



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação



**Desenvolvimento e estudo de modelos de FACTS para
o trânsito de energia: Aplicação ao estudo das
condições técnicas de ligação de linhas MAT**

JORGE MIGUEL PINTO PEREIRA

Licenciado

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica – Ramo de Energia

Orientador:

Professor Doutor Francisco Alexandre Ganho da Silva Reis

Júri:

Presidente: Professor Doutor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Vogais: Professor Doutor Francisco Alexandre Ganho da Silva Reis

Professor Doutor Victor Manuel de Carvalho Fernão Pires

Lisboa, Setembro de 2013

Oração do Estudante

*Senhor, que vos sentaste
no meio dos doutores da
lei para escutar e
interrogar, em vós confio.
Infundi em mim o espírito
de sabedoria. Dai-me
perseverança e fortaleza,
obediência e diligência.
Vós que sois o caminho,
a verdade e a vida, não
permitíeis que eu desvie
do bom caminho, por
falsos ensinamentos.*

Ámen.

I. Agradecimentos e dedicatórias

Dedico este trabalho ao meu filho Afonso Tiago, que se viu privado da presença do pai em muitos e importantes momentos da sua vida.

À minha esposa Cristina pelo apoio, coragem, força e paciência que teve ao longo destes anos da minha formação.

Aos meus pais, Domingos António e Maria de Lourdes, pelo apoio, força e incentivo que me deram durante toda a minha vida.

À memória dos meus avós, António José e Ilda Miguel, pela inspiração e força que me deram, e a quem também dedico este meu triunfo.

Ao meu orientador, Professor Doutor Engenheiro Francisco Reis, que com muita paciência e despendendo do seu precioso tempo, me foi guiando na elaboração deste trabalho.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, pela oportunidade de realização da Licenciatura e do Mestrado e desenvolvimento da presente tese.

Aos meus colegas e amigos, que ao longo desta penosa caminhada sempre me apoiaram e me deram força nos momentos em que ponderei parar.

II. Resumo

Nesta dissertação são apresentados e desenvolvidos modelos de FACTS (SVC, Fixed Shunt, Switched Shunt, STATCOM, etc) em regime permanente de forma a poder analisar o seu contributo para o controlo de tensão em sistemas de energia eléctrica.

Para o efeito foi desenvolvido uma plataforma de simulação que permite o cálculo do trânsito de energia baseado no método de Newton-Raphson, com e sem a presença de FACTS.

Foi validado o modelo com uma rede teste mediante a comparação dos resultados obtidos com outro software existente.

Por último, foram estudadas as condições técnicas para o estabelecimento de tensão em linhas MAT em conformidade com a norma IEC 60038. Recorreu-se para o efeito à plataforma de simulação desenvolvida tendo sido identificados os seguintes parâmetros para os quais o problema é sensível: i) a topologia da linha; ii) o nível de tensão; iii) o comprimento da linha; iv) e o diagrama de cargas.

Palavras chave: FACTS, STATCOM, Newton-Raphson, Trânsito de Energia.

III. Abstract

The purpose of this dissertation was to develop models of FACTS (SVC, Fixed Shunt, Switched Shunt, STATCOM, etc.) for steady-state analysis in order to be able to evaluate their contribution to the control voltage power systems.

For this purpose a simulation platform was developed which allows the calculation of the power flow based on the Newton-Raphson method, with and without the presence of FACTS devices.

The model was validated with a test network by comparing the results obtained using other software platform.

Finally, the technical conditions for the establishment of EHV lines in accordance with IEC 60038 international standard. With the help of the simulation platform were presented and studies the following parameters were identified as the ones that may influence the value of the voltage at the end of an EHV line and studied the contribution of FACTS to control it: i) line configuration; ii) voltage level; iii) line length; iv) load diagram.

Keywords: FACTS, STATCOM, Newton-Raphson, Power Flow

Índice

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJECTIVOS	12
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
CAPÍTULO II – INTRODUÇÃO AOS DISPOSITIVOS FACTS	15
2.1 INTRODUÇÃO	16
2.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS ACTUALMENTE EXISTENTES	17
2.3 CONFIGURAÇÕES COMUNS	20
2.3.1 <i>Compensação Paralela (Shunt)</i>	21
2.3.2 <i>Compensação Série</i>	24
2.3.3 <i>Compensação Combinada Série e Paralela (Shunt)</i>	26
2.4 APLICAÇÕES	29
CAPÍTULO III - MODELIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FACTS EM REGIME PERMANENTE.....	31
3.1 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	32
3.1.1 <i>Método de Newton-Rapshon aplicado ao trânsito de energia</i>	35
3.1.2 <i>Construção do Jacobiano</i>	38
3.1.3 <i>Sistema de Equações</i>	40
3.2 MODELOS FACTS IMPLEMENTADOS	42
3.2.1 <i>Fixed Shunt</i>	42
3.2.2 <i>Switched Shunt</i>	44
3.2.3 <i>Static Synchronous Compensator</i>	46
3.3 OUTROS MODELOS DE DISPOSITIVOS FACTS	52
3.3.1 <i>Static Var Compensator</i>	52
3.3.2 <i>Thyristor Controlled Series Compensator</i>	53
3.3.3 <i>Static Synchronous Series Compensator</i>	55
3.3.4 <i>Unified Power Flow Controller</i>	57
3.4 APLICAÇÃO	60
3.4.1 <i>Caracterização de uma rede de 6 barramentos</i>	60
3.4.2 <i>Rede base</i>	62
3.4.3 <i>Rede com compensação</i>	63

CAPÍTULO IV – ESTABELECIMENTO DE TENSÃO EM LINHA MAT: APLICAÇÃO DE FACTS.....	67
4.1 INTRODUÇÃO	68
4.2 NORMA IEC 60038	69
4.3 METODOLOGIA.....	70
4.4 INFLUÊNCIA DA TOPOLOGIA DA LINHA.....	71
4.5 INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE TENSÃO APLICADO	72
4.6 INFLUÊNCIA COMPRIMENTO DA RESPECTIVA LINHA	73
4.7 INFLUÊNCIA DO DIAGRAMA DE CARGAS	76
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	81
BIBLIOGRAFIA.....	85
ANEXO A - DADOS E RESULTADOS	
ANEXO B - MANUAIS	

Índice de figuras

Figura 2.1 – Dispositivos FACTS	17
Figura 2.2 – Configuração do TSR/TCR	20
Figura 2.3 – Configuração do TSC	20
Figura 2.4 - Configuração do TCR/FC e do TCR/TSC	21
Figura 2.5 - Característica Tensão/Corrente do SVC	22
Figura 2.6 - Representação estrutural de um STATCOM e característica Tensão/Corrente	23
Figura 2.7 - Esquema operacional do TCSC e respectiva característica Tensão /Corrente	24
Figura 2.8 - Configuração do SSSC e respectiva característica Tensão /Corrente	25
Figura 2.9 - Configuração do DFC e característica Tensão / Corrente	26
Figura 2.10 - Configuração do UPFC.....	27
Figura 2.11 - Configuração do IPFC	28
Figura 2.12 - Configuração do GUPFC.....	28
Figura 2.13 - Gama de funcionamento dos semicondutores de potência	29
Figura 3.1 - Modelo em π da linha [1].....	35
Figura 3.2 - Rede de 2 Barramentos.....	37
Figura 3.3 - Fluxograma do método de Newton-Raphson	42
Figura 3.4 - Fluxograma do método de Newton-Raphson com Fixed Shunt.....	43
Figura 3.5 – Fluxograma do método de Newton-Raphson com Switched Shunt	45
Figura 3.6 - Esquema do STATCOM	46
Figura 3.7 - Fluxograma do processo com introdução de STATCOM.....	51
Figura 3.8 - Esquema do SVC com um condensador fixo e um TCR	52
Figura 3.9 - Esquema equivalente do SVC representado pelo STATCOM.....	52
Figura 3.10 - Esquema equivalente do TCSC	53
Figura 3.11 – Esquema equivalente do SSSC.....	55
Figura 3.12 - Esquema equivalente do UPFC	57
Figura 3.13 - Rede de 6 Barramentos.....	60
Figura 3.14 - Rede de 6 Barramentos com compensação	63
Figura 4.1- Linha com 2 barramentos	70
Figura 4.2 - Linha de 2 barramentos com STATCOM	72
Figura 4.3 - Linha de 300kV com STATCOM	76
Figura 4.4 - Rede com duas cargas.....	77

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Características de FACTS para níveis de Tensão de AT (15 e 33kV)	17
Tabela 2.2 - Características de FACTS para níveis de Tensão MAT (132, 138, 150 e 161 kV) 18	
Tabela 2.3 - Características de FACTS para níveis de Tensão MAT (220, 230 e 275 kV).....	18
Tabela 2.4 - Características de FACTS para níveis de Tensão MAT (Superiores a 300kV)	19
Tabela 3.1 - Dados dos geradores.....	60
Tabela 3.2 - Dados das cargas	61
Tabela 3.3 - Características dos ramos da rede em análise.	61
Tabela 3.4 - Resultados para a rede de 6 barramentos	62
Tabela 3.5 - Resultados para a rede 6 barramentos com controlo da tensão.....	64
Tabela 3.6 - Resultados para a rede 6 barramentos sem controlo da tensão.....	65
Tabela 4.1 - Valores em pu atribuídos pela Norma IEC 60038	69
Tabela 4.2 – Valores em pu usados nas simulações.....	69
Tabela 4.3 - Características em pu das linhas de 150, 220 e 440kV	71

Índice de gráficos

Gráfico 4.1 - Comparação ente linha simples e linha dupla	71
Gráfico 4.2- Nível de tensão sem compensação	72
Gráfico 4.3 - Linha simples, cenário de vazio	73
Gráfico 4.4 - Linha dupla, cenário de vazio.....	74
Gráfico 4.5 - Linha simples, hora de ponta	74
Gráfico 4.6 - Linha dupla, hora de ponta.....	75
Gráfico 4.7 – Nível de tensão com compensação	75
Gráfico 4.8 - Diferença cenário de ponta e cenário de vazio.....	76
Gráfico 4.9 - Linha com 300 km num cenário de tensão reduzida	77
Gráfico 4.10 - Linha com 300 km, num cenário de tensão elevada.....	78
Gráfico 4.11 – a) Linha simples e b) linha dupla, em cenário de tensão reduzida (carga de 200 MW + 40MVA _r no barramento 2)	78
Gráfico 4.12 – Linha dupla a) sem carga e b) com carga no barramento 2, em cenário de tensão elevada	79

Acrónimos

SVC	Static VAR Compensator
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TSR	Thyristor Switched Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
FC	Fixed Filter Circuit
STATCOM	Static Synchronous Compensator
TCSC	Thyristor-Controlled Series Compensator
TCPS	Thyristor Controlled Phase Shifter
DFC	Dynamic Power Flow Controller
MSC	Mechanically Switched Shunt Capacitor
HVDC B2B	High Voltage Direct Current - Back to Back
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
DVR	Dynamic Voltage Restorer
UPFC	Unified Power Flow Controller
IPFC	Interline Power Flow Controller
VSC	Voltage Source Converter
PST	Phase Shifting Transformer
DFC	Dynamic Flow Controller
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Insulated Gate Commutated Thyristors
GTO	Gate Turn Off thyristor
HV-IGBT	High Voltage - Insulated Gate Bipolar Transistor
LV-IGBT	Low Voltage - Insulated Gate Bipolar Transistor
IEC	International Electrotechnical Commission
BT	Baixa Tensão
AT	Alta Tensão
MAT	Muito Alta Tensão

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, pretende-se dar uma breve introdução sobre o tema deste trabalho, bem como expor o modo como se encontra o trabalho organizado.

1. INTRODUÇÃO

Os *FACTS* (*Flexible Alternating Current Transmission System*) são dispositivos Estáticos de Compensação de Potência Reactiva, Potência Activa, módulo da tensão, entre outros tipos de controlo. Por esse motivo, estes dispositivos são modelados de forma a conferir à rede uma maior flexibilidade no seu funcionamento. Flexibilidade essa muito importante nos tempos que correm devido, entre outras, à crescente integração de fontes de energias renováveis bem como da necessidade de adaptação ao diagrama de cargas.

1.1 Objectivos

Pretende-se com este trabalho desenvolver uma plataforma de simulação que permita ilustrar o contributo que um controlador que gere Potência Reactiva para controlo da tensão num dado barramento de uma rede de energia eléctrica, baseado na tecnologia *FACTS*.

Para o efeito, será demonstrado uma plataforma de simulação que permita o cálculo do trânsito de energia baseado no método de Newton-Raphson, e inclui modelos *FACTS* em regime permanente que foram desenvolvidos.

Serão estudados três tipos de compensação reactiva, respectivamente:

- “**Fixed shunt**”, ou carga reactiva (indutiva ou capacitiva) utilizados em sistemas de transmissão de energia de alta tensão para controlar a tensão durante as variações de carga;
- “**Switched Shunt**” ou baterias de cargas reactivas (indutivas e capacitivas), que são utilizadas por escalões para a gestão de reactiva de um sistema de energia eléctrica;
- E por fim um **FACTS** do tipo “**STATCOM**” (*Static Synchronous Compensator*), ou compensador estático síncrono, que é um dispositivo que interage na rede como uma fonte de tensão ou de corrente.

Finalmente será ilustrado uma aplicação de *FACTS* (*STATCOM*) para melhorar a estabilidade de tensão de uma rede eléctrica.

1.2 Organização do trabalho

A presente Dissertação, encontra-se organizada por cinco capítulos, os quais seguidamente são apresentados.

O capítulo II, são apresentados algumas notas históricas sobre a necessidade de compensação de potência reactiva nas redes e ilustrada a utilização de tecnologia *FACTS* em várias regiões do globo indicando as principais características por nível de tensão. Neste capítulo, será também efectuada uma breve pesquisa sobre dispositivos *FACTS* e suas aplicações.

No capítulo III, é desenvolvido trânsito de energia com utilização do método de Newton-Raphson para a sua resolução. De particular importância são indicadas as alterações necessárias a fazer para a introdução de um *Fixed Shunt*, um *Switched Shunt* ou um *STATCOM* na resolução do trânsito de energia com o método de Newton-Raphson.

É realizada a validação de uma plataforma de simulação desenvolvida em VBA através de uma rede de 6 barramentos comparando os respectivos resultados com os obtidos num *software* de referência internacional¹.

O quarto capítulo é efectuada a aplicação da ferramenta de cálculo para o estudo da compensação de potência reactiva em linhas de transporte de energia de Muito Alta Tensão (M.A.T.). São estudadas a influência do nível de tensão, do comprimento da respectiva linha, do diagrama de cargas e da topologia da linha.

O capítulo V, são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido e delineadas linhas de orientação para trabalhos futuros.

¹ PSS®E University versão 33

CAPÍTULO II - INTRODUÇÃO AOS DISPOSITIVOS FACTS

Neste capítulo são apresentadas algumas notas históricas sobre a compensação de potência reactiva nas redes e a tecnologia FACTS no mundo. Tem lugar também neste capítulo, uma breve pesquisa sobre dispositivos FACTS e suas aplicações. Pretende-se mostrar alguns tipos diferentes de compensadores e o modo como actuam sobre os sistemas onde são inseridos.

2. INTRODUÇÃO AOS DISPOSITIVOS FACTS

2.1 Introdução

A necessidade de compensar a energia reactiva vem desde o início do século XX, com a primeira instalação a ser feita em 1914, do tipo “*Fixed shunt*” com o objectivo corrigir o factor de potência [6].

Desde o desenvolvimento do primeiro tiristor pela General Electric, em 1957, determinou o que se pretendia deste tipo de componentes: baixas perdas de comutação e perdas mínimas de condução. Com a invenção e desenvolvimento dos componentes com base em semicondutores e a criação da electrónica de potência, foram criados os primeiros tiristores rectificadores por volta do ano de 1965, chegando aos dias de hoje com os IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) e IGCT (*Insulated Gate Commutated Thyristors*) [4].

Os FACTS [4], são controladores de alta potência baseados na utilização da electrónica de potência. A actuação destes controladores nos sistemas onde estão inseridos diminui, entre outras, potenciais problemas de estabilidade de tensão. Permitem, numa óptica operacional, uma adaptação ao diagrama de cargas do sistema, sendo caracterizados por possuírem tempos de actuação rápidos quando comparados com as soluções clássicas.

O SVC (*Static VAR Compensator*) teve a sua primeira aplicação comercial [4] em 1972, num forno de arco eléctrico, e em 1979 numa linha de transporte de energia.

Em 1999 entra em operação o primeiro SVC com conversor de fonte de tensão (VSC) chamado *STATCOM*, com uma característica de funcionamento muito semelhante ao apresentado por um condensador. Com a electrónica de potência cada vez mais desenvolvida, o *STATCOM*, sendo uma tecnologia baseada no GTO (*Gate Turn Off thyristor*), tornou-se uma alternativa ao tradicional SVC. A construção deste tipo de dispositivos (*STATCOM*) começou por ser feita com IGCTs, mas sendo agora cada vez mais com IGBTs, dando-lhe assim a curva de característica apresentada mais à frente na Figura 2.6.

O primeiro TCSC (“*Thyristor Controlled Series Compensator*”), para compensação serie em linhas de transporte de energia, entrou ao serviço em 1996 [4].

