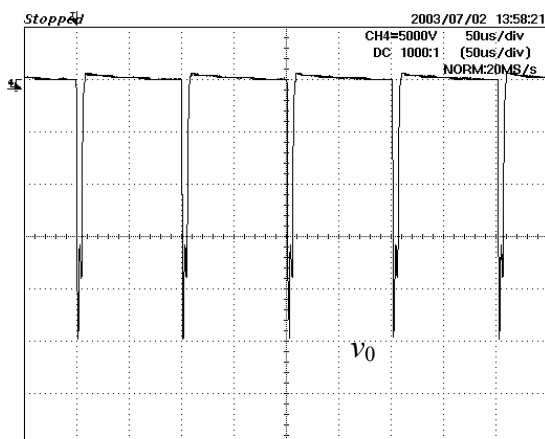




UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO



Fontes de Alta Tensão Pulsada para Implantação Iónica de Imersão em Plasma

Utilização de semicondutores de baixa tensão

Luis Manuel dos Santos Redondo
(Mestre)

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Doutor José Fernando Alves da Silva
Co-orientador: Doutor Elmano da Fonseca Margato
Co-orientador: Doutor José Carvalho Soares

Júri:

Presidente: Reitor da Universidade Técnica de Lisboa
Vogais: Doutor José Carvalho Soares
Doutor João José Esteves Santana
Doutor Adriano da Silva Carvalho
Doutor José Manuel Dias Ferreira de Jesus
Doutor José Fernando Alves da Silva
Doutor Elmano da Fonseca Margato

Dezembro de 2003

Tese realizada sob a orientação de

José Fernando Alves da Silva

Professor Associado do

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

sob a co-orientação de

Elmano da Fonseca Margato

Professor Coordenador do

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Automação

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

e sob a co-orientação de

José Carvalho Soares

Professor Catedrático do

Departamento de Física

FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE LISBOA

Aos meus Pais, Avós e Irmã

À Isabel, ao Manuel e ao Francisco

RESUMO

Propõem-se novas topologias de conversores electrónicos de potência e arquitecturas de transformadores para obter impulsos quase rectangulares de tensão elevada (vários kV). Tal permite definir metodologias para obter Fontes de Alta Tensão Pulsada (FATP) para aplicação em Implantação Iónica de Imersão em Plasma (IIIP), utilizando dispositivos semicondutores de potência (DSP) de baixa tensão (<1 kV), sem usar associações em série.

Referem-se as potencialidades da associação de DSP em circuitos do tipo “gerador de Marx”. Desenvolve-se uma FATP elementar, baseada num conversor modificado, alimentado em corrente contínua, que aproveita a operação com baixo factor de ciclo e a reduzida tensão da malha de desmagnetização do transformador elevador, para reduzir a tensão máxima nos DSP. Partindo desta FATP elementar, uma concepção modular permite construir FATP capazes de gerar os impulsos adequados aos processos de IIIP.

Concebem-se, analisam-se e projectam-se transformadores para impulsos de tensão elevada, que usam enrolamentos auxiliares para compensar fenómenos de dispersão magnética. Nos transformadores construídos, os tempos de subida do impulso são reduzidos entre 20 % e 98 %, em relação ao transformador sem enrolamentos auxiliares.

O protótipo laboratorial modular construído tem rendimento energético de aproximadamente 80 %, sendo capaz de fornecer, a cargas resistivas absorvendo 1 A, impulsos de tensão de amplitude -15 kV, largura 5 μ s, frequência 10 kHz, com tempos de subida inferiores a 1 μ s.

Palavras-chave: IIIP, FATP modular, FATP com semicondutores de baixa tensão, transformador com enrolamentos auxiliares, compensação do fluxo de dispersão, modelo do transformador com enrolamentos auxiliares.

ABSTRACT

This work proposes power electronic converter topologies and transformer configurations to achieve almost rectangular high voltage (several kV) pulses. Both the power converters and transformer configuration allow the definition of methods to obtain High Voltage Pulsed Generators (HVPG) for Plasma Immersion Ion Implantation (PIII) applications, using low voltage ($<1\text{kV}$), non-series connected semiconductor power devices (SPD).

The potential of SPD associations in “Marx generator” like circuits are presented. The central HVPG was developed, based on a modified direct current converter, which takes advantage of the low duty cycle operation and the low voltage reset circuit of the step-up transformer, to reduce the maximum voltage on the SPD. Based on this central HVPG, a modular concept allows the assembly of a HVPG capable of producing adequate pulses for PIII process.

High voltage pulse transformers using auxiliary windings for leakage flux compensation are designed, analysed and projected. Built transformers present shorter rise times, compared to transformers without auxiliary windings (reductions from 20% to 98%).

The assembled modular laboratorial prototype has 80 % efficiency, and is capable of delivering, into resistive loads, $-15\text{ kV} / 1\text{ A}$ pulses with $5\text{ }\mu\text{s}$ width, 10 kHz repetition rate, with less than $1\text{ }\mu\text{s}$ pulse rise time.

Key-words: PIII, modular HVPG, low voltage semiconductors HVPG, transformer with auxiliary winding, leakage flux compensation, transformer model with auxiliary windings.

AGRADECIMENTOS

Os meus primeiros agradecimentos vão para a minha família. Aos meus pais, avós e irmã que, de ao longo de 35 anos, contribuíram de forma inexaurível na minha educação. À Isabel ao Manuel e ao Francisco, que deram significado a este trabalho, a quem privei da merecida atenção e de bons momentos de convívio familiar, desejo comunicar o sentido reconhecimento pela abnegação com que suportaram tantos sacrifícios.

Quero expressar os meus sinceros agradecimentos ao Prof. José Fernando Alves da Silva pela sua orientação científica e humana, disponibilidade, apoio, encorajamento e confiança.

Ao Prof. Elmano da Fonseca Margato quero agradecer o seu empenho, incentivo e disponibilidade sempre demonstrada na co-orientação deste trabalho.

Ao Prof. José Carvalho Soares quero agradecer o seu apoio para a realização deste trabalho bem como a sua co-orientação.

