓN FLEXIBLE DE LA CAPACIDAD EN LA RED	7-39
7.6.1	PLANIFICACIÓN DEL DESARROLLO DE RED COMO SISTEMA	7-39
7.6.2	OPERACIÓN DE RED EN SISTEMAS AVANZADOS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	7-45
7.6.3	COBERTURA DE LA DEMANDA EN SISTEMAS AVANZADOS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	7-66
7.7	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 7	7-67

CAPÍTULO 8: FUNDAMENTOS Y CONSIDERACIONES DEL MODELO PROPUESTO **8-1**

8.1	INTRODUCCIÓN	8-1
8.1.1	CONDICIONES DE ACCESO A LA RED	8-2
8.1.2	ÁMBITO DE APLICACIÓN.	8-3
8.2	CAMBIO DE ENFOQUE EN LA PLANIFICACIÓN Y OPERACIÓN DE RED	8-4
8.2.1	PLANIFICACIÓN Y OPERACIÓN DE RED QUE INCORPORA LOS RECURSOS DER	8-4
8.2.2	CONDICIONES DE ACCESO Y CONEXIÓN A LA RED DE LOS RECURSOS DER	8-7
8.2.3	TRATAMIENTO DEL ÁMBITO TEMPORAL EN LA PLANIFICACIÓN DE REDES.	8-8
8.3	CONSIDERACIONES AL SIMULAR EL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	8-9
8.3.1	EVALUACIÓN TRADICIONAL DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	8-9
8.3.2	EVALUACIÓN AVANZADA DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.	8-10
8.3.3	ANÁLISIS MEDIANTE AC OPF Y SU FUNCIÓN OBJETIVO	8-11
8.3.4	CONCILIACIÓN ENTRE LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA RENOVABLE Y LAS PÉRDIDAS DE RED	8-13
8.3.5	CLAVES REGULATORIAS EN LA EVALUACIÓN DE NUEVAS INFRAESTRUCTURAS DE RED	8-15
8.4	SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA BASE DE TRES NUDOS	8-19
8.5	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 8	8-26

CAPÍTULO 9: MODELO DE PLANIFICACIÓN PROPUESTO **9-1**

9.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO	9-1
9.2	RED DE DISTRIBUCIÓN EXISTENTE.	9-2
9.3	ESTABLECER EL CASO BASE.	9-2
9.3.1	CONOCER LA RED	9-3
9.3.2	IDENTIFICAR LOS SUBSISTEMAS ELÉCTRICOS	9-4
9.3.3	IDENTIFICAR LOS ESCENARIOS CRÍTICOS DE FUNCIONAMIENTO	9-6
9.4	PLANIFICAR LAS NECESIDADES Y RECURSOS DE RED	9-8
9.4.1	PREVISIÓN DE LA DEMANDA	9-12
9.4.2	PROYECCIÓN DE LA DEMANDA SOBRE EL ESCENARIO BASE	9-13
9.5	EVALUAR LOS ASPECTOS ECONÓMICO - REGULATORIOS	9-17
9.5.1	RENTABILIDAD DE LA INVERSIÓN EN RED DESDE LA PERSPECTIVA REGULATORIA	9-20
9.5.2	PROCESO DE CÁLCULO	9-22
9.5.3	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	9-27
9.6	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 9	9-28