Na Figura 2.1 são ilustrados as diferentes tecnologias *FACTS*, e com base na mesma será descrito o funcionamento de cada um dos dispositivos *FACTS* existentes e o modo como se inserem na rede.

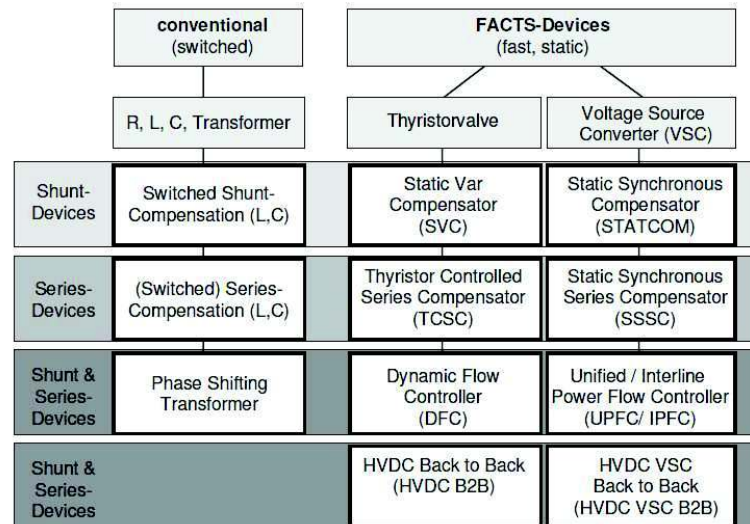


Figura 2.1 – Dispositivos FACTS

Os controladores *FACTS* dividem-se basicamente em três tipos: os do tipo Série, do tipo Paralelo, ou do tipo combinado série-paralelo ou serie-série, sendo que estes últimos incluem os outros dois tipos num só dispositivo².

2.2 Características técnicas actualmente existentes

Seguidamente são indicados de forma sucinta algumas características de dispositivos *FACTS* actualmente existentes e em operação em diversos sistemas de energia eléctrica.

Tendo por base uma marca de referência de fabricantes [9], nas tabelas seguintes são ilustrados exemplos de aplicações deste tipo de tecnologia pelo mundo.

Localização	Tensão [kV]	Potência[MVA]
Rejsby, Dinamarca	15/3	-8/8
Afif, Arábia Saudita	33	-50/100

Tabela 2.1 – Características de *FACTS* para níveis de Tensão de AT (15 e 33kV)

² No âmbito do presente trabalho não são abordados os seguintes dispositivos: PST, HVDC, B2B e o HVDC VSC B2B.

A aplicação pode ser tanto a nível de transporte, como de distribuição de energia [5], indicando-se por nível de tensão em que funcionam, as potências que injectam (ou absorvem) na rede [9].

Localização	Tensão [kV]	Potência[MVAr]
Brushy, Canadá	138	-20/120
Jember, Indonésia	150	-25/50
Ahafo, Ghana	161	-40/0
Alligator Crrk, Austrália	132	-80/150 (230)
Bellaire, USA	138	0/140
Crosby, USA	138	0/140
Qassim, Arábia Saudita	132	-150/450

Tabela 2.2 - Características de *FACTS* para níveis de Tensão MAT (132, 138, 150 e 161 kV)

Localização	Tensão [kV]	Potência[MVAr]
Limpio, Paraguai	220	-150/250
Shinyanga & Iringa, Tanzânia	220	-30/35
Islington, Nova Zelândia	220	-75/150
Zem Zem, Líbia	230	-50/25
Fortaleza, Brasil	230	-140/200
Banabuiu, Brasil	230	-70/100
SPS, USA	230	-50/100
Cerro Gordo, México	230	-75/230
La Pila, México	230	-70/200
Funil, Brasil	230	-100/200
Sinop, Brasil	230	-20/55
Milagres, Brasil	230	-70/100
São Luis, Brasil	230	-100/150
Elmhust, USA	230	2*(0/300)
Lakehead, Canadá	230	-40/45(60)
Harker, Reino Unido	275	-75/150
Drakelow, Reino Unido	275	-75/150
Freckenham, Reino Unido	275	-75/150
Strathmore, Austrália	275	-80/180 (260)
Green & Southpine	275	-100/250 (350)

Tabela 2.3 - Características de *FACTS* para níveis de Tensão MAT (220, 230 e 275 kV)

Pode-se constatar que à medida que o nível de tensão onde são ligados os dispositivos *FACTS* aumenta, é superior a gama de reactiva que estes dispositivos podem providenciar.

Localização	Tensão [kV]	Potência[MVAr]
Kemps Creek I & II, Austrália	330	-110/150
Pelham I + II, Reino Unido	400	-75/150
Muldersvlei, África do Sul	400	-150/200
Siems, Alemanha	380	-100/200
Nopala, Mexico	400	-90/300
Hiteen, Arábia Saudita	380	-200/600(800)
Adelanto & Marketplace WSCC, USA	500	0/388
Chinú, Colombia	500	-150/250
Bom Jesus da Lapa, Brasil	500	-250/250
Nanticoke, Canadá	500	0/350

Tabela 2.4 - Características de *FACTS* para níveis de Tensão MAT (Superiores a 300kV)

Este tipo de dispositivos permite uma maior gama de soluções neste campo, tais como:

- Controle dinâmico de tensão;
- Controlo de potência reactiva;
- Amortecimento das oscilações de potência activa;
- Melhoria da estabilidade do sistema e da qualidade da energia;
- Melhoria de fiabilidade em sistemas de energia eléctrica.

2.3 Configurações comuns

O princípio de funcionamento de um SVC consiste na junção de TSC's (*Thyristor Switched Capacitor*) e de TSR's (*Thyristor Switched Reactor*) ou TCR's (*Thyristor Controlled Reactor*).

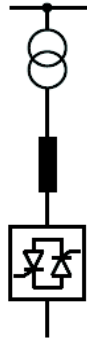


Figura 2.2 – Configuração do TSR/TCR

O TCR, [6] consiste na série de uma bobina com dois tirístores, conforme ilustrado na Figura 2.2. Sendo que este dispositivo é o equivalente a uma reactância variável, cujo valor varia com o ângulo de disparo, permitindo assim o controlo da corrente de compensação.



Figura 2.3 – Configuração do TSC

O TSC, conforme a Figura 2.3 representa um condensador em série com dois tirístores, de forma a permitir o uso bidireccional da corrente, tal qual a Figura 2.2. Tal como o TCR, o TSC também podem controlar a corrente de compensação, variando o ângulo de disparo dos tirístores, regulando assim a potência reactiva do sistema [6].

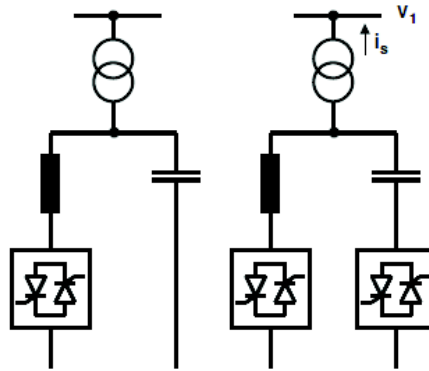


Figura 2.4 - Configuração do TCR/FC e do TCR/TSC

Existem várias configurações para o SVC, porém a combinação de TSC e do TCR (Figura 2.4) é a mais considerada pois esta disposição torna possível o controlo rápido e fino do SVC sobre níveis predeterminados de potência reactiva dentro dos seus limites capacitivos e indutivos.

2.3.1 Compensação Paralela (Shunt)

Os controladores de compensação paralela ou shunt, injectam uma corrente em quadratura com a tensão do sistema. Corrente essa com origem nas reactâncias capacitivas ou indutivas variáveis, no caso do SVC, ou de fonte de tensão ou de corrente controlada, no caso do *STATCOM*.

A maioria dos dispositivos *FACTS* usados são os SVC ou os *STATCOM* estes últimos com VSC, com o objectivo de realizar o controlo do nível da tensão no barramento em que se encontram ligados. Tal controlo é efectuado com a injeção ou absorção de potência reactiva.

- **Switched Shunt Compensation (L,C)**

O *Switched Shunt Compensation*, tem um funcionamento simples, as cargas reactivas (Indutivas ou capacitivas) são seleccionadas gradualmente, sendo que resulta numa variação de reactância escalonada [4].

- **Static Var Compensator (SVC)**

O SVC é um dispositivo baseado na associação de TCRs e de TSCs (Figura 2.2 e Figura 2.3), sendo que também é constituído por condensadores em paralelo. Mas devido à utilização de tirístores existe uma distorção da corrente, pelo que, poderá injectar uma potência deformante na rede. De modo a atenuar este problema, normalmente são utilizados filtros de harmónicas [4].

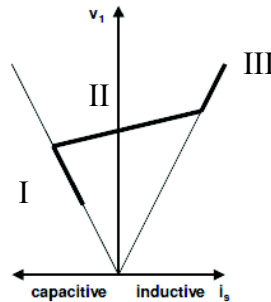


Figura 2.5 - Característica Tensão/Corrente do SVC

A característica V-I (tensão-corrente) do SVC, representada na Figura 2.5, define três zonas distintas de operação:

- I. Zona onde só os condensadores estão ligados com a rede;
- II. Zona de regulação onde a potência reactiva é devida à combinação dos TCR com os TSC;
- III. Zona onde actua o TCR e os condensadores estão desligados.

- **STATCOM**

Do ponto de vista do transporte de energia, este tipo de dispositivos providencia uma melhor estabilidade da rede. Os *STATCOM* pertencem a uma segunda geração de dispositivos usados para a compensação paralela (*shunt*). São usados preferencialmente para o controlo do módulo de tensão através da injeção na rede de potência reactiva, tornando-se uma alternativa ao SVC [4].

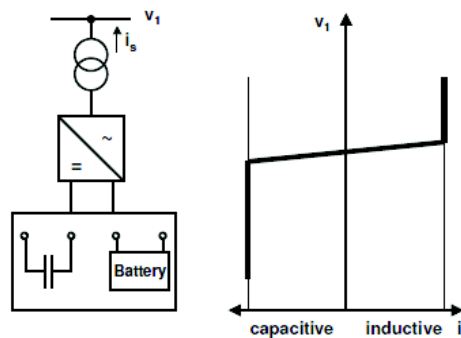


Figura 2.6 - Representação estrutural de um *STATCOM* e característica Tensão/Corrente

Apesar de ser conhecido desde o fim dos anos 70, é no final da década de 90 que vai alcançar um grande sucesso. Sucesso esse devido ao desenvolvimento dos tirístores de tecnologia “*turn-off*” ou GTO ou cada vez mais os IGBTs. Na Figura 2.6 encontra-se a representação de um *STATCOM* e a respectiva característica Tensão/Corrente, pela qual podemos ver a vantagem na compensação, do *STATCOM* sobre o SVC, pois supera este nalgumas limitações, nomeadamente no controlo da tensão.

Conforme a Figura 2.6, o *STATCOM* é constituído por um conversor CC/CA (inversor) como fonte de tensão controlada, associado a um condensador e ligado à rede por meio de um transformador. O *STATCOM* permite gerar uma onda de tensão com amplitude e ângulo variável devido à utilização de dispositivos totalmente controlados (GTO, IGBT) [4].

A característica $V(I)$ da Figura 2.6 é semelhante à característica apresentada por uma fonte de tensão com limites de reactiva.

2.3.2 Compensação Série

Os controladores do tipo série, injectam uma tensão na rede, tensão essa que se encontra em quadratura com corrente da linha, originando por isso uma reactância capacitiva variável, como no caso do *Thyristor Controlled Series Compensator* (TCSC), ou do *Static Synchronous Series Compensator* (SSSC), sendo considerados uma fonte de tensão controlada em magnitude. Estes equipamentos têm uma grande capacidade de controlo de potência nas linhas de transporte de energia e amortecimento de oscilações electromecânicas.

- **Switched Series Compensation (L,C)**

O *Switched Series Compensation*, tem um funcionamento simples, as cargas reactivas (Indutivas ou capacitivas) são seleccionadas gradualmente, sendo que resulta numa variação de reactância escalonada.

- **Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)**

Este dispositivo é ligado em série com a rede e permite o controlo de potência activa, sendo que é composto por um condensador ligado em paralelo com uma bobina controlada por tirístores, como se observa na Figura 2.7.

O ângulo de disparo e os limites térmicos dos tirístores determinam os limites do diagrama operacional. O TCSC também pode regular o fluxo de energia no estado de equilíbrio dentro dos seus limites de operação [4].

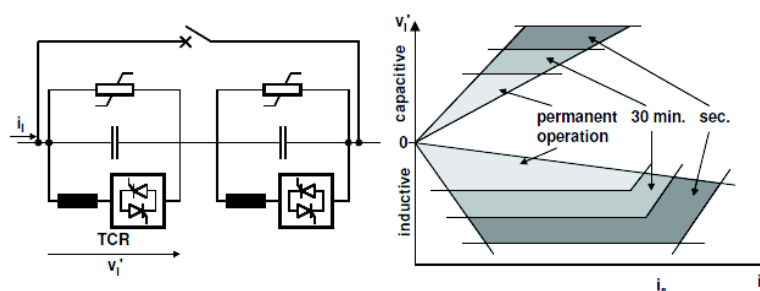


Figura 2.7 - Esquema operacional do TCSC e respectiva característica Tensão /Corrente

Devido à capacidade de comutação de alta velocidade, o TCSC fornece um mecanismo para controlar fluxo de potência da linha, permitindo o aumento ou

redução de carga de transmissão existente nas linhas, permitindo a rápida readequação do fluxo de potência de linha no caso de ocorrência de contingências na rede.

- **Static Synchronous Series Compensator (SSSC)**

O SSSC, tem como princípio de funcionamento a inserção da fonte de tensão em série com a linha de transmissão de energia, como apresentado na Figura 2.8. Esta configuração é muito semelhante ao *STATCOM* (Figura 2.6).

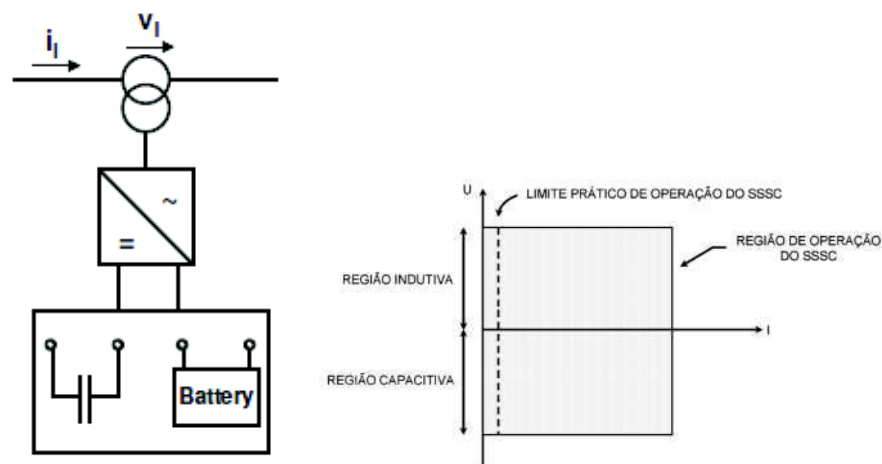


Figura 2.8 - Configuração do SSSC e respectiva característica Tensão /Corrente

A tensão gerada pelo conversor deve estar em quadratura e atrasada em relação à corrente, de forma que apresente a mesma característica de um condensador, proporcionando um efeito capacitivo sobre o sistema onde se encontra inserido. A sua característica indutiva também pode ser sintetizada e pode ser útil nos casos em que se deseja diminuir o fluxo de potência transmitida.

Tal como referido anteriormente, o SSSC proporciona um controlo de fluxo de potência de forma rápida e precisa inserindo uma tensão em série, com a possibilidade de ser regulada para alterar a impedância de uma linha de transmissão.

2.3.3 Compensação Combinada Série e Paralela (Shunt)

Os controladores que combinam a compensação Série e Paralela, têm a grande vantagem de, mesmo separados, funcionarem de modo coordenados entre si. Controlam o fluxo de potência, injectando no sistema corrente pelo módulo “*shunt*” e tensão pelo módulo Série.

- **Dynamic Flow Controller (DFC)**

O DFC consiste na junção de dois tipos de dispositivos, o *Phase Shifting Transformer* (PST) e o *Switched Series Compensation*. Tal como ilustrado na Figura 2.9, este dispositivo é constituído por um PST, a ligação série de TSCs e TSRs e um *Mechanically Switched Shunt Capacitor* (MSC) [4].