Aos colegas e amigos do Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN), que sempre me apoiaram e incentivaram ao longo destes anos, o meu muito obrigado. Uma palavra de gratidão muito especial ao meu amigo Jorge Rocha. Aos colegas e amigos do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) quero expressar o meu agradecimento pela colaboração prestada. Agradeço igualmente a todas aquelas pessoas que de uma forma ou de outra deram o seu contributo para a realização deste trabalho, e que não foram aqui referidas.

Finalmente, agradeço às seguintes entidades ou instituições os apoios prestados que tornaram possível a realização deste trabalho:

- Ao departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação (DEEA) do ISEL;
- À secção de Electrónica Industrial do DEEA, da qual sou docente;
- Ao Centro de Electrotecnia e Electrónica Industrial (CEEI);
- Ao Centro de Automática da Universidade Técnica de Lisboa (CAUTL);
- Ao departamento de Física do Instituto Tecnológico e Nuclear;
- Ao Centro de Física Nuclear da Universidade de Lisboa, do qual sou membro;
- À secção de Máquinas Eléctricas e Electrónica de Potência do IST;
- À Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo financiamento do projecto POCTI/ESE/38963/2001, “Gerador de impulsos de 50 kV / 1 A para implantação iónica de imersão em plasma”.

CONVENÇÕES

Notação:

Nesta dissertação, para minimizar a possibilidade de interpretações ambíguas, utilizam-se preferencialmente as notações seguintes:

- Para valores instantâneos das grandezas, usam-se letras minúsculas com ou sem índices maiúsculos ou minúsculos de acordo com a notação dos componentes electrónicos: Exemplo: v_1 , v_A , i_m , v_{ds} , i_{aux} .
- Para amplitude, valores de picos das grandezas, valores contínuos das grandezas, valores de patamar ou grandezas contínuas, usam-se letras maiúsculas com os respectivos índices: Exemplo: V_{dc} , I_m , V_{ka} , V_1 .
- Para valores eficazes das grandezas, usam-se letras maiúsculas com os respectivos índices, seguidas do sub-índice $_{rms}$: Exemplo: V_{1rms} , I_{1rms} .

Sistema de Unidades:

Nesta dissertação é utilizado o Sistema Internacional (S.I.) de unidades, bem como a escrita das unidades, abreviaturas para os múltiplos e submúltiplos das diversas unidades, segundo as normas em vigor.

LISTA DE ABREVIATURAS E TERMINOLOGIA

3C85	- Denominação de um material magnético do núcleo do transformador
3C90	- Denominação de um material magnético do núcleo do transformador
A ₁	- Amplificador operacional do tipo comparador com histerese
A.1	- Transformador do tipo ETD (enrolamentos concêntricos), com $N = 10$
A.2	- Transformador do tipo ETD, análogo ao A.1, com enrolamentos auxiliares
B.1	- Transformador do tipo UR (enrolamentos separados), com $N = 10$
B.2	- Transformador do tipo UR (enrolamentos concêntricos), com $N = 25$
B.3	- Transformador do tipo UR (enrolamentos separados), com $N = 25$
B.4	- Transformador do tipo UR, análogo ao B.1, com enrolamentos auxiliares
B.5	- Transformador do tipo UR, análogo ao B.3, com enrolamentos auxiliares
CFNUL	- Centro de Física Nuclear da Universidade de Lisboa
cp1	- Condição de funcionamento do sistema de IIP com plasma de densidade 1
cp2	- Condição de funcionamento do sistema de IIP com plasma de densidade 2
DFMA	- Design for Manufacture and Assembly
DSP	- Dispositivos semicondutores de potência
E	- Geometria do núcleo magnético do transformador
ETD	- Geometria do núcleo magnético do transformador
FATP	- Fonte de Alta Tensão Pulsada
FEMM	- Finite Element Method Magnetics
FCUL	- Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Ferrite	- Material magnético núcleo para alta-frequência

Lista de abreviaturas e terminologia

Flyback	- Tipo de conversor de contínuo para contínuo
Forward	- Tipo de conversor de contínuo para contínuo
HVPG	- High Voltage Pulsed Generators
IGBT	- Transístor bipolar de porta isolada (“Insulated Gate Bipolar Transístor”)
IIP	- Implantação Iónica de Imersão em Plasma
INESC	- Instituto de Engenharia e Sistemas de Computadores
ISEL	- Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
IST	- Instituto Superior Técnico
ITN	- Instituto Tecnológico e Nuclear
MATLAB/ SIMULINK	- Programa de computador para simulação numérica
Metglas	- Material magnético do núcleo para alta-frequência
MOSFET	- Transístor de efeito de campo de porta isolada (“Metal Oxide Field Effect Transístor”)
<i>Ref.0, 1, 2, 3</i>	- Potencial de referência, e nos módulos 1, 2 e 3 da FATP modular
SCR	- Tirístor, rectificador controlado de Silício (“Silicon Controlled rectifier”)
sp	- Condição de funcionamento do sistema de IIP sem plasma
SPD	- Semiconductor Power Devices
T_{E1}	- Transformador do tipo A.1
T_{Ei}	- Transformadores do tipo A.2 com $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
T_{Ui}	- Transformadores do tipo B.4 com $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$
T_{U3}	- Transformadores do tipo B.2
T_{U4}	- Transformadores do tipo B.5
U	- Geometria do núcleo magnético do transformador
UNL	- Universidade Nova de Lisboa
UR	- Geometria do núcleo magnético do transformador

LISTA DE SÍMBOLOS MAIS FREQUENTES

A_c	- Secção transversal do núcleo (mm^2)
$A_{cu,1}, A_{cu,2}, A_{cu,3}, A_{cu,4}$	- Secção do condutor de cobre do enrolamento 1, 2, 3, 4 (mm^2)
A_k	- Constante
A_w	- Área da janela dos enrolamentos (mm^2)
$A_{w,1}$	- Área ocupada pelo enrolamento 1 (mm^2)
$A_{w,2}$	- Área ocupada pelo enrolamento 2 (mm^2)
a	- Altura dos enrolamentos (m)
a_0	- Valor médio da função $f(t)$
a_k	- Amplitude dos termos co-seno da série de Fourier
B	- Densidade do fluxo magnético (Wb/m^2)
B_0	- Densidade do fluxo remanescente (Wb/m^2)
B_k	- Constante
$B_{máx}$	- Valor máximo da densidade de fluxo magnético (Wb/m^2)
b	- Largura da região ocupada pelo primário e secundário (m)
b_1, b_2, b_3, b_4	- Largura do enrolamento 1, 2, 3, 4 (m)
b_{11}, b_{12}	- Largura da primeira e segunda metade do primário seccionado (m)
b_k	- Amplitude dos termos seno da série de Fourier
$C_{1,2,i\dots n}$	- Capacidades dos condensadores $C_{1,2,i\dots n}$ (F)
C_{12bs}	- Capacidade equivalente à capacidade distribuída entre o primário e o secundário para o circuito com blindagem simples (F)
C_{12bd}	- Capacidade equivalente à capacidade distribuída entre o primário e o secundário para o circuito com blindagem dupla (F)
C_{13}	- Capacidade equivalente entre o enrolamento 1 a blindagem (F)