CAPÍTULO 10: COMPROBACIÓN Y RESULTADOS **10-1**

10.1	INTRODUCCIÓN	10-1
10.2	RED EXISTENTE DE DISTRIBUCIÓN	10-2
10.3	ESTABLECER EL CASO BASE	10-4
10.3.1	CONOCER LA RED	10-4
10.3.2	IDENTIFICAR LOS SUBSISTEMAS ELÉCTRICOS	10-11
10.3.3	CASOS PARA EL ESCENARIO BASE DESAGREGADO DE FUNCIONAMIENTO.	10-18
10.3.4	RESULTADOS PRIMERA ETAPA	10-36
10.4	PLANIFICAR LAS NECESIDADES Y RECURSOS DE RED	10-37
10.4.1	PERFILES DE COMPORTAMIENTOS DE CARGA	10-37
10.4.2	PROYECCIÓN DE LA DEMANDA	10-40
10.4.3	DESARROLLOS DE RED EN CURSO	10-40
10.4.4	PROYECCIÓN DE LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA DER	10-40
10.4.5	CASO BASE A EN LA TRANSFORMACIÓN DE LA SUBESTACIÓN K EN 2020	10-41
10.4.6	CASO BASE BMT EN LA TRANSFORMACIÓN DE LA SUBESTACIÓN K6 EN 2020	10-44
10.4.7	RESULTADOS SEGUNDA ETAPA	10-48
10.5	EVALUAR LOS ASPECTOS ECONÓMICO - REGULATORIOS	10-48
10.5.1	RENTABILIDAD DE LA INVERSIÓN EN RED DESDE LA PERSPECTIVA REGULATORIA	10-48
10.5.2	CASO BASE 2020 TRANSFORMACIÓN K	10-49
10.5.3	CASO BASE 2020 TRANSFORMACIÓN K6	10-51
10.6	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 10	10-52

CAPÍTULO 11: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN **11-1**

LISTADO DE SIGLAS Y ABREVIACIONES **A**

GLOSARIO DE TÉRMINOS **E**

BIBLIOGRAFÍA **I**

ANEXO A: DATOS DEL SISTEMA BASE DE 3 NUDOS **A-1**

A. 1:	DATOS DE ENTRADA AL SISTEMA BASE DE 3 NUDOS	A-1
A.1.1:	DEMANDA POR CONSUMO EN EL NUDO 3	A-1
A.1.2:	GENERACIÓN RENOVABLE EN EL NUDO 2	A-1
A. 2:	RESULTADOS DEL SISTEMA BASE DE 3 NUDOS	A-2
A.2.1:	TENSIÓN EN EL NUDO 2	A-2
A.2.2:	TENSIÓN EN EL NUDO 3	A-3
A.2.3:	SOBRECARGA DE LA LÍNEA 1-2	A-4
A.2.4:	SOBRECARGA DE LA LÍNEA 1-3	A-5
A.2.5:	SOBRECARGA DE LA LÍNEA 2-3	A-6
A. 3:	PROGRAMA PHYTON PARA EL SISTEMA BASE DE TRES NUDOS	A-7

ANEXO B: DATOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN EL ÁMBITO DE ESTUDIO **B-1**

B. 1: RED EXISTENTE DE DISTRIBUCIÓN (RED) DE REFERENCIA	B-1
B.1.1: ESQUEMA ELÉCTRICO	B-1
B.1.2: PARÁMETROS TÉCNICOS CARACTERÍSTICOS	B-1
B. 2: RED EXTERIOR A RED	B-3
B.2.1: ESQUEMA ELÉCTRICO	B-3
B.2.2: PARÁMETROS TÉCNICOS CARACTERÍSTICOS	B-3
B. 3: SUBSISTEMA ④	B-5
B.3.1: ESQUEMA ELÉCTRICO EQUIVALENTE	B-5
B.3.2: PARÁMETROS TÉCNICOS CARACTERÍSTICOS	B-5
B.3.3: EVOLUCIÓN DE LA CARGA EN LA TRANSFORMACIÓN 132/66 (SUBESTACIÓN L)	B-6
B.3.4: GRÁFICAS DE CORRELACIÓN DEMANDA GENERACIÓN EN LAS TRASFORMACIONES A MT	B-7

ANEXO C: TRATAMIENTO DE LOS DATOS Y REGISTROS DE MEDIDA **C-1**

C. 1: PROGRAMA ANÁLISIS DE RED MT	C-2
C.1.1: GENERAR FICHERO RAWDATA	C-2
C.1.2: CÁLCULO PNG	C-3
C. 2: PROGRAMAS EN LENGUAJE PHYTON	C-4
C.2.1: CAMBIA AREASNUDOS	C-4
C.2.2: CAMBIA POTGENERADORES	C-15
C.2.3: CAMBIA POTSOLOGENERADORES	C-27
C.2.4: CAMBIA AMPZONAS	C-35
C.2.5: CAMBIA POTAREAS	C-46