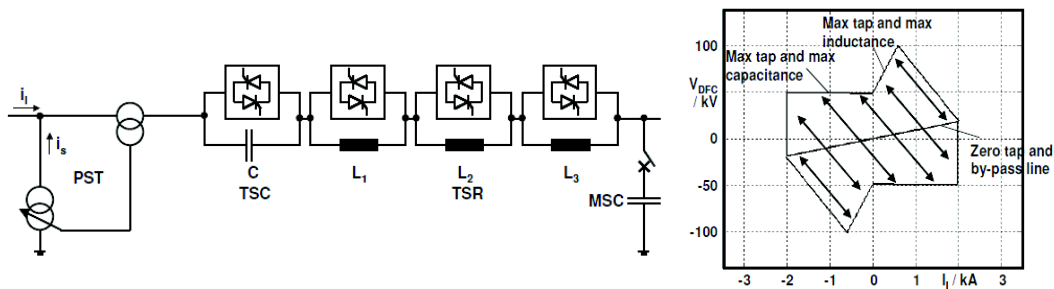


Figura 2.9 - Configuração do DFC e característica Tensão / Corrente

Pela característica Tensão/Corrente, a operação no primeiro e terceiro quadrantes corresponde a uma redução da potência através do DFC, ao passo que a operação nos segundo e quarto quadrantes corresponde ao aumento do fluxo de potência por meio do DFC. A inclinação da linha que passa pela origem (em que a tomada está em zero e o TSC / TSR são ignorados) depende da reactância de curto-circuito do PST [4].

- **Unified Power Flow Controller (UPFC)**

O UPFC [4], é usado no controlo do trânsito de potência activa e reactiva e consequentemente, na compensação do factor de potência. Este tipo de dispositivo pertence a uma 3ª geração de Compensadores do tipo *FACTS*, resultando na combinação de um *SSSC* e de um *STATCOM* num só, conforme a Figura 2.10 [4].

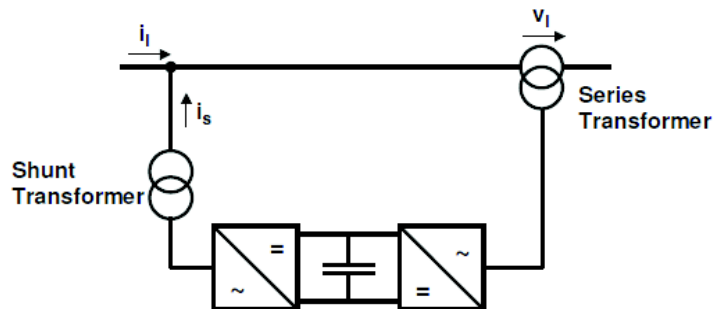


Figura 2.10 - Configuração do UPFC

Este dispositivo pode actuar sobre todos os parâmetros que determinam o fluxo de potência numa linha de transmissão, ou seja, pode controlar a tensão, o ângulo e a fluxo de potência simultaneamente.

Este dispositivo é composto de dois conversores de fonte de tensão, inserido em série e em paralelo com a linha, interligados por um condensador conforme a Figura 2.10

O conversor paralelo tem como principal função disponibilizar a potência activa necessária para o conversor série transferir à linha de transmissão, através do condensador de interligação. Este conversor pode também absorver ou gerar potência reactiva através de sua interligação com o barramento onde se encontra instalado o UPFC, constituindo portanto, uma fonte controlável de potência reactiva, efectuando uma função semelhante à realizada pelo dispositivo SVC.

O conversor série realiza a função principal do UPFC, inserindo uma tensão série com a linha de transmissão que pode ser controlada em magnitude e ângulo. Desta forma, de acordo com a diferença angular entre a tensão inserida e a corrente na linha de transmissão, esse controlador pode absorver ou injectar potência activa e/ou reactiva na linha de transmissão.

- **Interline Power Flow Controller (IPFC)**

Enquanto o IPFC, existindo uma quarta geração, é onde este dispositivo se encaixa.

Este dispositivo é um controlador combinado série-série, que actua de maneira efectiva sobre a potência reactiva em múltiplas linhas de transmissão e realiza a transferência de potência activa entre controladores, conforme demonstrado na Figura 2.11, combinando dois ou mais conversores do tipo série. [4].

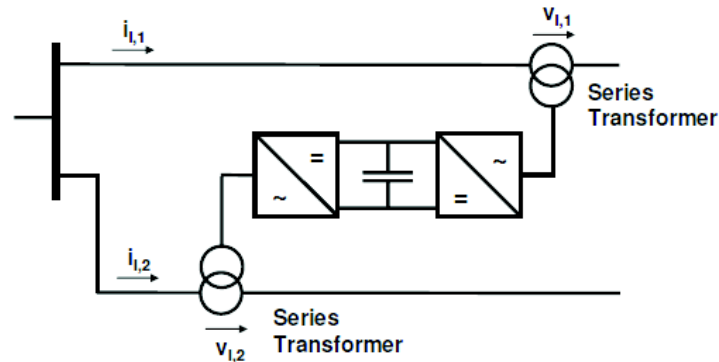


Figura 2.11 - Configuração do IPFC

- **Generalized Unified Power Flow Controller (GUPFC)**

O dispositivo GUPFC [4], combina três ou mais compensadores paralelos e séries, conforme a Figura 2.12, seguindo o conceito do controlo de tensão e fluxo de potência.

A configuração mais simples deste dispositivo combina três conversores, em que um é ligado em paralelo (UPFC) e dois são ligados em série (IPFC) [4].

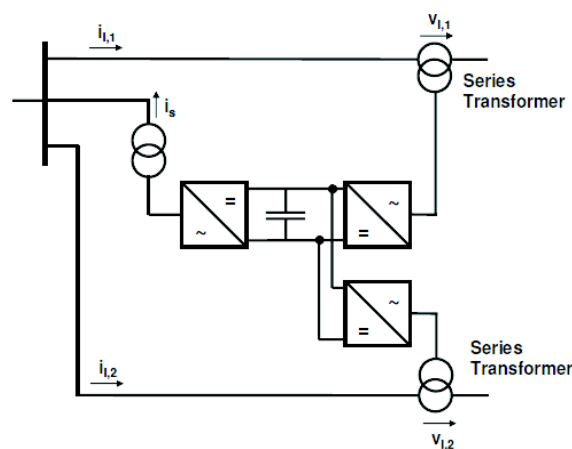


Figura 2.12 - Configuração do GUPFC

Em geral, o GUPFC, pode ser usado para aumentar a capacidade de transferência e aliviar o congestionamento de uma forma flexível.

2.4 Aplicações

Com a constante alteração do Diagrama de Cargas, desde as horas de ponta para as horas de vazio e vice-versa, houve a necessidade de criar um dispositivo que actuasse rapidamente. Graças à electrónica de potência, a tecnologia *FACTS* tem vindo a desenvolver e a melhorar de dia para dia, pelo que hoje existe disponível uma maior variedade de tirístores e transístores.

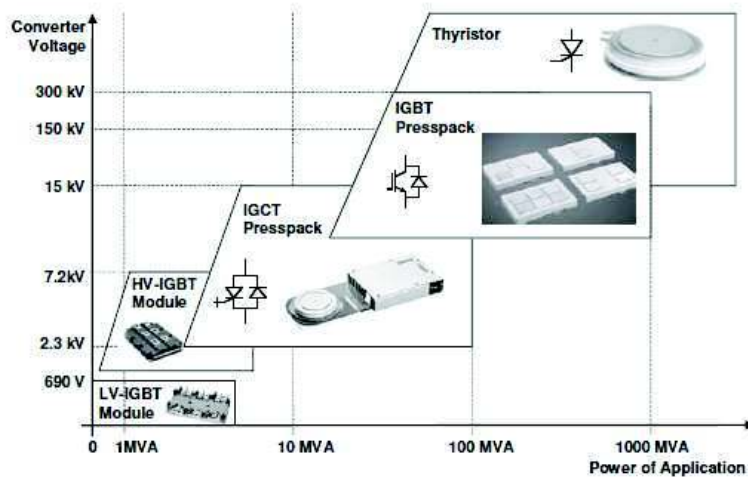


Figura 2.13 - Gama de funcionamento dos semicondutores de potência

Como podemos constatar na Figura 2.13, as gamas de tensão vs. potência para aplicações específicas dos semicondutores. Devido à sua grande capacidade de bloqueio à tensão e corrente, são utilizados como interruptores em conversores para compensadores de potência reactiva (capacitiva ou indutiva).

Estes tipos de dispositivos que têm como objectivo a compensação de Potência Reactiva, podem ter as mais variadas aplicações, nomeadamente fornos de arco eléctrico, tracção, estabilidade no transporte de energia, visto trabalharem com fiabilidade para níveis de tensão superiores a 300kV e potências acima de 1000MVA [4][7].

CAPÍTULO III - MODELIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FACTS EM REGIME PERMANENTE

Neste capítulo, é apresentado e desenvolvido o método de Newton-Raphson, para a resolução do problema do trânsito de energia numa rede. Ainda neste campo, demonstra-se as alterações necessárias a fazer no método de Newton-Raphson para a introdução de um Fixed Shunt, um Switched Shunt ou um STATCOM.

É realizada uma validação da plataforma de simulação desenvolvida em VBA através de uma rede de 6 barramentos e comparados os respectivos resultados com os obtidos num “software” de referência internacional ³.

³ PSS®E University versão 33.

3. MODELIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FACTS EM REGIME PERMANENTE

Nos próximos pontos, descreve-se de forma sucinta o cálculo do trânsito de energia pelo método de Newton-Raphson.

Nesta descrição dá-se ênfase especial à inclusão de dispositivos de compensação de potência reactiva, nomeadamente os casos de *Fixed Shunts*, *Switched Shunts* e de dispositivos *FACTS (STATCOM)*, pois estes dispositivos foram os únicos a serem implementados na plataforma de cálculo em VBA.

3.1 Método De Newton-Raphson

Este método de cálculo tornou-se muito utilizado na solução do trânsito de energia, desde a sua implementação na década de 60, uma vez que, apesar de exigir uma maior capacidade memória por parte dos computadores, é caracterizado por ter uma velocidade de convergência muito superior [10].

Este método tem o objectivo de estimar as raízes de uma determinada função. Para o efeito do método inicializa-se tomando um ponto qualquer do domínio da função. Calcula-se a função derivada da função nesse ponto e calcula-se a intercepção da tangente ao eixo das abcissas a fim de encontrar um novo ponto do domínio da função. Repete-se o processo, que deverá tender para uma das raízes da referida função.

Ou seja, arbitrando um dado valor x^0 suficientemente próximo de uma das raízes reais da equação $y = f(x)$, pode-se obter uma aproximação melhor, x^{k+1} , onde $k=0, 1, 2, \dots, n$. A referida função pode ser expandida segundo a série de Taylor da seguinte forma:

$$y = f(x^k) + f'(x^k)\Delta x^k + \frac{f''(x^k)}{2!}(\Delta x^k)^2 + \dots + \frac{f^n(x^k)}{n!}(\Delta x^k)^n \quad (3.1)$$

Admitindo-se estar próximo da solução, os valores da segunda ordem da série de Taylor devem ser muito pequenos e podem ser desprezados. Considera-se então o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} f_1(x_1, \dots, x_n) = y_1 \\ \dots \dots \dots \\ f_i(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = y_i \\ \dots \dots \dots \\ f_n(x_1, \dots, x_n) = y_n \end{cases} \quad (3.2)$$

Onde y_1, y_2, \dots, y_n são as constantes. As funções f_1, f_2, \dots, f_n podem ser expandidas em série de Taylor em torno de um ponto $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$.

Sob a forma matricial compacta tem-se então:

$$[f[x]] = [y] \quad (3.3)$$

Tomando um valor inicial estimado $[x^0]$ para o vector das incógnitas, tem-se:

$$[f[x^0 + \Delta x^0]] = [y] \quad (3.4)$$

Linearizando a função em torno de $[x^0]$, vem:

$$[f[x^0]] + [J^0][\Delta x^0] = [y] \quad (3.5)$$

Ou ainda:

$$[J^0][\Delta x^0] = [\Delta y^0] \quad (3.6)$$

Onde $[J]$ é uma matriz $n \times n$ designada por Jacobiano:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$[\Delta x]$ e $[\Delta y]$ são vectores com n componentes:

$$[\Delta x] = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$[\Delta y] = \begin{bmatrix} y_1 - f_1[x] \\ \vdots \\ y_n - f_n[x] \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Na iteração k , a equação 3.6 escreve-se:

$$[J^k][\Delta x^k] = [\Delta y^k] \quad (3.10)$$

Este sistema de equações lineares pode resolver-se em ordem a $[\Delta x^k]$ por inversão do Jacobiano⁴:

$$[\Delta x^k] = [J^k]^{-1}[\Delta y^k] \quad (3.11)$$

Adicionando o acréscimo $[\Delta x^k]$ ao vector das incógnitas $[x^k]$ obtido na iteração anterior (ou valor inicialmente estimado), obtém-se uma melhor aproximação da solução final:

$$[x^{k+1}] = [x^k] + [\Delta x^k] = [x^k] + [J^k]^{-1}[\Delta y^k] \quad (3.12)$$

Note-se que o Jacobiano tem de ser recalculado em cada iteração, usando os valores das incógnitas obtidos na iteração anterior [3].

⁴ A inversão do Jacobiano é computacionalmente pesada para sistemas de grande dimensão.

3.1.1 Método de Newton-Rapshon aplicado ao trânsito de energia

- **Classificação dos barramentos**

Na análise do fluxo de energia [1], classificam-se os barramentos segundo as seguintes categorias: barramento de referência, barramento do tipo PV e por fim os barramentos do tipo PQ.

Sendo que o *barramento de referência* é o barramento em que é especificado o módulo e o argumento da tensão, enquanto a potência activa e reactiva são desconhecidas. O argumento da tensão deste barramento irá condicionar o argumento da tensão dos restantes barramentos.

Por norma, na maioria dos sistemas, só existe um barramento de referência. Contudo, em sistemas de grande dimensão é possível que exista mais do que um sistema de referência.

Os *barramentos do tipo PV*, são barramentos onde existe geração de energia, pelo que o valor da potência activa e o módulo da tensão são conhecidos. O argumento da tensão e a potência reactiva injectada são variáveis desconhecidas.

Já nos *barramentos do tipo PQ* as potências activa e reactiva são especificadas, ao passo que o argumento e módulo das tensões têm de ser calculados. Estes são normalmente os barramentos onde só existem as cargas do sistema ou geração sem controlo de tensão.

- **Cálculo das Admitâncias**

Para o cálculo das admitâncias, num sistema, consideremos o modelo em π da linha, como indicado na Figura 3.1.

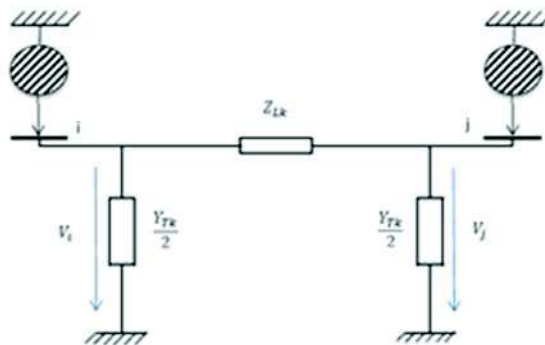


Figura 3.1 - Modelo em π da linha [1]

A matriz das admitâncias nodais, independentemente da dimensão ou configuração da rede, possui sempre a dimensão $n \times n$, tendo a seguinte configuração:

$$[Y] = \begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \dots & y_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Os cálculos dos elementos diagonais desta matriz, é realizado a partir das admitâncias das linhas e admitâncias “shunt” dos barramentos, ou seja:

$$y_{ii} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{Y_{Tjk}}{2} + \frac{1}{Z_{Lk}} \right) \quad (3.14)$$

E os elementos não diagonais, são calculados a partir das admitâncias das linhas adjacentes ao barramento, sendo o seu valor nulo no caso de não haver ligação entre o barramento i e j , ou seja:

$$y_{ij} = y_{ji} = -\frac{1}{Z_{Tjk}} \quad (3.15)$$

A matriz das admitâncias nodais pode ser decomposta na sua parte real (G – condutância) e imaginária (B – susceptância), de modo que fica com a seguinte configuração:

$$[Y] = [G] + j[B] \quad (3.16)$$

Ou seja:

$$[Y] = \begin{bmatrix} G_{11} & \dots & G_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & \dots & G_{nn} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} B_{11} & \dots & B_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n1} & \dots & B_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

- **Equações de Potência Activa e Reactiva**

As expressões que envolvem a potência activa e reactiva, resume-se às potências geradas e consumidas, ou potências injectadas e o fluxo de potências entre dois ou mais barramentos.

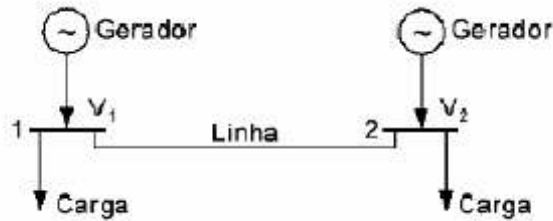


Figura 3.2 - Rede de 2 Barramentos

Ou seja, pela Figura 3.2 tem-se para o barramento 1;

$$P_{1calc} = V_1 \cdot V_1 \cdot [G_{11} \cdot \cos(\theta_1 - \theta_1) + B_{11} \cdot \sin(\theta_1 - \theta_1)] + V_1 \cdot V_2 \cdot [G_{12} \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2) + B_{12} \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)] \quad (3.18)$$

$$Q_{1calc} = V_1 \cdot V_1 \cdot [G_{11} \cdot \sin(\theta_1 - \theta_1) - B_{11} \cdot \cos(\theta_1 - \theta_1)] + V_1 \cdot V_2 \cdot [G_{12} \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2) - B_{12} \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2)] \quad (3.19)$$

Para uma rede mais complexa, um sistema de equações, da forma indicada por 3.18 e 3.19, para todos os barramentos, permite determinar a tensão nos barramentos e o fluxo de potências nas linhas dessa rede.