Lista de símbolos mais frequentes

C_{23}	- Capacidade equivalente entre o enrolamento 2 a blindagem simples (F)
C_{24}	- Capacidade equivalente entre o enrolamento 2 a blindagem dupla (F)
C_{34}	- Capacidade equivalente entre duas blindagens (F)
C'	- Capacidade parasita do sistema (F)
C'_{eq}	- Capacidade equivalente à capacidade C_{eq} referida ao primário (F)
C'_{eq2}	- Capacidade C_{eq2} referida ao primário (F)
C_{Tm}	- Capacidade total em paralelo com o MOSFET T_m (F)
C_a	- Capacidade de realimentação do integrador (F)
C_c	- Capacidade das ligações dos cabos e da estrutura física <i>de</i> IIP (F)
C_d	- Capacidade do condensador C_d da malha de desmagnetização (F)
C_{dx}	- Capacidade do condensador elementar C_{dx} (F)
C_e	- Capacidade do condensador C_e de armazenamento de energia (F)
C_{eq}	- Capacidade equivalente à capacidade do transformador vista do secundário (F)
C_{eq1}, C_{eq2}	- Capacidade equivalente à capacidade distribuída do primário e do secundário (F)
C_{eq12}	- Capacidade equivalente à capacidade distribuída entre o primário e secundário (F)
C_{eqd}	- Capacidade equivalente à capacidade do transformador vista do secundário com os enrolamentos auxiliares desligados (F)
C_{eql}	- Capacidade equivalente à capacidade do transformador vista do secundário com os enrolamentos auxiliares ligados (F)
C_{eqn}	- Capacidade equivalente do enrolamento para o núcleo do transformador (F)
C_{esp}	- Capacidade equivalente entre espiras dum mesmo enrolamento (F)
C_{est}	- Capacidade estática entre placas equipotenciais (F)
C_{ic}	- Capacidade do condensador C_{ic} da malha de formação de impulsos (F)
C_k	- Constante

Lista de símbolos mais frequentes

C_{oss}	- Capacidade de saída do MOSFET T_m (F)
C_p	- Capacidade em paralelo com o MOSFET T_m (F)
C_{pe}	- Capacidade equivalente ao deslocamento dos electrões da bainha do plasma (F)
C_{pi}	- Capacidade equivalente ao volume do plasma (F)
C_{ti}	- Capacidade equivalente ao paralelo das capacidades C_{ic} (F)
c	- Distância entre o primário e secundário (m)
c_1	- Distância entre o núcleo e o enrolamento que lhe está mais próximo (m)
c_{13}	- Distância entre o enrolamento 1 e 3 (m)
c_{24}	- Distância entre o enrolamento 2 e 4 (m)
c_k	- Amplitude das harmónicas de Fourier
c_{s1}, c_{s2}	- Distância entre o secundário e as duas metades do primário seccionado (m)
$D_{1,2,i,\dots,n}$	- Díodos
D_{AT}	- Díodo de alta tensão
D_c	- Díodo no secundário do transformador de impulsos
D_{c1}, D_{c2}, D_{c3}	- Díodos no secundário dos transformadores de impulsos T_1, T_2 e T_3
D_d	- Díodo da malha de desmagnetização
D_{enl}, D_{end}	- Constantes
D_f	- Descarregador de faíscas
D_k	- Constante
D_{pe}	- Díodo que modela a mobilidade dos electrões no plasma
D_r	- Díodo de desmagnetização
D_s	- Díodo do circuito de protecção contra curto-circuitos
D_{s1}, D_{s2}	- Díodos
d_{CME}	- Comprimento médio das espiras nos enrolamentos (m)

Lista de símbolos mais frequentes

$d_{CME1}, d_{CME2},$ $d_{CME3}, d_{CME4},$	- Comprimento médio das espiras no enrolamento 1, 2, 3, 4 (m)
d_{CMEi}	- Comprimento médio das espiras no enrolamento i (m)
d_p	- Distâncias entre placas dum condensador ou camadas de enrolamentos (m)
dx	- Distância elementar (m)
E_{CTm}	- Energia eléctrica associada com a capacidade C_{Tm} (J)
E_L	- Energia armazenada no campo magnético numa bobina L (J)
E_{Lm1}	- Energia magnética associada ao coeficiente de auto-indução L_{m1} (J)
E_a	- Energia total armazenada na bobina de altura a (J)
E_{dx}	- Acréscimo de energia armazenada à altura x no condensador elementar de altura dx (J)
E_k	- Constante
$E_{l'eq}$	- Energia magnética associada ao coeficiente de auto-indução l'_{eq} (J)
E_{ii}	- Energia armazenada na malha LC de formação de impulsos (J)
E_σ	- Energia magnética armazenada fora do núcleo magnético numa bobina L (J)
$f(t)$	- Função genérica periódica
F_k	- Constante
f_0	- Frequência de ressonância base (Hz)
f	- Frequência (Hz)
$f_{1,2,i...n}$	- Frequência de ressonância de cada estágio (Hz)
G_k	- Constante
H	- Intensidade do campo magnético (A/m)
H_k	- Constante
H_σ	- Intensidade do campo magnético fora do núcleo (A/m)
I_1	- Valor de patamar da corrente i_1 (A)