ANEXO D: CASO BASE DESAGREGADO PRIMERA ETAPA **D-1**

D. 1: TRANSFORMACIÓN K	D-1
D.1.1: ANÁLISIS DE LA TRANSFORMACIÓN K VISTA DESDE SU INTERCONEXIÓN EN 132 kV	D-1
D.1.2: AJUSTE DE LA GENERACIÓN Y LA DEMANDA EN 66 kV A LA DEL DÍA 20-1-2014 21H.	D-2
D.1.3: INCORPORACIÓN DE LA GENERACIÓN EN MT Y AT SIN MODIFICAR LA DEMANDA	D-4
D.1.4: ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS	D-8
D.1.5: VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS	D-9
D. 2: TRANSFORMACIÓN K6	D-10
D.2.1: ANÁLISIS DE LA TRANSFORMACIÓN K6 VISTA DESDE SU INTERCONEXIÓN EN 66 kV	D-10
D.2.2: INCORPORACIÓN DE LA GENERACIÓN EN MT SIN MODIFICAR LA DEMANDA	D-11
D.2.3: ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS	D-12
D.2.4: VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS	D-13

ANEXO E: CASO BASE DESAGREGADO SEGUNDA ETAPA **E-1**

E. 1: PERFILES COMPORTAMIENTO IDENTIFICADOS	E-1
--	------------

E. 2: TRANSFORMACIÓN K	E-12
E.2.1: ANÁLISIS DE LA TRANSFORMACIÓN K VISTA DESDE SU INTERCONEXIÓN EN 132 KV	E-12
E.2.2: ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS	E-13
E.2.3: ANÁLISIS OPF	E-14
E.2.4: VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS	E-18
E. 3: CASO BASE BMT TRANSFORMACIÓN K6 2020	E-19
E.3.1: ANÁLISIS DE LA TRANSFORMACIÓN K6	E-19
E.3.2: ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS	E-20
E.3.3: EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS	E-21

ANEXO F: CASO BASE DESAGREGADO TERCERA ETAPA **F-1**

F. 1: ANÁLISIS ECONÓMICO-REGULATORIO NECESIDADES DE RED EN LA TRANSFORMACIÓN K	F-1
F.1.1: ESCENARIO 1: SIN PAGO A DER Y SIN RETRASO DE LA INVERSIÓN	F-1
F.1.2: ESCENARIO 2: CON PAGO A DER Y SIN RETRASO DE LA INVERSIÓN	F-3
F.1.3: ESCENARIO 3: CON PAGO A DER Y RETRASANDO LA INVERSIÓN 1 AÑO	F-4
F.1.4: ESCENARIO 4: CON PAGO A DER Y RETRASANDO LA INVERSIÓN 2 AÑOS	F-5
F.1.5: ESCENARIO 5: CON PAGO A DER Y RETRASANDO LA INVERSIÓN 3 AÑOS	F-6
F.1.6: ESCENARIO 6: CON PAGO A DER Y RETRASANDO LA INVERSIÓN 4 AÑOS	F-7
F.1.7: ESCENARIO 7: CON PAGO A DER Y RETRASANDO LA INVERSIÓN 5 AÑOS	F-8
F.1.8: COMPARACIÓN DE ESCENARIOS	F-9
F. 2: ANÁLISIS ECONÓMICO-REGULATORIO NECESIDADES DE RED EN LA TRANSFORMACIÓN K6	F-10
F.2.1: ESCENARIO 1: SIN PAGO A DER Y SIN RETRASO DE LA INVERSIÓN	F-10
F.2.2: ESCENARIO 2: CON PAGO A DER Y SIN RETRASO DE LA INVERSIÓN	F-12
F.2.3: ESCENARIO 3: CON PAGO A DER Y RETRASANDO LA INVERSIÓN 1 AÑO	F-13
F.2.4: ESCENARIO 4: CON PAGO A DER Y RETRASANDO LA INVERSIÓN 2 AÑOS	F-14
F.2.5: ESCENARIO 5: CON PAGO A DER Y RETRASANDO LA INVERSIÓN 3 AÑOS	F-15
F.2.6: ESCENARIO 6: CON PAGO A DER Y RETRASANDO LA INVERSIÓN 4 AÑOS	F-16
F.2.7: ESCENARIO 7: CON PAGO A DER Y RETRASANDO LA INVERSIÓN 5 AÑOS	F-17
F.2.8: COMPARACIÓN DE ESCENARIOS	F-18