- **Valores Calculados**

Os valores calculados, referem basicamente o fluxo de energia no sistema a analisar, sendo o somatório do produto do módulo tensão do barramento em questão (i) e dos barramentos a ele ligados (j), com as características das linhas (B – Susceptância e G – Condutância) com o argumento da tensão dos referido barramentos. Em resumo:

$$P_{i calc} = \sum_{j=1}^n V_i \cdot V_j \cdot [G_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j)], i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, n \quad (3.20)$$

$$Q_{i calc} = \sum_{j=1}^n V_i \cdot V_j \cdot [G_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j)], i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, n \quad (3.21)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta P \\ -\Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

- **Equações de Fecho**

Os erros de fecho (ΔP_i e ΔQ_i) são dados pelo cálculo dos valores especificados e dos valores calculados, ou seja:

$$\Delta P_i = P_{i_{esp}} - P_{i_{calc}} \quad (3.23)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i_{esp}} - Q_{i_{calc}} \quad (3.24)$$

- **Valores especificados**

Os valores especificados, são referentes às potências injectadas nos barramentos, sendo estas a diferença das potências geradas e das potências consumidas pelas cargas nos respectivos barramentos. Tem-se deste modo:

$$P_{i_{esp}} = P_{Gi} - P_{Ci} \quad (3.25)$$

$$Q_{i_{esp}} = Q_{Gi} - Q_{Ci} \quad (3.26)$$

Estes cálculos, ΔP_i e ΔQ_i são para os barramentos do tipo PQ, pois para barramentos do tipo PV (tensão controlada), só é efectuada o cálculo do ΔP_i uma vez que $\Delta V_i = 0$.

Os cálculos serão repetidos até que os valores absolutos de erro de fecho se tornem inferiores a uma tolerância, tipicamente na ordem dos 0.01 pu [1].

3.1.2 Construção do Jacobiano

O Jacobiano tem uma dimensão que varia conforme o número de barramentos do tipo PQ e PV presentes numa determinada iteração. Para o efeito, o barramento de referência ou balanço não entra nos cálculos desta matriz, pois as equações do trânsito de energia são linearizadas em torno desse mesmo barramento, que é o ponto de referência.

Para além do barramento de balanço, se todos os barramentos forem do tipo PQ, então esta matriz tem a dimensão $2(n - 1) \times 2(n - 1)$.

No entanto, havendo barramentos do tipo PV na rede em análise, então a matriz reduz-se a $(2n_{PQ} + n_{PV}) \times (2n_{PQ} + n_{PV})$.

$$[J] = \begin{bmatrix} [H] & \vdots & [N] \\ \cdots & \ddots & \cdots \\ [J] & \vdots & [L] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] & \vdots & \left[V \frac{\partial P}{\partial V} \right] \\ \cdots & \ddots & \cdots \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right] & \vdots & \left[V \frac{\partial Q}{\partial V} \right] \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

O Jacobiano carece de actualização após cada iteração, até as equações de erro de fecho converjam e os cálculos terminem.

Conforme indicado na equação 3.27, o Jacobiano é caracterizado por quatro submatrizes:

- A **matriz H** $\left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right]$, com uma dimensão $(n - 1) \times (n - 1)$, ou seja, esta submatriz independentemente do número de barramentos do tipo PV, não sofre qualquer alteração nas suas dimensões de iteração para iteração, apenas dependendo do número de barramento do sistema;
- A **matriz N** $\left[V \frac{\partial P}{\partial V} \right]$, com uma dimensão $(n - 1) \times (n_{PQ})$, ou seja, vai reduzindo colunas com o aumento de barramento PV;
- A **matriz J** $\left[\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right]$, com uma dimensão $(n_{PQ}) \times (n - 1)$, ou seja, esta matriz reduz linhas na sua dimensão com o aumento de barramento do tipo PV no sistema;
- A **matriz L** $\left[V \frac{\partial Q}{\partial V} \right]$, é uma matriz com uma dimensão $(n_{PQ}) \times (n_{PQ})$, ou seja, esta matriz reduz linhas e colunas proporcionalmente ao aumento dos barramentos do tipo PV.

Os elementos das quatro submatrizes referidas na alínea anterior, calculam-se analiticamente a partir das equações do trânsito de energia, obtendo-se:

- Se $i \neq j$ então:

$$H_{ij} = L_{ij} = V_i \cdot V_j \cdot [G_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (3.28)$$

$$N_{ij} = -J_{ij} = V_i \cdot V_j \cdot [G_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (3.29)$$

- Se $i = j$ então:

$$H_{ij} = -Q_i - B_{ii} * V_i^2 \quad (3.30)$$

$$N_{ij} = P_i + G_{ii} * V_i^2 \quad (3.31)$$

$$J_{ij} = P_i - G_{ii} * V_i^2 \quad (3.32)$$

$$L_{ij} = Q_i - B_{ii} * V_i^2 \quad (3.33)$$

3.1.3 Sistema de Equações

Uma vez determinado o Jacobiano, o ΔP_i e ΔQ_i , os acréscimos $\Delta\theta$ e ΔV , tem-se a expressão 3.22, ou seja:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] * \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Calculando a inversa do Jacobiano, fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = [J^{-1}] * \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Após a realização do sistema de equações, procede-se do seguinte modo:

- No caso dos barramentos PQ, actualização da amplitude e argumento da tensão:

$$V_i^{k+1} = V_i^k + \Delta V_i^k \quad (3.36)$$

$$\theta_i^{k+1} = \theta_i^k + \Delta \theta_i^k \quad (3.37)$$

- No caso do(s) barramento(s) do tipo PV, actualização do argumento da tensão pela equação 3.37 e calcular a potência reactiva injectada, através da seguinte expressão:

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i \cdot V_j \cdot [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (3.38)$$

Note-se que, quando um barramento PV tem os limites de potência reactiva fora dos limites impostos, este passa a ser classificado de falso PQ, voltando a ser classificado de novo como PV quando voltar a estar dentro da janela de limites.

Todo o processo será repetido até que os erros de fecho ΔP_i e ΔQ_i se tornem inferiores a uma tolerância ε tipicamente na ordem de 10^{-3} pu [1].

Este processo encontra-se ilustrado de forma simplificada no fluxograma para o método de Newton-Rapshon, indicado na Figura 3.3.

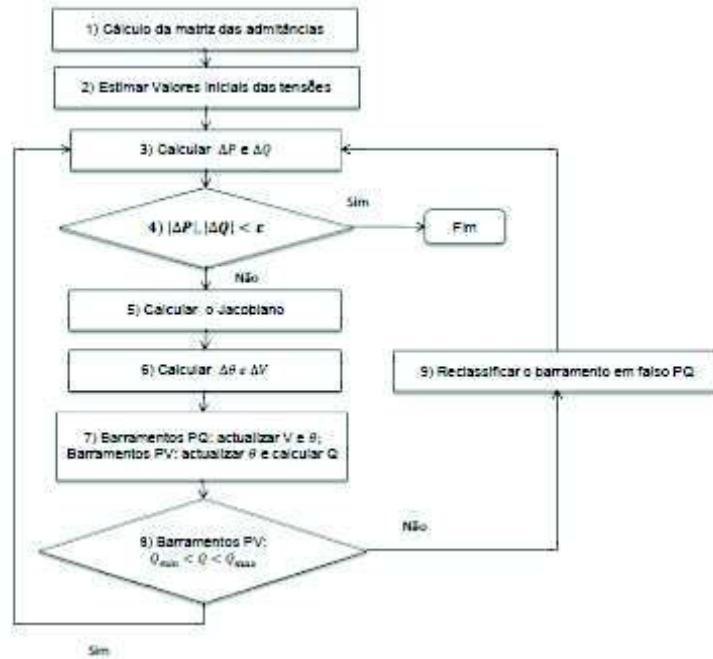


Figura 3.3 - Fluxograma do método de Newton-Rapshon

3.2 Modelos FACTS implementados

Em seguida serão demonstrados a forma de implementação dos três dispositivos implementados na plataforma de cálculo em linguagem VBA.

3.2.1 Fixed Shunt

O *Fixed shunt*, é um elemento passivo (indutivo ou capacitivo), pelo que ser adicionado no sistema irá afectar na diagonal principal da matriz das admitâncias (equação 3.17).

- **Cálculo das Admitâncias**

Os cálculos dos elementos diagonais desta matriz, é realizado a partir das admitâncias das linhas e admitâncias “shunt” dos barramentos, ou seja na equação 3.14 acrescenta-se o valor do *fixed shunt*, ficando:

$$y_{ii} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{Y_{Tjk}}{2} + \frac{1}{Z_{Lk}} \right) + Y_{FS} \quad (3.39)$$

- **Fluxograma**

Na Figura 3.4, é ilustrada forma simplificada o fluxograma para o método de Newton-Raphson, com a alteração da diagonal principal da matriz das admitâncias.

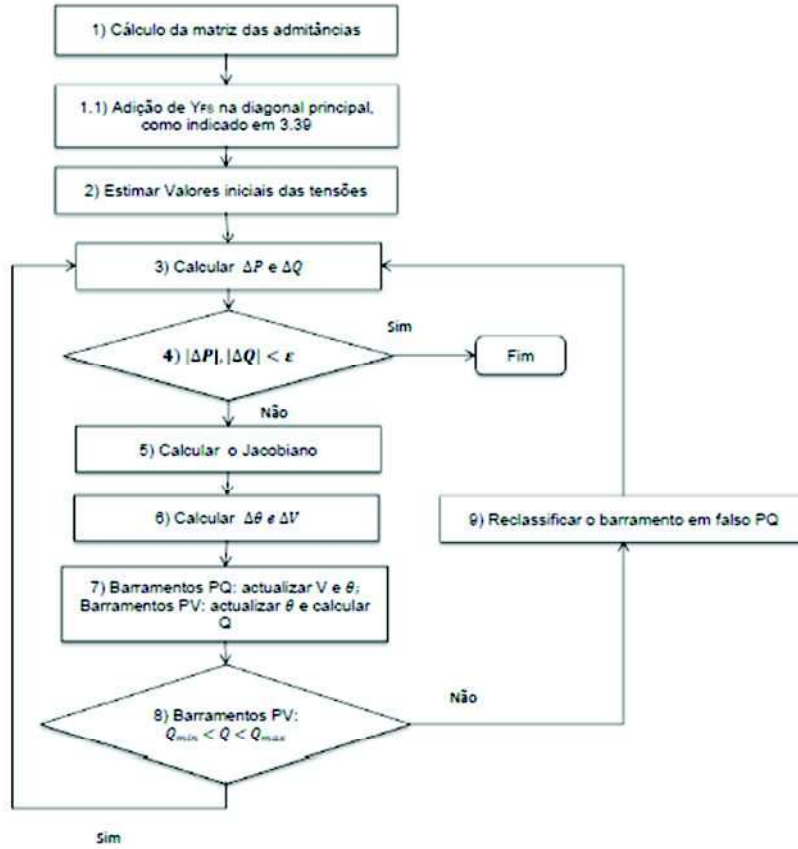


Figura 3.4 - Fluxograma do método de Newton-Raphson com *Fixed Shunt*

3.2.2 Switched Shunt

Tal como o *Fixed Shunt*, o *Switched Shunt*, também é um elemento passivo e que irá afectar a matriz das admitâncias, na diagonal principal (3.1.1). Mas neste caso o elemento de natureza indutivo ou capacitivo é somado ou subtraído, respectivamente, na matriz das admitâncias conforme o módulo da tensão no barramento está em relação ao valor máximo ou mínimo que se quer impor no referido barramento.

Sempre que a tensão no barramento seja inferior ao valor do limite mínimo, então são somadas cargas capacitivas.

$$Y_{SS} = SwSh_{Qc} \quad (3.40)$$

Em que $SwSh_{Qc}$ representa a admitância das cargas capacitivas.

Pelo contrário, se o valor do barramento for superior ao valor do limite máximo, então irá haver uma soma de cargas indutivas na diagonal principal da matriz das admitâncias.

$$Y_{SS} = SwSh_{Ql} \quad (3.41)$$

Em que $SwSh_{Ql}$ representa a admitância das cargas indutivas.

- **Cálculo das Admitâncias**

Os cálculos dos elementos diagonais desta matriz, é realizado a partir das admitâncias das linhas e admitâncias “*shunt*” dos barramentos, ou seja na equação 3.14 acrescenta-se o valor do *Switched shunt*, ficando:

$$y_{ii} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{Y_{Tjk}}{2} + \frac{1}{Z_{Ljk}} \right) \pm Y_{SS} \quad (3.42)$$

- **Fluxograma**

Na Figura 3.5 é ilustrada de forma simplificada o fluxograma para o método de Newton-Raphson, com a alteração da diagonal principal da matriz das admitâncias.

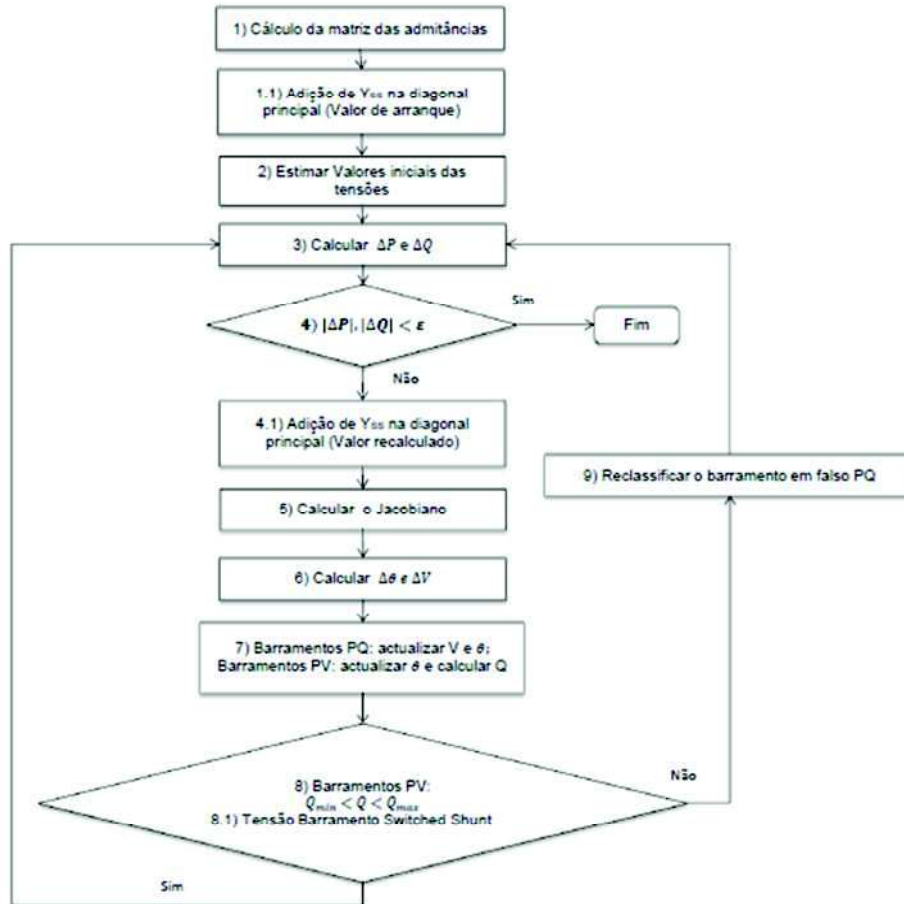


Figura 3.5 – Fluxograma do método de Newton-Raphson com Switched Shunt

No que concerne a introdução do *Switched Shunt* no processo iterativo, é verificada em [8.1] do fluxograma o nível de tensão no barramento, sendo que as cargas serão adicionadas ou não (independentemente de serem indutivas ou capacitivas) na equação 3.42 (4.1 do fluxograma) conforme o resultado obtido em 4 do fluxograma (equações 3.25 e 3.26).

3.2.3 Static Synchronous Compensator

O *STATCOM*, opera como um compensador estático em paralelo com a rede. A corrente de saída indutiva ou capacitiva pode ser controlada independentemente do sistema onde está inserido. O barramento onde o *STATCOM* está inserido deverá ser PQ, passando a PV com a presença do mesmo. O barramento voltará a ser PQ no caso de o *STATCOM* atingir o máximo da sua capacidade (Indutiva ou capacitiva), e deixando de controlar a tensão do respectivo barramento.

Se o barramento onde o *STATCOM* for inserido já for antes do tipo PV, permanece PV.