Lista de símbolos mais frequentes

I_{rms}	- Valor eficaz da corrente i_1 (A)
I_2	- Valor de patamar da corrente i_2 (A)
I_c	- Valor de patamar da corrente i_c (A)
I_k	- Constante
I_m	- Valor de patamar da corrente i_m (A)
i	- Valor instantâneo da corrente (A)
i_0	- Valor instantâneo da corrente de carga (A)
i_1, i_2, i_3, i_4	- Valor instantâneo da corrente no enrolamento 1, 2, 3, 4 do transformador (A)
i_{11}	- Valor instantâneo da corrente no primário no modelo com C_{eq1}
i_{20}	- Valor instantâneo da corrente no enrolamento 2 do transformador ligado a uma carga R_0 (A)
i'_0	- Valor instantâneo da corrente i_0 referida ao primário (A)
i'_{20}	- Valor instantâneo da corrente i_{20} referida ao primário (A)
i'_{Ceq2}	- Valor instantâneo da corrente i_{Ceq2} referida ao primário (A)
i_{Ceq1}, i_{Ceq2}	- Valor instantâneo da corrente em C_{eq1} e C_{eq2} (A)
i_{Ceq1}	- Valor instantâneo da corrente em C_{eq1} (A)
i_D	- Valor instantâneo da corrente de fonte do MOSFET T_m (A)
i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}	- Correntes instantâneas nas bobinas L_1, L_2 e L_3 (A)
i_N	- Valor instantâneo da corrente no enrolamento a ensaiar (A)
i_{aux}	- Valor instantâneo da corrente nos enrolamentos auxiliares (A)
i_c	- Valor instantâneo da corrente na malha de desmagnetização (A)
i_{c0}	- Valor instantâneo da corrente que vai para a carga de IIP (A)
$i_{c0(cp)}$	- Valor instantâneo da corrente i_{c0} com plasma (A)
$i_{c0(sp)}$	- Valor instantâneo da corrente i_{c0} sem plasma (A)
i_{elec}	- Valor instantâneo da corrente devida aos electrões secundários (A)

Lista de símbolos mais frequentes

i_i	- Valor instantâneo da corrente no enrolamento i (A)
i_{ioes}	- Valor instantâneo da corrente devida aos iões (A)
i_j	- Valor instantâneo da corrente no enrolamento j (A)
i_m	- Valor instantâneo da corrente de magnetização (A)
i_p	- Valor instantâneo da corrente do plasma (A)
i_r	- Valor instantâneo da corrente na carga auxiliar no sistema de IIIP (A)
J_{rms}	- Valor eficaz da densidade de corrente no enrolamento (A/m^2)
J_{1rms}, J_{2rms}	- Valor eficaz da densidade de corrente no enrolamento 1 e 2 (A/m^2)
K, K_1, K_2, K_3	- Constantes
$K_{12}, K_{13}, K_{14}, K_{23}, K_{24}, K_{34}$	- Coeficiente de acoplamento entre os pares de enrolamentos 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4
k	- Índice dos termos da série de Fourier
$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9$	- Constantes
k_{cu}	- Factor de enchimento do cobre na janela dos enrolamentos
$k_{cu,1}, k_{cu,2}$	- Factor de enchimento do enrolamento 1 e 2
L_1, L_2, L_3, L_4	- Coeficiente de auto-indução do enrolamento 1, 2, 3, 4 (H)
L_e	- Coeficiente de auto-indução da bobina L_e de carga do condensador C_e (H)
L_i	- Coeficiente de auto-indução do enrolamento i (H)
L_{ic}	- Coeficiente de auto-indução da bobina L_{ic} da malha de formação de impulsos (H)
L_m	- Coeficiente de auto-indução de magnetização da bobina L (H)
$L_{m1}, L_{m2}, L_{m3}, L_{m4}$	- Coeficiente de auto-indução da indutância de magnetização do enrolamento 1, 2, 3, 4 (H)
L_{mi}	- Coeficiente de auto-indução da indutância de magnetização do enrolamento i (H)
L_{mj}	- Coeficiente de auto-indução da indutância de magnetização do enrolamento j (H)

Lista de símbolos mais frequentes

L_{ti}	- Coeficiente de auto-indução equivalente à série dos coeficientes de auto-indução L_{ic} (H)
$l_{12cc}, l_{13cc}, l_{14cc},$ $l_{23cc}, l_{24cc}, l_{34cc}$	- Coeficiente de indução mútua de curto-circuito entre os pares de enrolamentos 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4 (H)
l'_{eq}	- Coeficiente de auto-indução de dispersão referido ao primário do transformador (H)
$l'_{\sigma 2}$	- Coeficiente de auto-indução de dispersão $l_{\sigma 2}$ referido ao primário (H)
l_{aux}	- Coeficiente de auto-indução de dispersão dos enrolamentos auxiliares (H)
l_{eq}	- Coeficiente de auto-indução de dispersão do transformador visto do secundário (H)
l_{ijcc}	- Coeficiente de indução mútua de curto-circuito entre os enrolamentos i e j (H)
l_n	- Dimensão média do percurso magnético do fluxo mútuo de magnetização ϕ (mm)
l_{xi}	- Indutância a determinar (H)
l_{σ}	- Coeficiente de auto-indução de dispersão numa bobina L (H)
$l_{\sigma 11}, l_{\sigma 22}, l_{\sigma 32},$ $l_{\sigma 44}$	- Coeficiente de auto-indução de dispersão próprio do enrolamento 1, 2, 3, 4 (H)
$l_{\sigma 1}, l_{\sigma 2}, l_{\sigma 3}, l_{\sigma 4}$	- Coeficiente de auto-indução de dispersão do enrolamento 1, 2, 3, 4 (H)
$l_{\sigma 12}, l_{\sigma 21}, l_{\sigma 13},$ $l_{\sigma 31}, l_{\sigma 14}, l_{\sigma 41},$ $l_{\sigma 23}, l_{\sigma 32}, l_{\sigma 24},$ $l_{\sigma 42}, l_{\sigma 34}, l_{\sigma 43}$	- Coeficiente de indução mútua de dispersão entre os pares de enrolamentos 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4 (H)
$l_{\sigma i}$	- Coeficiente de auto-indução de dispersão dos enrolamentos (H)
$l_{\sigma ii}$	- Coeficiente de auto-indução de dispersão próprio dos enrolamentos (H)
$l_{\sigma ij}, l_{\sigma ji}$	- Coeficiente de indução mútua de dispersão entre pares de enrolamentos (H)
$M_{12}, M_{21}, M_{13},$ $M_{31}, M_{14}, M_{41},$ $M_{23}, M_{32}, M_{34},$ M_{43}	- Coeficiente de indução mútua entre os enrolamentos 1, 2, 3, 4 (H)