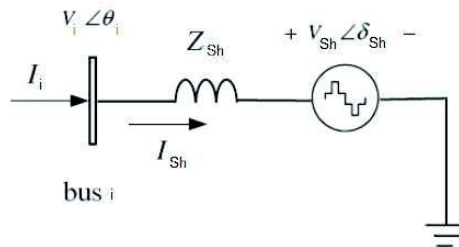


Figura 3.6 - Esquema do STATCOM

Com a introdução do *STATCOM* na Rede, o sistema de equações sofre alterações, pois o *STATCOM* opera como se de mais um barramento se tratasse (Figura 3.6), passando o sistema de equações a ter a seguinte configuração [4]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i^\rho \\ \Delta Q_i^\rho \\ \Delta PE^\rho \\ \Delta F^\rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial V_{Sh}^\rho} V_{Sh}^\rho \\ \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial V_{Sh}^\rho} V_{Sh}^\rho \\ \frac{\partial PE^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial PE^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial PE^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} & \frac{\partial PE^\rho}{\partial V_{Sh}^\rho} V_{Sh}^\rho \\ \frac{\partial F^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial F^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial F^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} & \frac{\partial F^\rho}{\partial V_{Sh}^\rho} V_{Sh}^\rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i^\rho \\ \frac{\Delta V_i^\rho}{V_i^\rho} \\ \Delta \delta_{Sh}^\rho \\ \frac{\Delta V_{Sh}^\rho}{V_{Sh}^\rho} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

em que:

$$PE = Re(V_{Sh} I_{Sh}^*) = 0 \quad (3.44)$$

$$Re(V_{Sh} I_{Sh}^*) = V_{Sh}^2 g_{Sh} - V_i V_{Sh} (g_{Sh} \cos(\theta_i - \theta_{Sh}) - b_{Sh} \sin(\theta_i - \theta_{Sh})) \quad (3.45)$$

Em virtude do controlo se basear na compensação de reactiva para o controlo de tensão no barramento, então baseado na equação 3.43, fica-se com:

$$\Delta PE^\rho = \Delta P_{Sh}^\rho \quad (3.46)$$

e

$$\Delta F^\rho = \Delta Q_{Sh}^\rho \quad (3.47)$$

em que:

$$\Delta P_{Sh}^\rho = P_{Sh}^{calc} - P_{Sh}^{esp} \quad (3.48)$$

e

$$\Delta Q_{Sh}^\rho = Q_{Sh}^{calc} - Q_{Sh}^{esp} \quad (3.49)$$

Alterando no Jacobiano, fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i^\rho \\ \Delta Q_i^\rho \\ \Delta P_{Sh}^\rho \\ \Delta Q_{Sh}^\rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial V_{Sh}^\rho} V_{Sh}^\rho \\ \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial V_{Sh}^\rho} V_{Sh}^\rho \\ \frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} & \frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial V_{Sh}^\rho} V_{Sh}^\rho \\ \frac{\partial Q_{Sh}^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial Q_{Sh}^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial Q_{Sh}^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} & \frac{\partial Q_{Sh}^\rho}{\partial V_{Sh}^\rho} V_{Sh}^\rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i^\rho \\ \frac{\Delta V_i^\rho}{V_i^\rho} \\ \Delta \delta_{Sh}^\rho \\ \frac{\Delta V_{Sh}^\rho}{V_{Sh}^\rho} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Sendo que os termos de terminação “i” correspondem ao (s) barramento (s) e os de terminação “Sh” ao STATCOM, na iteração ρ .

- **Construção do Jacobiano**

Para a construção do Jacobiano, além dos elementos calculados em 3.1.2 nesta alínea será demonstrado o cálculo dos elementos com o STATCOM no barramento i [10].

Assim para a iteração ρ tem-se:

$$\frac{\partial P_i^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} = \frac{\partial Q_{Sh}^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho = V_{Sh}^\rho V_i^\rho [G_{Sh}^\rho \sin[\delta_{Sh}^\rho - \theta_i^\rho] + B_{Sh}^\rho \cos(\delta_{Sh}^\rho - \theta_i^\rho)] \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial P_i^\rho}{\partial V_{Sh}^\rho} V_{Sh}^\rho = -\frac{\partial Q_{Sh}^\rho}{\partial \theta_i^\rho} = V_i^\rho V_{Sh}^\rho [G_{Sh}^\rho \cos[\theta_i^\rho - \delta_{Sh}^\rho] + B_{Sh}^\rho \sin(\theta_i^\rho - \delta_{Sh}^\rho)] \quad (3.52)$$

$$-\frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho = \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} = -V_i^\rho V_{Sh}^\rho [G_{Sh}^\rho \cos[\theta_i^\rho - \delta_{Sh}^\rho] + B_{Sh}^\rho \sin(\theta_i^\rho - \delta_{Sh}^\rho)] \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial \theta_i^\rho} = \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial V_{Sh}^\rho} V_{Sh}^\rho = V_i^\rho V_{Sh}^\rho [G_{Sh}^\rho \sin[\theta_i^\rho - \delta_{Sh}^\rho] - B_{Sh}^\rho \cos(\theta_i^\rho - \delta_{Sh}^\rho)] \quad (3.54)$$

$$\frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} = -Q_{Sh}^\rho - (V_{Sh}^\rho)^2 \cdot B_{Sh}^\rho \quad (3.55)$$

$$\frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial V_{Sh}^\rho} V_{Sh}^\rho = P_{Sh}^\rho + (V_{Sh}^\rho)^2 \cdot G_{Sh}^\rho \quad (3.56)$$

$$\frac{\partial Q_{Sh}^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} = P_{Sh}^\rho - (V_{Sh}^\rho)^2 \cdot G_{Sh}^\rho \quad (3.57)$$

$$\frac{\partial Q_{Sh}^\rho}{\partial V_{Sh}^\rho} V_{Sh}^\rho = Q_{Sh}^\rho - (V_{Sh}^\rho)^2 \cdot B_{Sh}^\rho \quad (3.58)$$

Após cada iteração é actualizado o módulo e o argumento da tensão no *STATCOM*:

$$(V_{Sh}^\rho)^{k+1} = \left(\frac{\Delta V_{Sh}^\rho}{V_{Sh}^\rho} \right)^k (V_{Sh}^\rho)^k + (V_{Sh}^\rho)^k \quad (3.59)$$

$$(\delta_{Sh}^\rho)^{k+1} = (\Delta \delta_{Sh}^\rho)^k + (\delta_{Sh}^\rho)^k \quad (3.60)$$

Outros modos de controlo que poderiam ter sido implementados [4], alterando o termo ΔF^ρ no sistema de equações 3.43, usando um dos seguintes parâmetros ao invés do ΔQ_{Sh}^ρ , usado no sistema de equações 3.50, seria:

- o controlo pela tensão do barramento:

$$V_i - V_i^{Spec} = 0 \quad (3.61)$$

Em que V_i^{Spec} é a tensão de referência para o controlo da tensão no barramento.

- o o controlo pela impedância equivalente:

$$X_{Sh} - X_{Sh}^{Spec} = 0 \quad (3.62)$$

Onde X_{Sh} é a reactância equivalente do *STATCOM* e X_{Sh}^{Spec} será a reactância especificada que servirá de referência ao dispositivo [4].

- o o controlo pela magnitude da corrente – Compensação capacitiva:

Em que neste modo de controlo, irá ser usado para controlar a amplitude da corrente I_{Sh} injectada pelo *STATCOM*, a uma referência de controlo dada pela amplitude de uma corrente especificada (I_{Sh}^{Spec}).

O controlo dado pela referência será então representado pela seguinte expressão:

$$I_{Sh} - I_{Sh}^{Spec} = 0 \quad (3.63)$$

No entanto verifica-se existirem duas soluções possíveis por este modo de controlo.

Pelo que assume-se I_{Sh} em avanço em ordem a V_{Sh} com um ângulo de 90° . Ou seja:

$$I_{Sh} = I_{Sh}^{Spec} \angle(\theta_{Sh} + 90^\circ) \quad [4] \quad (3.64)$$

Matematicamente, este controlo pode ter como solução uma das seguinte equações:

$$Re(I_{Sh}) = Re(I_{Sh}^{Spec} \angle(\theta_{Sh} + 90^\circ)) \quad (3.65)$$

Ou

$$Im(I_{Sh}) = Im(I_{Sh}^{Spec} \angle(\theta_{Sh} + 90^\circ)) \quad (3.66)$$

- o o controlo pela magnitude da corrente – Compensação Indutiva:

Neste tipo de controlo do *STATCOM*, a corrente I_{Sh} encontra-se em atraso em ordem a V_{Sh} , pelo que representa-se por:

$$I_{Sh} = I_{Sh}^{Spec} \angle(\theta_{Sh} - 90^\circ) \quad [4] \quad (3.67)$$

- o o controlo pela magnitude da tensão injectada pelo *STATCOM*:

Este tipo de controlo usa a tensão no *STATCOM* como tensão de referência para o controlo da tensão do barramento onde está instalado.

$$V_{Sh} - V_{Sh}^{Spec} = 0 \quad (3.68)$$

Onde V_{Sh} é a tensão que o *STATCOM* injecta no barramento e V_{Sh}^{Spec} a tensão de referência.

- o O controlo pela tensão num barramento remoto:

Neste tipo de controlo, o *STATCOM* é usado para controlar a tensão de um barramento j a partir de um barramento i .

$$V_j - V_j^{Spec} = 0 \quad (3.69)$$

Onde V_j é a tensão do barramento remoto e V_j^{Spec} , a tensão de referência no barramento remoto.

- o Controlo por compensação de potência reactiva num barramento remoto

Neste tipo de controlo, o *STATCOM* faz a compensação no barramento onde está instalado de modo a colocar o nível de potência reactiva do barramento remoto no valor desejado.

$$Q_{jk} - Q_{jk}^{Spec} = 0 \quad (3.70)$$

Onde Q_{jk} é o fluxo de potência reactiva para o barramento j e Q_{jk}^{Spec} o valor de potência reactiva que se pretende.

- **Fluxograma**

Na Figura 3.7 é ilustrado de forma simplificada o fluxograma para o método de Newton-Rapshon, com a introdução do *STATCOM* no barramento designado por “i”, em que o Jacobiano irá sofrer alteração na sua dimensão, pois irá ter mais duas linhas e duas colunas.

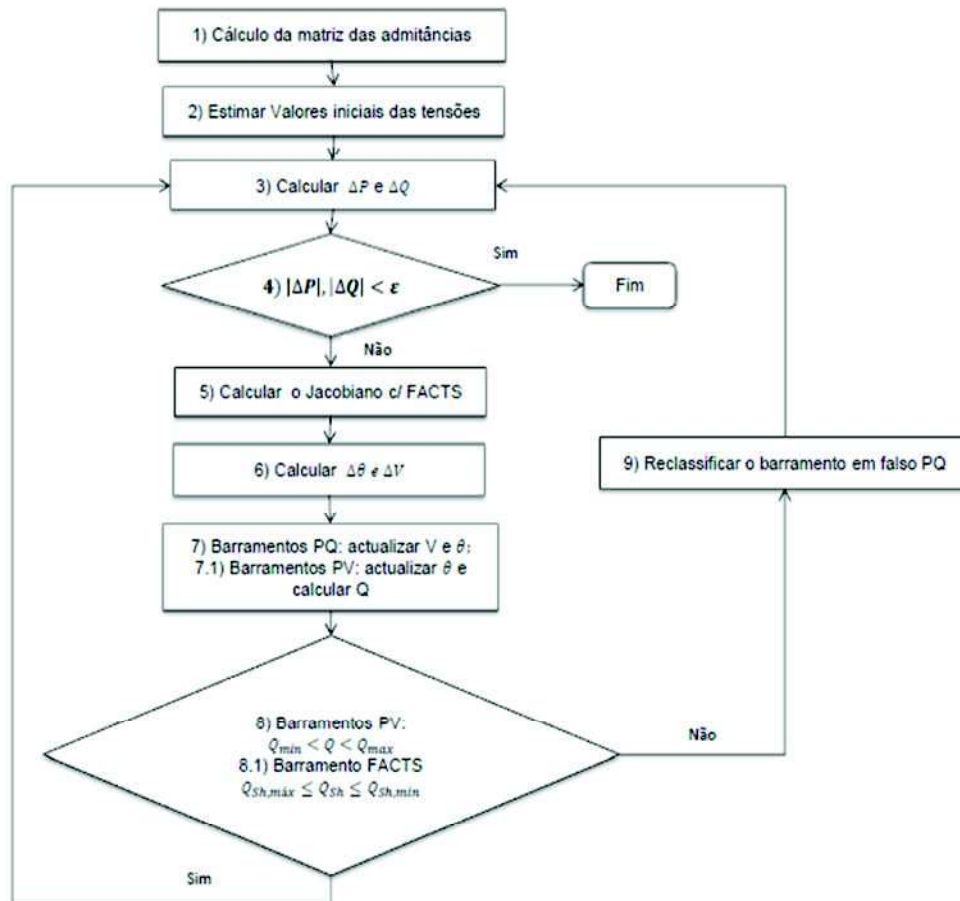


Figura 3.7 - Fluxograma do processo com introdução de STATCOM

Para a introdução do *STATCOM* nos cálculos do trânsito de energia, a alteração faz-se ao nível do jacobiano no ponto 5 do fluxograma (conforme as equações de 3.28 até 3.33), com a introdução do *STATCOM* acrescenta-se no Jacobiano as equações de 3.51 até 3.58 e altera-se a nível das equações de fecho com as equações 3.46 e 3.47. Sendo que no fluxograma (ponto 8.1) será determinado se o barramento continua a ser PV ou altera o seu tipo para PQ.

3.3 Outros modelos de dispositivos FACTS

Nesta secção serão apresentadas as possíveis formas de implementação de outros tipos de controladores *FACTS*.

3.3.1 Static Var Compensator

Tradicionalmente o SVC é considerado, na análise de potências, como uma susceptância variável (Figura 3.8).

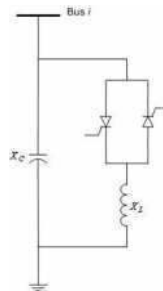


Figura 3.8 - Esquema do SVC com um condensador fixo e um TCR

Pelo que a análise do seu modelo pode ser considerado equivalente à do *STATCOM* (Figura 3.9) [4].

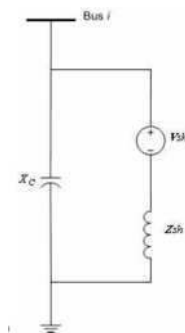


Figura 3.9 - Esquema equivalente do SVC representado pelo *STATCOM*

O SVC é um dispositivo que pode controlar a tensão e a potência reactiva num barramento, bastando para isso variar a reactância paralela. Podemos com o SVC contemplar dois tipos de combinações típicas: O TCR e o TSC (Figura 2.2). Basicamente o SVC consiste na combinação paralela de um TCR e um condensador como é mostrado na Figura 3.8.

Os circuitos do SVC e do STATCOM, são circuitos equivalentes, excepto que, na análise do SVC será:

$$X_{TCR}^{min} \leq X_{TCR} \leq X_{TCR}^{max} \quad (3.71)$$

em que:

$$X_{TCR} = |V_{Sh} * Z_{Sh} / (V_i - V_{Sh})| \quad (3.72)$$

3.3.2 Thyristor Controlled Series Compensator

O dispositivo de compensação TCSC (Figura 3.10), realiza um controlo contínuo da potência na linha onde se encontra inserido, com um funcionamento similar ao SVC. Mas ao contrário deste último, o TCSC encontra-se em serie na linha, entre dois barramentos.

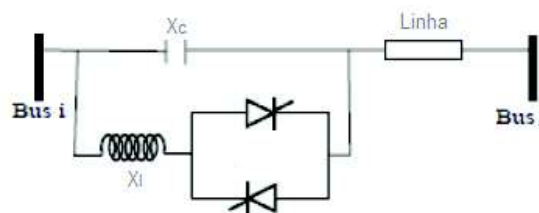


Figura 3.10 - Esquema equivalente do TCSC

Tal como representado na Figura 3.10, o TCSC é constituído por uma reactância capacitiva em paralelo com um TCR e os dois em serie com a linha.

- *Construção do Jacobiano*

Para análise do trânsito de energia, a inserção do TCSC no método de Newton-Raphson, é em muito semelhante ao SSSC.

A partir da análise da Figura 3.10 podemos obter as seguintes equações no Barramento *i*:

$$P_i = V_i \cdot V_j \cdot B_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (3.73)$$

$$Q_i = -V_i^2 \cdot B_{ii} - V_i \cdot V_j \cdot B_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (3.74)$$

Em que:

$$B_{ij} = \frac{1}{X_{ij}} = \frac{1}{X_{Linha}} \quad (3.75)$$

Para o mesmo cálculo, mas no barramento j , basta trocar, nas duas equações anteriores, o índice i por j e vice-versa.