Lista de símbolos mais frequentes

M_{aux}	- Coeficiente de indução mútua de dispersão dos enrolamentos auxiliares (H)
M_{ij}, M_{ji}	- Coeficiente de indução mútua entre os pares dos enrolamentos i e j (H)
M_{mij}, M_{mji}	- Coeficiente de indução mútua de magnetização entre os pares dos enrolamentos i e j (H)
N	- Razão do número de espiras
N_1, N_2, N_3, N_4	- Número de espiras do enrolamento 1, 2, 3, 4 do transformador
N_{aux}	- Número de espiras dos enrolamentos auxiliares
N_i	- Número de espiras do enrolamento i
N_j	- Número de espiras do enrolamento j
$n_{11}, n_{12}, n_{13},$ $n_{14}, n_{21}, n_{22},$ $n_{23}, n_{24}, n_{31},$ $n_{32}, n_{33}, n_{34},$ $n_{41}, n_{42}, n_{43}, n_{44}$	- Coeficientes da matriz $[N]$
n_c, n_{ci}	- Número de camadas dos enrolamentos num transformador
$n_{c1}, n_{c2}, n_{c3}, n_{c4}$	- Número de camadas no enrolamento 1, 2, 3, 4
n_{ij}	- Coeficiente da matriz $[N]$
$o_{11}, o_{21}, o_{31}, o_{41}$	- Coeficientes da matriz $[O]$
o_{ij}	- Coeficiente da matriz $[O]$
P	- Potência do transformador (W)
P_0	- Potência média do transformador (W)
$P_{cu, sp}$	- Potência de perdas específicas nos enrolamentos (W/mm ³)
$P_{n, sp}$	- Potência de perdas específicas no núcleo (W/mm ³)
P_{Rd}	- Potência dissipada na resistência R_d (W)
P_{Tsp}	- Potência de perdas específicas totais (W/mm ³)
$P_{w,1}, P_{w,2}$	- Potência dissipada no enrolamento 1 e 2 (W)
p	- Vector das perturbações

Lista de símbolos mais frequentes

$q_{11}, q_{12}, q_{21},$ $q_{22}, q_{31}, q_{32},$ q_{41}, q_{42}	- Coeficientes da matriz [Q]
q_{ij}	- Coeficiente da matriz [Q]
\mathcal{R}	- Relutância do circuito magnético do núcleo (H^{-1})
R_0	- Resistência da carga (Ω)
R_1, R_2, R_3, R_4	- Resistência do enrolamento 1, 2, 3, 4 (Ω)
$R_{1s}, R_{2s}, R_{3s},$ R_{4s}, R_{5s}	- Resistência do circuito de protecção contra curto-circuitos (Ω)
R'_0	- Resistência R_0 referida ao primário (Ω)
R'_2	- Resistência R_2 referida ao primário (Ω)
R'_{eq}	- Resistência R_{eq} referida ao primário do transformador (Ω)
R_{DSon}	- Resistência do MOSFET à condução (Ω)
R_a	- Resistência de entrada do integrador (Ω)
R_{ac}	- Resistência em corrente alternada (Ω)
R_{aux}	- Resistência dos enrolamentos auxiliares (Ω)
R_d	- Resistência da malha de desmagnetização (Ω)
R_{dc}	- Resistência em corrente contínua (Ω)
R_e	- Componente resistiva da bobina L_e (Ω)
R_{eq}	- Resistência equivalente vista do secundário (Ω)
R_{ext}	- Resistência exterior (Ω)
R_i	- Resistência do enrolamento i (Ω)
R_p	- Resistência em paralelo com a carga (Ω)
R_{p1}	- Resistência que modela o regime estacionário do plasma (Ω)
R_{p2}	- Resistência que limita o pico de corrente no início do impulso (Ω)
R_r	- Resistência de desmagnetização (Ω)

Lista de símbolos mais frequentes

R_s	- Resistência de protecção (Ω)
R_t	- Resistência térmica entre a superfície do transformador e o ambiente ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
R_{ti}	- Resistência total do circuito (Ω)
R_z	- Resistência do circuito (Ω)
r	- Resistência calibrada (Ω)
r_i	- Resistência (Ω)
$S_{1,2,i\dots n}$	- Interruptores
S_p	- Interruptor principal
S_q	- Interruptor auxiliar
S_e	- Potência aparente máxima do transformador calculada a partir dos valores eficazes da tensão e da corrente nos enrolamentos primário ($\text{V}\cdot\text{A}$)
$S_{m\acute{a}x}$	- Potência aparente máxima do transformador calculada a partir da sua estrutura ($\text{V}\cdot\text{A}$)
S_p	- Secção das placas de um condensador (F)
T	- Período de uma grandeza (s)
T_1, T_2, T_3	- Transformadores de impulsos
T_a	- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
T_c	- MOSFET de controlo
T_{ci}	- Interruptores de carga no gerador de Marx electrónico (MOSFETs)
T_{di}	- Interruptores de descarga no gerador de Marx electrónico (MOSFETs)
$T_{ij}, T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}$	- Transformadores de isolamento
T_m	- MOSFET de comando
T_s	- Temperatura da superfície do transformador ($^{\circ}\text{C}$)
T_{s1}, T_{s2}	- Interruptores de estado sólido (IGBTs)
t	- Tempo (s)

Lista de símbolos mais frequentes

t_0, t_1, t_2, t_3, t_4	- Instantes de tempo (s)
t_{c1}, t_{c2}, t_{ci}	- Constantes de tempo do circuito (s)
t_d	- Tempo de descida da tensão do impulso (V)
t_{off}	- Tempo de duração do estado de corte do interruptor (s)
t_{on}	- Tempo de duração do estado de condução do interruptor (s)
t_p	- Instante de tempo em que ocorre o pico de tensão (s)
$t_{p5\%}$	- Tempo de estabelecimento a menos de 5% (s)
t_s	- Tempo de subida da tensão do impulso (s)
u	- Vector de entrada
V_0	- Valor de patamar da tensão v_0 (V)
V_1	- Valor de patamar da tensão v_1 (V)
V_{1rms}	- Valor eficaz da tensão v_1 (V)
V_2	- Valor de patamar da tensão v_2 (V)
V_{2f}	- Valor do patamar da tensão v_2 no final do impulso (V)
V'_2	- Valor de patamar da tensão v'_2 (V)
V'_{20}	- Valor inicial de V'_2
V_{A1}, V_{B1}	- Potencial inicial e final da camada 1 duma bobina
V_{A2}, V_{B2}	- Potencial inicial e final da camada 2 duma bobina
V_{C1}, V_{C2}, V_{C3}	- Amplitude das tensões v_{C1}, v_{C2}, v_{C3} (V)
V_{ak}	- Valor de patamar da tensão v_{ak} (V)
V_c	- Valor de patamar da tensão v_c (V)
V_{c0}	- Valor inicial da tensão no condensador C_d (V)
V_{cc}	- Tensão de alimentação do comando (V)
V_{cmin}	- Valor mínimo da tensão V_c
V_{dc}	- Tensão de alimentação (V)

Lista de símbolos mais frequentes

V_{ds}	- Valor de patamar da tensão v_{ds} (V)
V_e	- Volume dos enrolamentos do transformador (mm^3)
V_i	- Valor de patamar da tensão v_i (V)
V_{ka}	- Valor de patamar da tensão v_{ka} (V)
V_n	- Volume do núcleo do transformador (mm^3)
V_{ref}	- Tensão de referência (V)
V_v	- Volume da bobina (m^3)
V_{x1}, V_{x2}	- Potencial à altura x da camada 1 e 2 de uma bobina
v	- Valor instantâneo da tensão (V)
v_0	- Valor instantâneo da tensão aos terminais da carga (V)
v_1, v_2, v_3, v_4	- Valor instantânea da tensão aos terminais do enrolamento 1, 2, 3, 4 do transformador (V)
v_{30}, v_{40}	- Valor instantâneo das tensões aos terminais do enrolamento 3 e 4 com estes em aberto (V)
$v_{1,2,i,\dots,n}$	- Valor instantâneo das tensões (V)
v'_2	- Valor instantâneo da tensão v_2 referida ao primário (V)
v_A	- Valor instantâneo de tensão no circuito de protecção contra curto-circuitos (V)
v_{C1}, v_{C2}, v_{C3}	- Tensões instantâneas nos condensadores C_1, C_2 e C_3 (V)
v_{Ds}	- Tensão aos terminais do diodo D_s (V)
$v_{F1}, v_{F2}, v_{F3}, v_{F4}$	- Tensão dos estágios 1, 2, 3, 4 de síntese de Fourier
v_{Fi}, v_{Fn}	- Tensão dos estágios de síntese de Fourier
v_N	- Valor instantâneo da tensão no enrolamento a ensaiar (V)
v_{ak}	- Valor instantâneo da tensão entre o ânodo e o cátodo de um diodo (V)
v_c	- Valor instantâneo da tensão da malha de desmagnetização (V)
v_{ds}	- Tensão instantânea entre a fonte e a fonte do MOSFET (V)
v_{fi}	- Tensão de saída do integrador (V)

Lista de símbolos mais frequentes

v_{gs}	- Tensão instantânea entre a porta e a fonte do MOSFET (V)
v_i	- Tensão instantânea de entrada (V)
v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}	- Tensão entre os potenciais <i>ref.</i> 1, <i>ref.</i> 2, <i>ref.</i> e o potencial <i>ref.</i> 0 (V)
v_{in}	- Tensão instantânea no primário dos transformadores isoladores (V)
v_{ka}	- Valor instantâneo da tensão entre o cátodo e o ânodo de um díodo (V)
v_{ri}	- Tensão na resistência r (V)
$X(s)$	- Função de entrada na frequência
x	- Distância (m)
x_1	- Variável auxiliar igual a v_2
x_2	- Variável auxiliar igual à derivada de v_2 em ordem ao tempo
$Y(s)$	- Função de saída na frequência
y_1	- Variável auxiliar igual a i_0
y_2	- Variável auxiliar igual à derivada de i_0 em ordem ao tempo
Z_0	- Impedância da carga (Ω)
$Z_{1,2,i\dots n}$	- Impedâncias (Ω)
Z_c	- Impedância característica de uma linha (Ω)
z	- Vector das variáveis dependentes
$[L]$	- Matriz 4x4 que contém quatro coeficientes diagonais (L_i), os coeficientes de auto-indução de cada enrolamento; e doze coeficientes não diagonais ($M_{ij}=M_{ji}$), os coeficientes de indução mútua entre enrolamentos (H)
$[L_m]$	- Matriz 4x4 que contém quatro coeficientes diagonais (L_{mi}), os coeficientes de auto-indução de magnetização de cada enrolamento; e doze coeficientes não diagonais ($M_{mij}=M_{mji}$), os coeficientes de indução mútua de magnetização entre enrolamentos (H)
$[N]$	- Matriz associada ao vector z
$[O]$	- Matriz associada ao vector u
$[Q]$	- Matriz associada ao vector p

Lista de símbolos mais frequentes

$[l_{\sigma}]$	- Matriz 4x4 que contém quatro coeficientes diagonais ($l_{\sigma i}$), os coeficientes de auto-indução de dispersão; e doze coeficientes não diagonais ($l_{\sigma ij}=l_{\sigma ji}$), os coeficientes de indução mútua de dispersão
Δ_1	- Razão entre o tempo de condução do MOSFET T_m e o período T (%)
$\Delta_1 T$	- Período de tempo de condução do MOSFET T_m (s)
Δ_2	- Razão entre o tempo de desmagnetização e o período T (%)
$\Delta_2 T$	- Período de tempo de desmagnetização (s)
$\Delta_{2m\acute{a}x}$	- Valor máximo de Δ_2 (%)
Δ_3	- Razão entre o tempo de corrente i_m nula e o período T (%)
$\Delta_3 T$	- Período de tempo após a desmagnetização com o MOSFET T_m ainda ao corte (s)
Δ_{3min}	- Valor mínimo de Δ_3 (%)
ΔB	- Valor da excursão da densidade de fluxo magnético (Wb/m^2)
$\Delta B_{m\acute{a}x}$	- Valor máximo da excursão da densidade de fluxo magnético (Wb/m^2)
ΔH	- Valor da excursão da intensidade do campo magnético (A/m)
ΔV_2	- Queda de tensão (V)
ΔV_{2d}	- Subelevação da tensão v_2 (V)
ΔV_{2s}	- Sobreelevação da tensão v_2 (V)
Δt	- Largura do impulso no secundário (s)
Δt_0	- Largura do impulso no primário (s)
$\Delta t_{12}, \Delta t_{23}, \Delta t_{34}$	- Duração temporal entre dois instantes de tempo (s)
Δv	- Valor da sobreelevação (V)
Δv_c	- Variação da tensão v_c da malha de desmagnetização (V)
Φ	- Valor máximo do fluxo ϕ (Wb)
α	- Variável auxiliar
δ	- Factor de ciclo ou factor cíclico (%)