Após as últimas considerações obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i^\rho \\ \Delta Q_i^\rho \\ \Delta P_j^\rho \\ \Delta Q_j^\rho \\ \Delta P_{X_{TCSC}}^\rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial X_{TCSC}^\rho} X_{TCSC}^\rho \\ \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial X_{TCSC}^\rho} X_{TCSC}^\rho \\ \frac{\partial P_j^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial X_{TCSC}^\rho} X_{TCSC}^\rho \\ \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial X_{TCSC}^\rho} X_{TCSC}^\rho \\ \frac{\partial P_{TCSC}^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial P_{TCSC}^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial P_{TCSC}^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial P_{TCSC}^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial P_{TCSC}^\rho}{\partial X_{TCSC}^\rho} X_{TCSC}^\rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i^\rho \\ \frac{\Delta V_i^\rho}{V_i^\rho} \\ \Delta \delta_j^\rho \\ \frac{\Delta V_j^\rho}{V_j^\rho} \\ \frac{\Delta X_{TCSC}^\rho}{X_{TCSC}^\rho} \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

Para o cálculo das equações de fecho considera-se as equações 3.23 e 3.24, ficando calcular a equação de fecho referente à reactância série dada por:

$$\Delta P_{X_{TCSC}}^\rho = P_{X_{TCSC}}^{esp} - P_{X_{TCSC}}^{cal} \quad (3.77)$$

O incremento da reactância série é dado por:

$$\Delta X_{TCSC}^\rho = X_{TCSC}^\rho - X_{TCSC}^{\rho-1} \quad (3.78)$$

No fim de cada iteração, a variável X_{TCSC} é actualizada de acordo com:

$$X_{TCSC}^\rho = X_{TCSC}^{\rho-1} + \left(\frac{\Delta X_{TCSC}^\rho}{X_{TCSC}^\rho} \right) * X_{TCSC}^{\rho-1} \quad (3.79)$$

Isto é o TCSC é modelizado como uma reactância variável em que o seu valor depende da reactância equivalente da linha e o seu valor varia no seguinte intervalo:

$$-0.8X_{linha} \leq X_{TCSC} \leq 0.2X_{linha} \quad (3.80)$$

Pois o nível de compensação da reactância da linha aplicado, varia entre os 20% reactância indutivo e os 80% de reactância capacitiva.

3.3.3 Static Synchronous Series Compensator

Tal como o TCSC, o SSSC é inserido na linha em série, entre dois barramentos, com o objectivo de controlar a potência activa (ver Figura 3.11).

Na Figura 3.11, encontra-se representada a admitância série ($Y_{Se} = \frac{1}{Z_{Se}}$), que é a combinação do SSSC e da linha em que se encontra inserido. A representação da fonte de tensão “Se”, introduz duas novas variáveis a V_{Se} e o δ_{Se} , que serão calculadas pelas expressões de “ P_i ”.

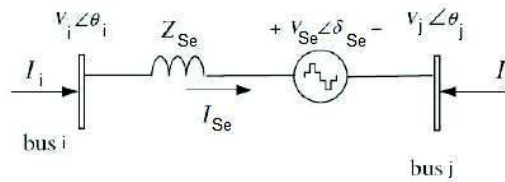


Figura 3.11 – Esquema equivalente do SSSC

Assim, considerando o SSSC como uma fonte de tensão, fica:

$$E_{Se} = V_{Se} \cdot (\cos \delta_{Se} + j \cdot \sin \delta_{Se}) \quad (3.81)$$

Em que $V_{Se,min} \leq V_{Se} \leq V_{Se,max}$ e $0 \leq \delta_{Se} \leq 360^\circ$.

- **Construção do Jacobiano**

Baseado nas considerações anteriores e na Figura 3.11, deduz-se a potência activa e reactiva no barramento “i”, que são dadas por:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} - V_i V_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] - V_i V_{Se} [G_{ij} \cos(\theta_i - \delta_{Se}) + B_{ij} \sin(\theta_i - \delta_{Se})] \quad (3.82)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} - V_i V_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] - V_i V_{Se} [G_{ij} \sin(\theta_i - \delta_{Se}) - B_{ij} \cos(\theta_i - \delta_{Se})] \quad (3.83)$$

Para o SSSC, as equações são as seguintes:

$$P_{Se} = V_{Se}^2 G_{jj} + V_{Se} V_i [G_{ij} \cos(\delta_{Se} - \theta_i) + B_{ij} \sin(\delta_{Se} - \theta_i)] + V_{Se} V_j [G_{jj} \cos(\delta_{Se} - \theta_j) + B_{jj} \sin(\delta_{Se} - \theta_j)] \quad (3.84)$$

$$Q_{Se} = -V_{Se}^2 B_{jj} + V_{Se} V_i [G_{ij} \sin(\delta_{Se} - \theta_i) - B_{ij} \cos(\delta_{Se} - \theta_i)] + V_{Se} V_j [G_{jj} \sin(\delta_{Se} - \theta_j) - B_{jj} \cos(\delta_{Se} - \theta_j)] \quad (3.85)$$

Deste modo segue-se o sistema de equações do SSSC indicado por (3.86):

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i^\rho \\ \Delta Q_i^\rho \\ \Delta P_j^\rho \\ \Delta Q_j^\rho \\ \Delta P_{Se}^\rho \\ \Delta Q_{Se}^\rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial \delta_{Se}^\rho} & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial V_{Se}^\rho} V_{Se}^\rho \\ \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \delta_{Se}^\rho} & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial V_{Se}^\rho} V_{Se}^\rho \\ \frac{\partial P_j^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial \delta_{Se}^\rho} & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial V_{Se}^\rho} V_{Se}^\rho \\ \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial \delta_{Se}^\rho} & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial V_{Se}^\rho} V_{Se}^\rho \\ \frac{\partial P_{Se}^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial P_{Se}^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial P_{Se}^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial P_{Se}^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial P_{Se}^\rho}{\partial \delta_{Se}^\rho} & \frac{\partial P_{Se}^\rho}{\partial V_{Se}^\rho} V_{Se}^\rho \\ \frac{\partial Q_{Se}^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial Q_{Se}^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial Q_{Se}^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial Q_{Se}^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial Q_{Se}^\rho}{\partial \delta_{Se}^\rho} & \frac{\partial Q_{Se}^\rho}{\partial V_{Se}^\rho} V_{Se}^\rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i^\rho \\ \frac{\Delta V_i^\rho}{V_i^\rho} \\ \Delta \theta_j^\rho \\ \frac{\Delta V_j^\rho}{V_j^\rho} \\ \Delta \delta_{Se}^\rho \\ \frac{\Delta V_{Se}^\rho}{V_{Se}^\rho} \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

Após cada iteração é actualizado o módulo e o argumento da tensão no SSSC pelas seguintes equações:

$$(V_{Se}^\rho)^k = \left(\frac{\Delta V_{Se}^\rho}{V_{Se}^\rho} \right)^k (V_{Se}^\rho)^{k-1} + (V_{Se}^\rho)^{k-1} \quad (3.87)$$

$$(\delta_{Se}^\rho)^k = (\Delta \delta_{Se}^\rho)^k + (\delta_{Se}^\rho)^{k-1} \quad (3.88)$$

3.3.4 Unified Power Flow Controller

O modelo em regime permanente do UPFC, tal como é referido em 2.3.3, é composto por duas fontes de tensão, em que uma está em série com a linha entre dois barramentos e a outra ligada a um barramento em paralelo com a linha, como se mostra na Figura 3.12.

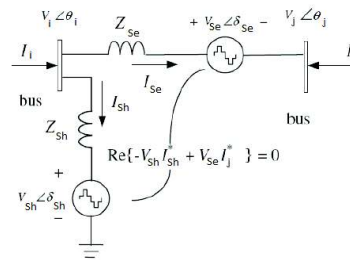


Figura 3.12 - Esquema equivalente do UPFC

Assim teremos:

$$E_{Sh} = V_{Sh} (\cos \delta_{Sh} + j \cdot \sin \delta_{Sh}) \quad (3.89)$$

$$E_{Se} = V_{Se} (\cos \delta_{Se} + j \cdot \sin \delta_{Se}) \quad (3.90)$$

O conversor paralelo tem uma variação no módulo da tensão de $V_{Sh,máx} \leq V_{Sh} \leq V_{Sh,min}$ e uma variação do seu argumento de $0 \leq \delta_{Sh} \leq 360^\circ$. Tal como o conversor paralelo, o conversor série tem a tensão variável em módulo como em argumento, sendo estes intervalos de $V_{Se,máx} \leq V_{Se} \leq V_{Se,min}$ no módulo e de $0 \leq \delta_{Sh} \leq 360^\circ$ no argumento.

Em qualquer outro valor, o UPFC opera como uma combinação de regulador de tensão. A magnitude da tensão do conversor série determina a quantidade de fluxo de alimentação a ser controlado. O ângulo de fase da tensão em série (δ_{Se}) determina o modo de controlo do fluxo da potência.

- **Construção do Jacobiano**

Baseando a análise na Figura 3.12, obtém-se então as equações da potência activa e reactiva nos barramentos. Para o barramento i são dados por:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i V_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] + V_i V_{Se} [G_{ij} \cos(\theta_i - \delta_{Se}) + B_{ij} \sin(\theta_i - \delta_{Se})] + V_i V_{Sh} [G_{Sh} \cos(\theta_i - \delta_{Sh}) + B_{Sh} \sin(\theta_i - \delta_{Sh})] \quad (3.91)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i V_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] + V_i V_{Se} [G_{ij} \sin(\theta_i - \delta_{Se}) - B_{ij} \cos(\theta_i - \delta_{Se})] + V_i V_{Sh} [G_{Sh} \sin(\theta_i - \delta_{Sh}) - B_{Sh} \cos(\theta_i - \delta_{Sh})] \quad (3.92)$$

Para o barramento j :

$$P_j = V_j^2 G_{jj} + V_j V_i [G_{ji} \cos(\theta_j - \theta_i) + B_{ji} \sin(\theta_j - \theta_i)] + V_j V_{Se} [G_{jj} \cos(\theta_j - \delta_{Se}) + B_{jj} \sin(\theta_j - \delta_{Se})] \quad (3.93)$$

$$Q_j = -V_j^2 B_{jj} + V_j V_i [G_{ji} \sin(\theta_j - \theta_i) - B_{ji} \cos(\theta_j - \theta_i)] + V_j V_{Se} [G_{jj} \sin(\theta_j - \delta_{Se}) - B_{jj} \cos(\theta_j - \delta_{Se})] \quad (3.94)$$

No conversor Série:

$$P_{Se} = V_{Se}^2 G_{jj} + V_{Se} V_i [G_{ij} \cos(\delta_{Se} - \theta_i) + B_{ij} \sin(\delta_{Se} - \theta_i)] + V_{Se} V_j [G_{jj} \cos(\delta_{Se} - \theta_j) + B_{jj} \sin(\delta_{Se} - \theta_j)] \quad (3.95)$$

$$Q_{Se} = -V_{Se}^2 B_{jj} + V_{Se} V_i [G_{ij} \sin(\delta_{Se} - \theta_i) - B_{ij} \cos(\delta_{Se} - \theta_i)] + V_{Se} V_j [G_{jj} \sin(\delta_{Se} - \theta_j) - B_{jj} \cos(\delta_{Se} - \theta_j)] \quad (3.96)$$

No conversor paralelo:

$$P_{Sh} = V_{Sh}^2 G_{Sh} + V_{Sh} V_i [G_{Sh} \cos(\delta_{Sh} - \theta_i) + B_{Sh} \sin(\delta_{Sh} - \theta_i)] \quad (3.97)$$

$$Q_{Sh} = V_{Sh}^2 B_{Sh} + V_{Sh} V_i [G_{Sh} \sin(\delta_{Sh} - \theta_i) - B_{Sh} \cos(\delta_{Sh} - \theta_i)] \quad (3.98)$$

As equações do UPFC, na forma linearizada, são combinadas com as da rede de corrente alternada para o caso em que o UPFC controla os seguintes parâmetros:

- o módulo de tensão no terminal do conversor paralelo (barramento i);
- o fluxo de potência activa da barramento j para o barramento i ;
- e a potência reactiva injectada no barramento j , e tornando-o num barramento PQ.

E assim o sistema de equações é dado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i^\rho \\ \Delta Q_i^\rho \\ \Delta P_j^\rho \\ \Delta Q_j^\rho \\ \Delta P_{Se}^\rho \\ \Delta Q_{Se}^\rho \\ \Delta P_{Sh}^\rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial \delta_{Se}^\rho} & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial V_{Se}^\rho} V_{Se}^\rho & \frac{\partial P_i^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} \\ \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \delta_{Se}^\rho} & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial V_{Se}^\rho} V_{Se}^\rho & \frac{\partial Q_i^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} \\ \frac{\partial P_j^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial \delta_{Se}^\rho} & \frac{\partial P_j^\rho}{\partial V_{Se}^\rho} V_{Se}^\rho & 0 \\ \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial \delta_{Se}^\rho} & \frac{\partial Q_j^\rho}{\partial V_{Se}^\rho} V_{Se}^\rho & 0 \\ \frac{\partial P_{Se}^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial P_{Se}^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial P_{Se}^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial P_{Se}^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial P_{Se}^\rho}{\partial \delta_{Se}^\rho} & \frac{\partial P_{Se}^\rho}{\partial V_{Se}^\rho} V_{Se}^\rho & 0 \\ \frac{\partial Q_{Se}^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial Q_{Se}^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial Q_{Se}^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial Q_{Se}^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial Q_{Se}^\rho}{\partial \delta_{Se}^\rho} & \frac{\partial Q_{Se}^\rho}{\partial V_{Se}^\rho} V_{Se}^\rho & 0 \\ \frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial \theta_i^\rho} & \frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial V_i^\rho} V_i^\rho & \frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial \theta_j^\rho} & \frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial V_j^\rho} V_j^\rho & \frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial \delta_{Se}^\rho} & \frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial V_{Se}^\rho} V_{Se}^\rho & \frac{\partial P_{Sh}^\rho}{\partial \delta_{Sh}^\rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i^\rho \\ \frac{\Delta V_i^\rho}{V_i^\rho} \\ \Delta \theta_j^\rho \\ \frac{\Delta V_j^\rho}{V_j^\rho} \\ \Delta \delta_{Se}^\rho \\ \frac{\Delta V_{Se}^\rho}{V_{Se}^\rho} \\ \Delta \delta_{Sh}^\rho \end{bmatrix} \quad (3.99)$$

3.4 Aplicação

3.4.1 Caracterização de uma rede de 6 barramentos

Para validar a plataforma de simulação, foi utilizada de uma rede de 6 barramentos [2]. Os resultados obtidos foram comparados com um programa⁵.

A rede, cujo esquema se encontra na Figura 3.13 é composta por 6 barramentos [2], sendo que o barramento 1 é considerado o barramento de referência e os barramentos 2 e 3, sendo barramentos onde se encontra geração, serão considerados barramentos do tipo PV ou de tensão controlada, como indicado na Tabela 3.1.

Geradores	V [pu]	P _{max} [MW]	P _{min} [MW]	Q _{max} [MVar]	Q _{min} [MVar]
1	1.05	200.0	0.0	150.0	-100.0
2	1.05	50.0	0.0	100.0	-100.0
3	1.07	60.0	0.0	100.0	-100.0

Tabela 3.1 - Dados dos geradores

Tendo a rede a seguinte configuração:

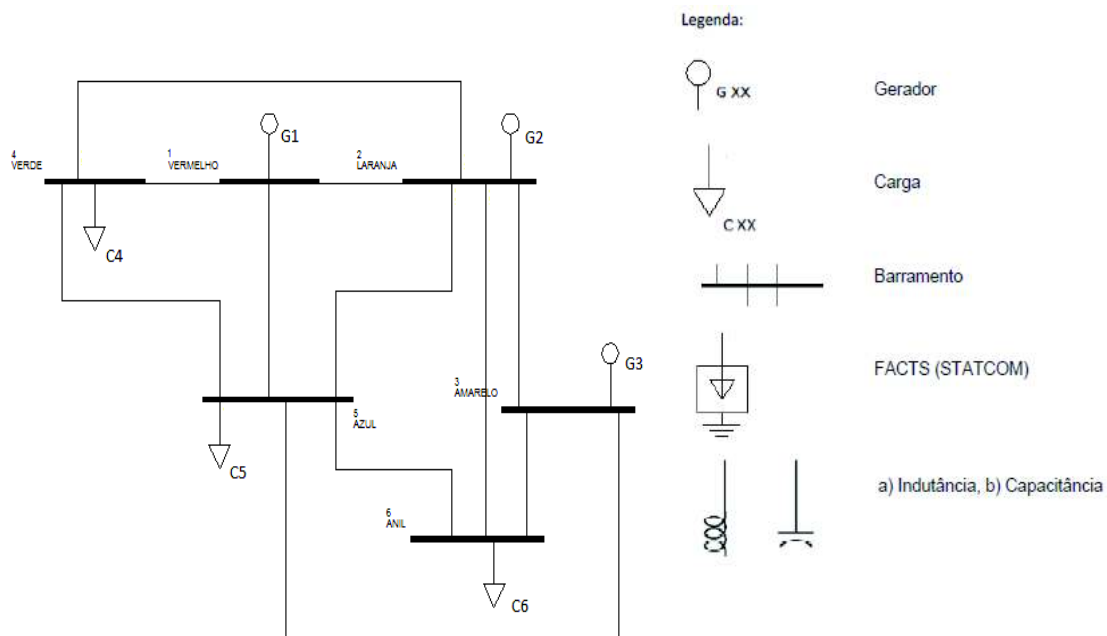


Figura 3.13 - Rede de 6 Barramentos

⁵ PSS®E University versão 33, da Siemens

Os barramentos 4, 5 e 6 serão considerados barramentos do tipo PQ, pois nestes barramentos só existem cargas. Os dados destas últimas encontram-se indicados na Tabela 3.2.

Barramento	P _c [MW]	Q _c [MVar]
4	70.0	70.0
5	70.0	70.0
6	70.0	70.0

Tabela 3.2 - Dados das cargas

Os ramos têm as características indicadas na Tabela 3.3.

Barramentos		Resistência Directa Longitudinal	Resistência Directa Longitudinal	Adm. Directa Transversal
De	Para	R [pu]	X[pu]	Y [pu]
1	2	0.100	0.200	0.020
1	4	0.050	0.200	0.020
1	5	0.080	0.300	0.030
2	3	0.050	0.250	0.030
2	4	0.050	0.100	0.010
2	5	0.100	0.300	0.020
2	6	0.070	0.200	0.025
3	5	0.120	0.260	0.025
3	6	0.020	0.100	0.010
4	5	0.200	0.400	0.040
5	6	0.100	0.300	0.030

Tabela 3.3 - Características dos ramos da rede em análise⁶.

⁶ pu: na base de 100 MVA

3.4.2 Rede base

Foi realizado a simulação em regime permanente da rede da Figura 3.13, e feita a comparação dos resultados entre o referido programa realizado em VBA e o programa de cálculo da Siemens, o PSS/E [8]. Esta rede é caracterizada por não ter qualquer tipo de dispositivo de compensação. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.4

		Resultados obtidos...			
		... no VBA		... no PSSE	
Barramentos		Tensão		Tensão	
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]
Vermelho	1	1.0500	0.00	1.0500	0.00
Laranja	2	1.0500	-3.71	1.0500	-3.72
Amarelo	3	1.0500	-3.97	1.0500	-3.99
Verde	4	0.9852	-4.16	0.9852	-4.17
Azul	5	0.9716	-5.12	0.9716	-5.13
Anil	6	0.9884	-5.75	0.9884	-5.77

Tabela 3.4 - Resultados para a rede de 6 barramentos

Dos resultados obtidos constata-se que os resultados obtidos entre a plataforma de simulação em VBA e o PSS®E são muito próximos.

3.4.3 Rede com compensação

Para o caso de se realizar a compensação de potência reactiva para controlar a tensão num dado barramento, neste caso no barramento 4, utilizando um *STATCOM*, só é possível enquanto as baterias de condensadores ou bobinas não atingirem o máximo da sua capacidade, tal como constatámos no gráfico da Figura 2.6.

Pelo que seguidamente, e considerando a rede anterior (Figura 3.13), será demonstrado os cálculos para compensação da Potência Reactiva no barramento como se demonstra na Figura 3.14, para as duas situações seguintes:

- Compensação com controlo de tensão (mediante a utilização do *STATCOM* a operar dentro dos limites de funcionamento);
- Compensação sem controlo de tensão (mediante a ilustração do cenário extremo de compensação de reactiva onde um dos limites de reactiva é atingido).

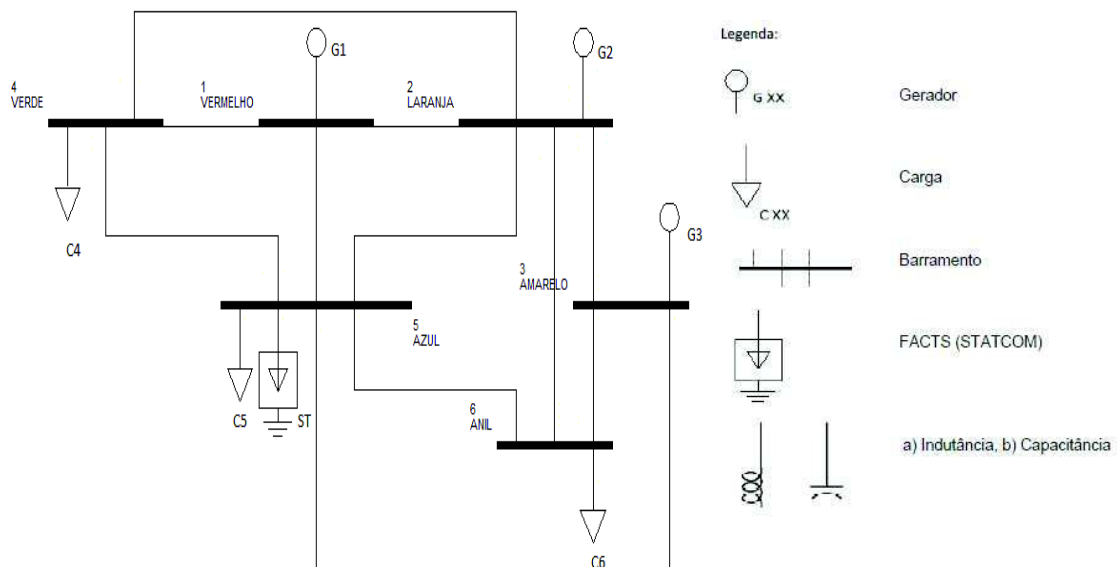


Figura 3.14 - Rede de 6 Barramentos com compensação

3.4.3.1 Compensação com controlo de tensão

Nos cálculos seguidamente apresentados, foram consideradas as baterias de carácter indutivo do *STATCOM* com um valor de 25MVar, de modo a atingir o valor necessário para realização da compensação no barramento 4.

A tensão neste barramento subiu de 0.9852 pu (Tabela 3.4) para 1,0000 pu (Tabela 3.5).

Barramento		Resultados obtidos...					
		... no VBA			... no PSSE		
		Tensão		FACTS [MVar]	Tensão		FACTS [MVar]
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]		V [pu]	ang [°]	
Vermelho	1	1.0500	0.00	--	1.0500	0.00	--
Laranja	2	1.0500	-3.52	--	1.0500	-3.60	--
Amarelo	3	1.0500	-3.76	--	1.0500	-3.87	--
Verde	4	1.0000	-4.33	-23.82	1.0000	-4.39	-23.80
Azul	5	0.9741	-5.00	--	0.9741	-5.06	--
Anil	6	0.9889	-5.56	--	0.9889	-5.65	--

Tabela 3.5 - Resultados para a rede 6 barramentos com controlo da tensão

Constata-se que os resultados obtidos pela plataforma de simulação são idênticos aos obtidos pelo programa de simulação usado.

O objectivo do *STATCOM*, no barramento 4 é garantir que a tensão mantinha o nível de 1,0 pu. A partir do momento em que as baterias (capacitivas ou indutivas) atinjam o limite máximo, então a tensão deixa de ser controlada como ilustrado no caso seguinte.

3.4.3.2 Compensação sem controlo de tensão

Nesta alínea, continuou-se a considerar as baterias do *STATCOM*, mas com um máximo de 15 MVar, e neste caso podemos constatar que não seria o suficiente para realizar a compensação da potência reactiva sobe acima de 0.9852pu (Tabela 3.4), mas não ultrapassa os 0.9975pu (Tabela 3.6).

Barramento		Resultados obtidos...					
		... no VBA			... no PSSE		
		Tensão		FACTS [MVar]	Tensão		FACTS [MVar]
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]		V [pu]	ang [°]	
Vermelho	1	1.0500	0.00	--	1.0500	0.00	--
Laranja	2	1.0500	-3.50	--	1.0500	-3.64	--
Amarelo	3	1.0500	-3.74	--	1.0500	-3.91	--
Verde	4	0.9975	-4.23	-15.00	0.9945	-4.31	-14.90
Azul	5	0.9737	-4.98	--	0.9732	-5.09	--
Anil	6	0.9888	-5.54	--	0.9887	-5.69	--

Tabela 3.6 - Resultados para a rede 6 barramentos sem controlo da tensão

Concluindo então que, em todos os casos simulados, os resultados obtidos pela plataforma de simulação e o *software* de referência⁷ [8], estão em concordância para os diferentes cenários simulados.

⁷ PSS®E University versão 33, da Siemens

CAPÍTULO IV – ESTABELECIMENTO DE TENSÃO EM LINHA MAT: APLICAÇÃO DE FACTS

Neste capítulo é efectuada uma aplicação da ferramenta de cálculo para o estudo da compensação de potência reactiva numa linha de transporte de energia. É estudada a influência do nível de tensão aplicado, do comprimento de respectiva linha, do diagrama de cargas e topologia da linha no dimensionamento de dispositivos FACTS.

4. ESTABELECIMENTO DE TENSÃO EM LINHAS MAT: APLICAÇÃO DE *FACTS*

4.1 Introdução

Pretende-se aplicar a ferramenta de cálculo elaborada em VBA para o estudo da compensação de potência reactiva numa linha de transporte de energia e estudar a influência do nível de tensão aplicado, do comprimento da respectiva linha, do diagrama de cargas e topologia da linha. Os resultados encontram-se tabelados nos anexos A.

O critério de admissibilidade é o que se encontra planeado na Norma IEC 60038 para o valor a atribuir aos limites máximo e mínimo de tensão nos barramentos em regime permanente à frequência industrial [11].

A IEC (International Electrotechnical Commission) é uma organização internacional de padronização que inclui todas as comissões electrotécnicas nacionais (Comités Nacionais IEC). O objectivo do IEC é promover a cooperação internacional em todas as questões relacionadas com a normalização nos campos eléctricos e electrónicos. Para este fim, e para além de outras actividades, o IEC publica normas internacionais e a sua preparação é confiada a comités técnicos.

4.2 Norma IEC 60038

Na norma, a tensão máxima para a qual o equipamento é especificado tem em consideração:

- O isolamento;
- e demais características que podem ser submetidos à maior tensão nas recomendações de equipamentos relevantes.

A tensão mais elevada para o equipamento é o valor máximo da "tensão mais elevada do sistema" para os quais podem ser utilizados os equipamentos [11].

Para o nível de tensão de 150kV, os equipamentos têm de ser dimensionados a 170kV, dando uma margem de 13.3%. Ao passo que, para o nível de 220kV os equipamentos têm de ser dimensionados para 245kV, guardando uma margem de 11.3% e para os 400kV, têm de ser dimensionados para os 420kV.

150kV		220kV		400kV	
0.900	1.133	0.900	1.113	0.900	1.05

Tabela 4.1 - Valores em pu atribuídos pela Norma IEC 60038

Logo, foram realizados cálculos assegurando que estes limites máximos (Tabela 4.1) nunca seriam violados, pelo que para as tensões de 150 e 220kV, nos barramentos procurou-se assegurar que os cálculos estivessem na gama [0,9 ; 1,1]pu (Tabela 4.2). Para o nível de tensão de 400kV, o limite superior do intervalo coincide com a tensão mais elevada para os equipamentos, em regime permanente, ou seja, na gama [0,9 ; 1,05]pu (Tabela 4.2).

150kV		220kV		400kV	
0.90	1.10	0.90	1.10	0.90	1.05

Tabela 4.2 – Valores em pu usados nas simulações

Estes pressupostos da norma IEC 60038 foram tidos em conta para se poder averiguar a possibilidade da reposição de uma linha, na sequência de contingência. Estes valores são considerados aceitáveis e compatíveis com níveis de isolamento à frequência industrial para os tempos necessários às manobras, nomeadamente para a ligação de reactâncias que reponham os valores de tensão na gama do regime permanente

4.3 Metodologia

A linha que serve de base a este capítulo tem como configuração inicial: dois barramentos, um gerador, e uma carga como se pode ver na seguinte figura (Figura 4.1).

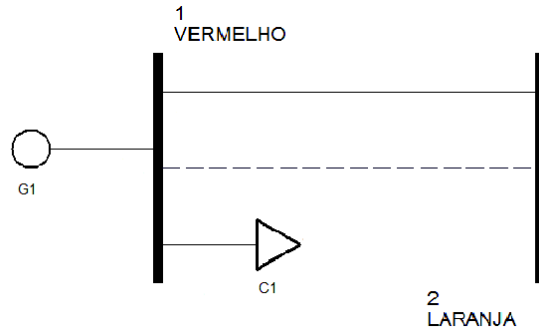


Figura 4.1- Linha com 2 barramentos

No primeiro barramento (Vermelho) existe uma carga e um gerador, pelo que se elaborou o estudo do possível comportamento da tensão no barramento 2 (Laranja) ao longo de um dia, desde a sua situação de vazio ao horário de cheia.

Assim considerou-se esta linha nalguns hipotéticos cenários, desde a combinação de três níveis de tensão (150, 220 e 400 kV) com seis diferentes comprimentos (de 100 a 600 km), e os cenários foram diferenciados entre linha simples e linha dupla.

São seguidamente apresentados os resultados correspondentes às combinações mencionadas, tendo-se focado nos seguintes factores considerados:

- Topologia da linha;
- Nível de tensão;
- Comprimento da linha.

Serão considerados cenários de tensão reduzida com 0.90 pu no barramento 1 (tipicamente associados a cenários de ponta) doravante denominados por cenários de ponta, para os três níveis de tensão (150, 220 e 400kV) e cenários de tensão elevada em que serão aplicados 1.10 pu no barramento 1 para os níveis de 150 e 220 kV e 1.05 pu para os 400kV, (tipicamente associados a cenários de vazio) doravante denominados por cenários de vazio.

4.4 Influência da topologia da linha

Considerou-se as seguintes características para as linhas:

Tensão [kV]	km	Tipo de Linha	R [pu]	X [pu]	B [pu]	Tipo de Linha	R [pu]	X [pu]	B [pu]
150	100	Linha simples	0.05605	0.19233	0.06018	Linha Dupla	0.02774	0.09520	0.11871
220	100	Linha simples	0.01585	0.08810	0.12936	Linha Dupla	0.00799	0.04388	0.26343
400	100	Linha simples	0.00181	0.02079	0.54786	Linha Dupla	0.00091	0.01040	1.09572

Tabela 4.3 - Características em pu das linhas de 150, 220 e 440kV

Apesar de não ser usual a utilização das linhas de 150kV de linha simples ou dupla com 300 ou 400 km e de 220kV de linha simples e dupla com 400 e 500 km, as mesmas foram tidas em conta para termo de comparação com a rede de 400kV, tal como para se perceber o comportamento de uma rede nestes casos e conhecer a sua necessidade no que respeita à sua compensação de potência reactiva.

A carga usada nestes ensaios que permitiram estas conclusões é de $100+j40$ MW/MVAr, ou seja, $Tg\phi = 0.4$.

Pelo Gráfico 4.1 (linha de 300km em cenário de vazio) podemos observar que para uma linha dupla (LD) necessitamos do dobro do valor das cargas de compensação que seriam precisas para equilibrar um sistema de linha simples (LS).

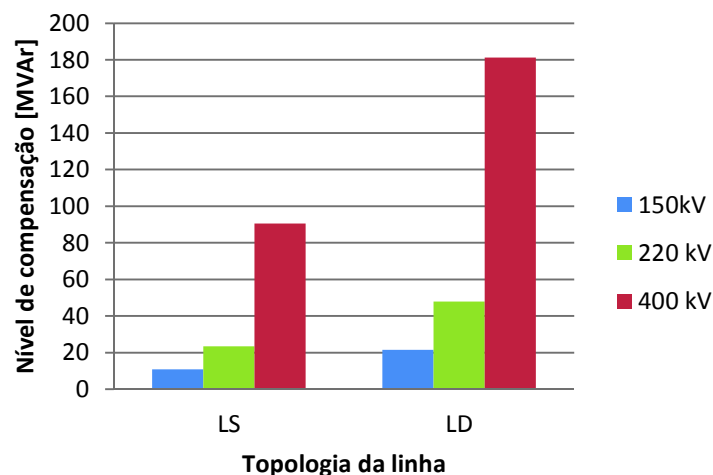


Gráfico 4.1 - Comparação ente linha simples e linha dupla

4.5 Influência do nível de tensão aplicado

Num sistema sem compensação, qualquer que seja o nível de tensão (150, 220 ou 400 kV) aplicado, a queda de tensão (em valores pu) entre uma extremidade da linha (barramento 1) e a outra (barramento 2) é aproximadamente igual. Aumentando a queda de tensão com o aumento do comprimento, como podemos constatar isso pelo seguinte gráfico (Gráfico 4.2). Pois, qualquer que seja a tensão aplicada no barramento 1 (Figura 4.1) a queda de tensão no barramento 2 vai sempre aumentando com o comprimento.

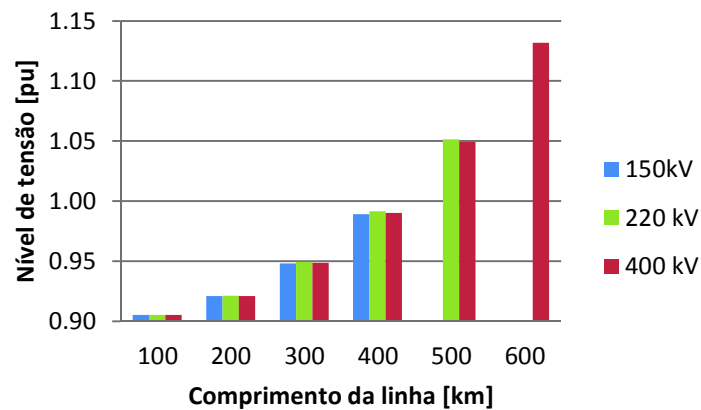


Gráfico 4.2- Nível de tensão sem compensação

Para a elaboração deste último gráfico (Gráfico 4.2), foi aplicado no barramento 1 uma tensão de 0.9 pu para os três níveis de tensão (150, 220 e 400kV) e o gráfico ilustra o resultado obtido no barramento 2 para uma linha dupla num cenário de ponta.