Lista de símbolos mais frequentes

δV_A	- Tensão aos terminais iniciais duma bobina (V)
δV_B	- Tensão aos terminais finais duma bobina (V)
δV_x	- Tensão entre duas camadas à altura x (V)
ε	- Constante dielétrica relativa do material
ε_0	- Constante dielétrica do vácuo (F/m)
ϕ	- Valor instantâneo do fluxo mútuo de magnetização (Wb)
ϕ_1, ϕ_2	- Valor instantâneo do fluxo por espira com os enrolamentos 1 e 2 (Wb)
ϕ_{11}, ϕ_{22}	- Valor instantâneo do fluxo por espira de auto-indução com os enrolamentos 1 e 2 (Wb)
ϕ_{12}, ϕ_{21}	- Valor instantâneo do fluxo por espira indução mútua entre os enrolamentos 1 e 2 (Wb)
ϕ_i	- Valor instantâneo do fluxo por espira no enrolamento i (Wb)
ϕ_{m1}, ϕ_{m2}	- Valor instantâneo do fluxo por espira de magnetização com o enrolamento 1 e 2 (Wb)
$\phi_{\sigma 1}, \phi_{\sigma 2}$	- Valor instantâneo do fluxo por espira de dispersão próprio com o enrolamento 1 e 2 (Wb)
$\phi_{\sigma i}$	- Valor instantâneo do fluxo de dispersão próprio dos enrolamentos (Wb)
$\phi_{\sigma ij}, \phi_{\sigma ji}$	- Valor instantâneo do fluxo de dispersão mútuo entre pares de enrolamentos (Wb)
μ	- Permeabilidade magnética do núcleo (H/m)
μ_0	- Permeabilidade magnética do vácuo (H/m)
μ_Δ	- Permeabilidade magnética incremental do núcleo (H/m)
$\mu_{\Delta r}$	- Permeabilidade magnética incremental relativa do material do núcleo
μ_r	- Permeabilidade magnética relativa do material
π	- Constante de valor 3,14256
$\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{14},$ $\sigma_{23}, \sigma_{24}, \sigma_{34},$	- Coeficiente de dispersão entre os pares de enrolamentos 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4

Lista de símbolos mais frequentes

τ	- Período de tempo de desmagnetização (s)
τ_c	- Velocidade de propagação de uma onda numa linha (m/s)
ω_0	- Frequência de oscilação não amortecida ou própria (Hz)
ω_r	- Frequência fundamental de $f(t)$ (rad/s)
ξ	- Factor de amortecimento
ψ	- Valor instantâneo do fluxo ligado mútuo de magnetização (Wb)
$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$	- Valor instantâneo dos fluxos ligados com os enrolamentos 1, 2, 3 e 4 (Wb)
ψ_{11}, ψ_{22}	- Valor instantâneo dos fluxos ligados de auto-indução com o enrolamento 1 e 2 (Wb)
ψ_{12}, ψ_{21}	- Valor instantâneo dos fluxos ligados de indução mútua entre o enrolamento 1 e 2 (Wb)
ψ_i, ψ_j	- Valor instantâneo do fluxo ligado com o enrolamento i e j (Wb)
ψ_{ii}	- Valor instantâneo do fluxo ligado de auto-indução com o enrolamento i (Wb)
ψ_{ij}	- Valor instantâneo do fluxo ligado de indução mútua entre os enrolamentos i e j (Wb)
ψ_{m1}, ψ_{m2}	- Valor instantâneo do fluxo ligado de magnetização com o enrolamento 1 e 2 (Wb)
ψ_{mi}, ψ_{mj}	- Valor instantâneo do fluxo ligado de magnetização com o enrolamento i e j (Wb)
$\psi_{\sigma 1}, \psi_{\sigma 2}$	- Valor instantâneo do fluxo ligado de dispersão próprio com o enrolamento 1 e 2 (Wb)
$\psi_{\sigma 12}, \psi_{\sigma 21}$	- Valor instantâneo do fluxo ligado de dispersão mútuo entre os enrolamentos 1 e 2 (Wb)
$\psi_{\sigma i}$	- Valor instantâneo do fluxo ligado de dispersão com o enrolamento i (Wb)
$\psi_{\sigma ii}$	- Valor instantâneo do fluxo ligado de dispersão próprio com o enrolamento i (Wb)
$\psi_{\sigma ji}, \psi_{\sigma ij}$	- Valor instantâneo do fluxo ligado de dispersão mútuo entre os enrolamentos i e j (Wb)

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Motivação	1
1.2 – Objectivos	3
1.3 – Conteúdo	5
1.4 – Organização	6
1.5 – Contribuições originais	9
CAPÍTULO 2 – FONTES DE ALTA TENSÃO PULSADA PARA IMPLANTAÇÃO IÓNICA DE IMERSÃO EM PLASMA	11
2.1 – Introdução	11
2.2 – Implantação iónica de imersão em plasma (IIIP)	12
2.2.1 – Requisitos para os impulsos da FATP	16
2.2.2 – Modelo equivalente da carga	20
2.3 – Fontes de alta tensão pulsada para IIIP	21
2.3.1 – Topologias	22
2.3.1.1 – Interruptor flutuante	22
2.3.1.2 – Interruptor referenciado à massa	25
2.3.1.3 – Malhas <i>LC</i> de formação de impulsos	27
2.3.1.4 – Gerador de Marx	29
2.3.1.5 – Utilização de transformador de impulsos	34
2.3.1.5.1 – Associação de transformadores	42
2.3.1.5.2 – Circuitos ressonantes	49
2.3.1.6 – Compressão magnética	52
2.4 – Dispositivos interruptores para FATP	54
2.4.1 – Válvulas	54
2.4.2 – Dispositivos semicondutores de potência	55
2.5 – Conclusões	58

CAPÍTULO 3 – TOPOLOGIA DO GERADOR DE IMPULSOS DE ALTA TENSÃO	61
3.1 – Introdução	61
3.2 – Especificação dos impulsos da FATP	62
3.3 – Circuito gerador de impulsos elementar	63
3.3.1 – Análise de funcionamento	64
3.3.2 – Condições de funcionamento e utilização	70
3.3.3 – Dimensionamento de R_d e C_d da malha de desmagnetização	73
3.3.4 – Protecção contra curto-circuitos	78
3.3.5 – Modelação da tensão no primário do transformador	79
3.4 – Associação de circuito geradores de impulsos elementares	81
3.4.1 – Associação em série dos secundários dos transformadores	82
3.4.2 – Circuito gerador de impulsos modular	86
3.5 – Conclusões	88
 CAPÍTULO 4 – TRANSFORMADOR PARA IMPULSOS DE ALTA TENSÃO	 89
4.1 – Introdução	89
4.2 – Transformador de dois enrolamentos	91
4.2.1 – Decomposição do fluxo magnético	91
4.2.2 – Modelo do transformador	98
4.2.3 – Influência das características não ideais do transformador na forma de onda do impulso de tensão	103
4.2.3.1 – Região de subida da tensão	104
4.2.3.2 – Região de tensão de patamar	110
4.2.3.3 – Região de descida da tensão	113
4.2.4 – Influência da estrutura do transformador nos valores dos parâmetros do seu modelo equivalente	115
4.2.4.1 – Tipo de material e configuração do núcleo magnético	115
4.2.4.2 – Coeficiente de auto-indução de magnetização do transformador	117
4.2.4.3 – Capacidades distribuídas do transformador	118
4.2.4.3.1 – Utilização de blindagens de Faraday (gaiolas de Faraday)	123

4.2.4.4 – Indutâncias de fugas do transformador	126
4.3 – Transformador com enrolamentos auxiliares	134
4.3.1 – Influência dos enrolamentos auxiliares na distribuição do campo magnético do transformador	135
4.3.2 – Modelo matemático do transformador com enrolamentos auxiliares	137
4.3.2.1 – Modelo do transformador com quatro enrolamentos	137
4.3.2.2 – Modelo do transformador com enrolamentos auxiliares ligados de modo substractivo	143
4.3.2.3 – Modelo do transformador para frequência elevadas	148
4.3.3 – Formulação numérica da dinâmica do modelo do transformador	150
4.4 – Conclusões	153
CAPÍTULO 5 – PROJECTO E ENSAIO DO TRANSFORMADOR DE IMPULSOS DE ALTA TENSÃO	155
5.1 – Introdução	155
5.2 – Projecto do transformador	156
5.2.1 – Procedimento	156
5.2.2 – Dimensionamento do transformador	160
5.2.2.1 – Transformador de dois enrolamentos	162
5.2.2.2 – Transformador com enrolamentos auxiliares	164
5.3 – Estimação dos valores dos parâmetros do modelo equivalente do transformador	167
5.3.1 – Transformador de dois enrolamentos	167
5.3.2 – Transformador com enrolamentos auxiliares	169
5.4 – Avaliação da resposta do transformador ao impulso de tensão	172
5.4.1 – Transformador de dois enrolamentos	173
5.4.2 – Transformador com enrolamentos auxiliares	174
5.5 – Verificação da validade do modelo equivalente do transformador	176
5.5.1 – Condições de funcionamento do transformador de impulsos	177
5.5.2 – Determinação experimental do valor da permeabilidade magnética	178
5.5.2.1 – Procedimento	178
5.5.2.2 – Ciclo de histerese simétrico e no primeiro quadrante	179

5.5.2.3 – Efeito da introdução de entreferro no núcleo do transformador	184
5.6 – Determinação experimental dos valores dos parâmetros do modelo equivalente do transformador	187
5.6.1 – Medição das indutâncias pelo método das constantes de tempo	188
5.7 – Conclusões	191
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO	193
6.1 – Introdução	193
6.2 – Implementação experimental	194
6.3 – Fonte de alta tensão pulsada elementar	196
6.3.1 – FATP elementar com tensão de saída de -5 kV	196
6.3.1.1 – FATP elementar com transformador ETD de enrolamentos auxiliares desligados	196
6.3.1.2 – FATP elementar com transformador ETD de enrolamentos auxiliares ligados	204
6.3.1.3 – FATP elementar com transformador UR de enrolamentos auxiliares desligados	209
6.3.1.4 – FATP elementar com transformador UR de enrolamentos auxiliares ligados	211
6.3.2 – FATP elementar com tensão de saída de -10 kV	215
6.3.2.1 – FATP elementar com transformador UR de enrolamentos concêntricos	215
6.3.2.2 – FATP elementar com transformador UR de enrolamentos separados	218
6.4 – Fonte de alta tensão pulsada modular	220
6.4.1 – FATP modular com tensão de saída de -10 kV	220
6.4.1.1 – FATP modular com transformadores ETD	221
6.4.1.2 – FATP modular com transformadores UR	225
6.4.2 – FATP modular com tensão de saída de -15 kV	226
6.4.2.1 – FATP modular com transformadores ETD	227
6.4.2.2 – FATP modular com transformadores UR	229
6.5 – Ensaios da FATP com carga de IIIP	230

6.6 – Análise de resultados experimentais e discussão face aos de outros autores	238
6.7 – Conclusões	245
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES	247
7.1 – Considerações finais	247
7.2 – Trabalho realizado	248
7.3 – Resultados obtidos	252
7.4 – Perspectivas para trabalho futuro	254
BIBLIOGRAFIA	255
ANEXO 1 – Caracterização do impulso de tensão	263
ANEXO 2 – Modelo dinâmico do transformador	265
ANEXO 3 – Determinação dos coeficientes da matriz $[l_{\sigma}]$	269
ANEXO 4 – Efeitos térmicos no transformador	275
ANEXO 5 – Resultados experimentais adicionais	283
ANEXO 6 – Equipamento	295