A partir dos 400km em diante, qual seja o nível de tensão, compensa mais manter a extremidade a ser compensada (Figura 4.2) no limite máximo (segundo a norma descrita na secção 4.2, para cada nível de tensão), para que o valor das baterias de compensação sejam menores.

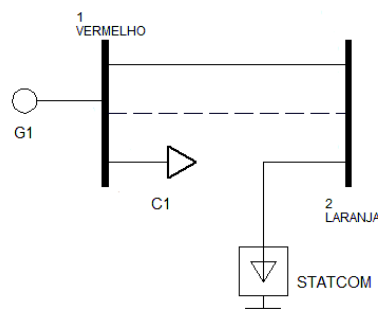


Figura 4.2 - Linha de 2 barramentos com STATCOM

Sempre que, com a compensação se pretenda baixar o nível de tensão num barramento em relação à situação sem compensação, se o nível de tensão desse barramento for superior ao do barramento de geração (referência), então a compensação é indutiva.

Para um dado comprimento de linha, quanto maior for o nível de tensão do sistema, maior terá de ser a carga necessária à compensação de potência reactiva com visto a colocar a tensão num dado barramento dentro da janela de limites (de Gráfico 4.2).

4.6 Influência comprimento da respectiva linha

O comprimento também é fundamental para a compensação da potência reactiva, pois quanto maior for a linha, maior é a sua característica capacitiva.

Para o nível de 400kV, a compensação de potência reactiva numa linha simples são necessários aproximadamente 30MVAR/100km (Gráfico 4.3) ao passo que numa linha dupla são necessários aproximadamente 60MVAR/100km (Gráfico 4.3), se a compensação for indutiva (dispositivo fornece energia á rede).

No caso do nível de tensão ser 220kV, obtem-se 8MVAR/100 km em linha simples e 16MVAR/100km em linha dupla (Gráfico 4.4). No nível de 150kV, será 7MVAR/100km em linha simples e para linha dupla 14MVAR/100km. Estes valores são relações potência reactiva por comprimento e não sofrem alteração com o comprimento da linha.

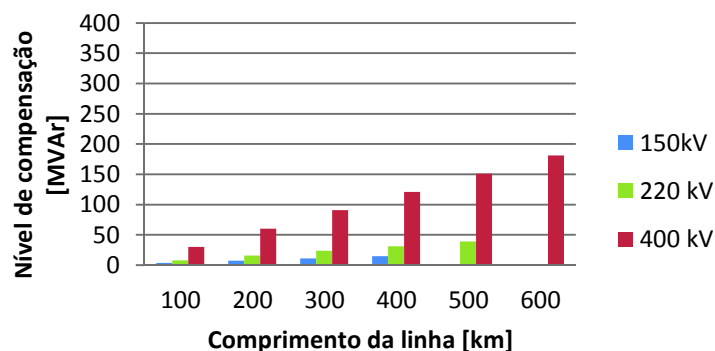


Gráfico 4.3 - Linha simples, cenário de vazio

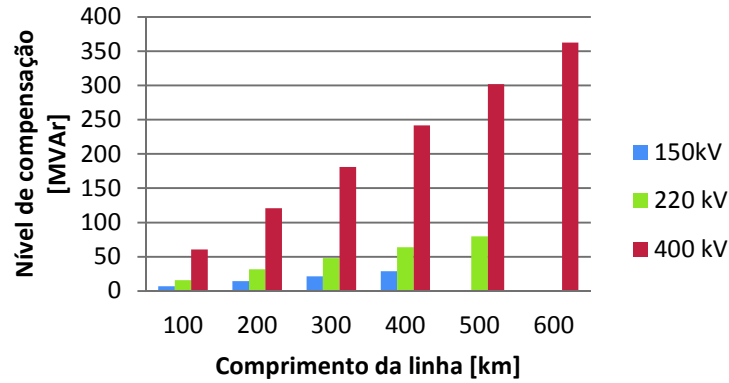


Gráfico 4.4 - Linha dupla, cenário de vazio

Se o sistema tiver caracter Indutivo (situação de ponta), tanto em linha simples como em linha dupla, as cargas de compensação diminuem de forma exponencial com o aumento do comprimento. Sendo que este comportamento é mais acentuado no nível de 400 kV, conforme podemos verificar no Gráfico 4.5 (linha simples) e no Gráfico 4.6 (linha dupla).



Gráfico 4.5 - Linha simples, hora de ponta

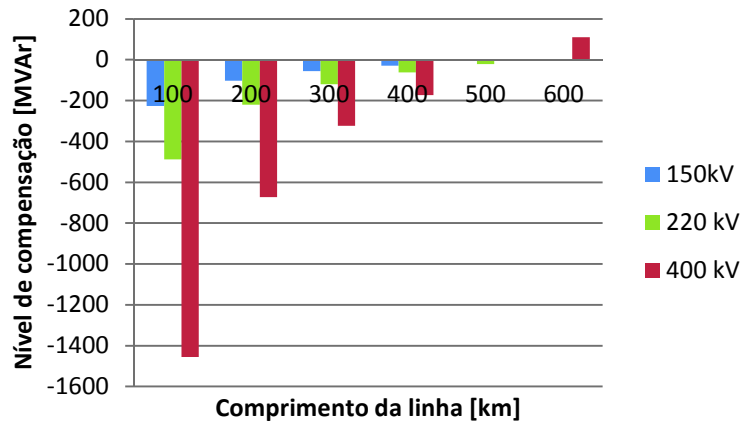


Gráfico 4.6 - Linha dupla, hora de ponta

A compensação de potência reactiva numa linha dupla é aproximadamente o dobro do valor do que seria necessário em linha simples, seja o caso de o sistema se indutivo ou capacitivo para o mesmo nível de tensão (de Gráfico 4.3 a Gráfico 4.6).

Após a compensação da potência reactiva do sistema (Gráfico 4.6), deixamos de ter o resultado ilustrado pelo Gráfico 4.2 (- Nível de tensão sem compensação) e passamos a ter um sistema com uma tensão com compensação (Gráfico 4.7).

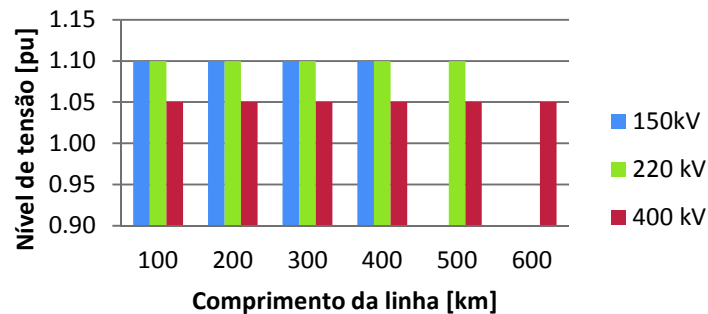


Gráfico 4.7 – Nível de tensão com compensação

4.7 Influência do diagrama de cargas

Neste ensaio, sujeitou-se um dos extremos a diferentes níveis de tensão por forma a simular a evolução do perfil de tensão da rede ao longo do dia. Foi monitorizado a evolução no outro extremo da linha, com e/ou sem compensação.

Ao nível do diagrama de cargas, a compensação deverá ser feita de modo a que o barramento a compensar (Figura 4.3), deve estar no limite máximo permitindo assim que o valor das cargas a utilizar seja menor.

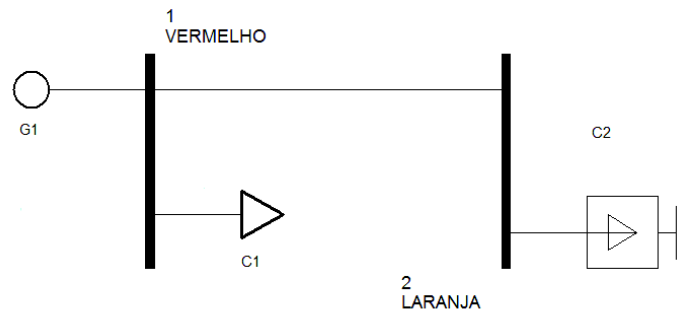


Figura 4.3 - Linha de 300kV com STATCOM

No Gráfico 4.8, ilustra-se a diferença obtida num cenário de ponta e num de vazio para uma linha dupla com 300km, nos três níveis de tensão.

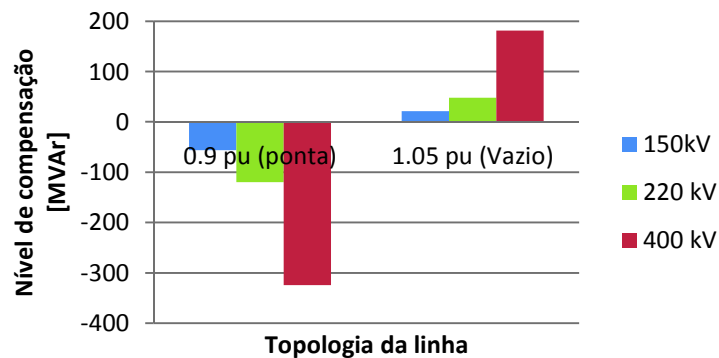


Gráfico 4.8 - Diferença cenário de ponta e cenário de vazio

○ **Influência do carácter do trânsito na linha**

Pretende-se agora observar o comportamento da rede no nível de 400kV com uma carga de $200 + j40$ MW/MVAr na sua extremidade (no barramento 2, conforme ilustrado na Figura 4.4).

No estudo realizado na presente secção, serão analisados dois tipos de cenários: cenário de vazio (ou de tensão elevada) cenário de ponta (ou de tensão reduzida). No cenário de tensão reduzida, será aplicado 0.9 pu no barramento 1 e no cenário de tensão elevada, 1.05 pu, também no barramento 1, para o nível de 400kV.

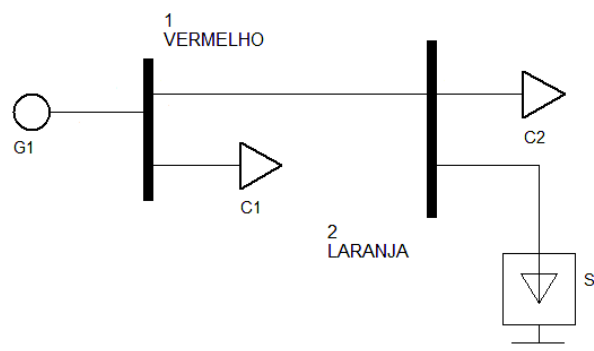


Figura 4.4 - Rede com duas cargas

○ **Topologia da linha**

Devido à linha estar em carga pela presença de duas cargas indutivas (uma no barramento 1 e outra no barramento 2), observa-se no Gráfico 4.9 a compensação necessário em linha dupla não carece de ter o dobro do valor como tinha no sistema observado anteriormente (como observado na Figura 4.4) em que não tinha carga no barramento 2, isto considerando um cenário de tensão reduzida.

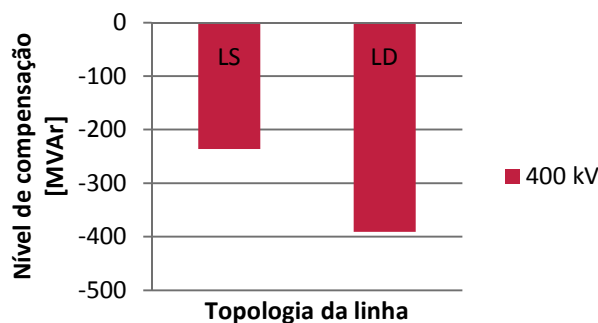


Gráfico 4.9 - Linha com 300 km num cenário de tensão reduzida

Num cenário de tensão elevada, observa-se no Gráfico 4.10, que o sistema nos 400kV, ao contrário do cenário de tensão reduzida anteriormente visto, a compensação de linha simples carece de uma compensação de valor bastante superior ao dobro.

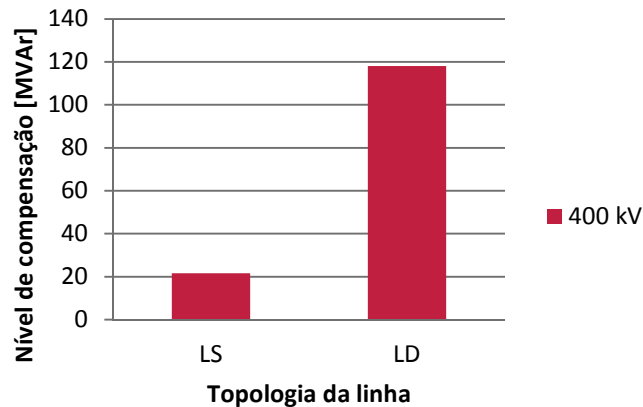


Gráfico 4.10 - Linha com 300 km, num cenário de tensão elevada

o **Influência comprimento da respectiva linha**

A nível da compensação de reactiva, observa-se no Gráfico 4.11, que no nível de 400kV, o sistema vai perdendo a sua característica indutiva (num cenário de tensão reduzida) conforme o comprimento da linha vai aumentando, tendendo para se tornar capacitivo.

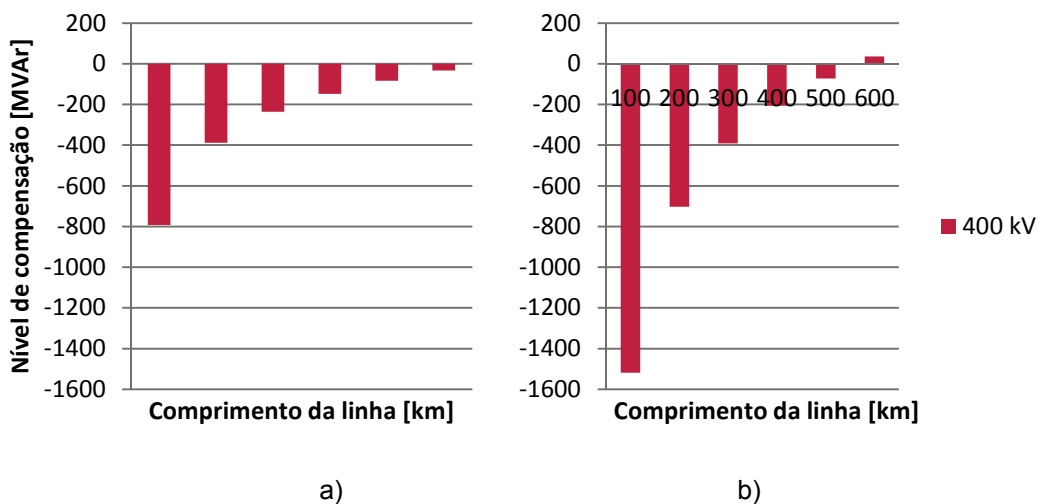


Gráfico 4.11 – a) Linha simples e b) linha dupla, em cenário de tensão reduzida (carga de 200 MW + 40MVAR no barramento 2)

Conforme o Gráfico 4.12, com o aumento do comprimento, o mesmo tenderá a ser de natureza capacitiva. Assim sendo terá de ser injectada potência indutiva na rede para proceder à sua compensação.

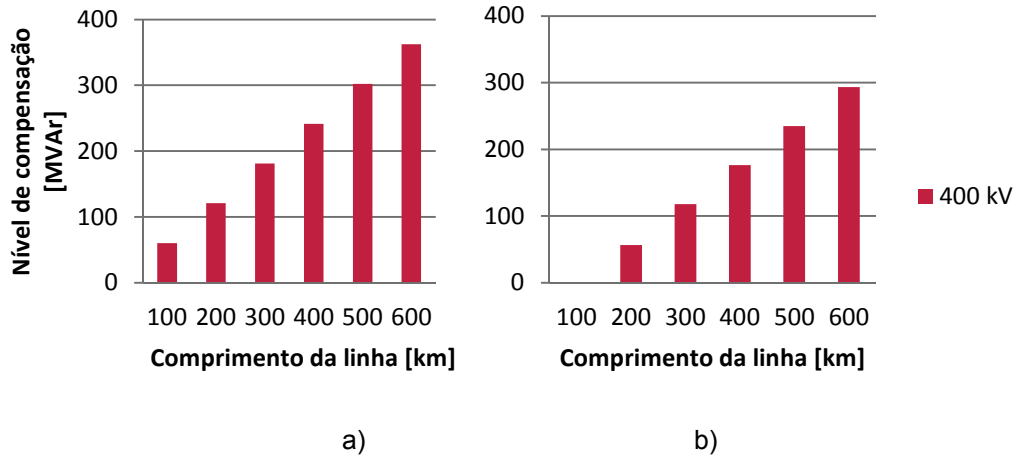


Gráfico 4.12 – Linha dupla a) sem carga e b) com carga no barramento 2, em cenário de tensão elevada

A passagem de linha simples para linha dupla, em geral, corresponde a termos o sistema mais capacitivo para um mesmo nível de carga.

Numa situação tensão reduzida (0.9 pu), o sistema carece de compensação capacitiva. Ao passo que, quando passa para uma situação de tensão elevada (1.05 pu), o sistema passa a ser capacitivo e a compensação terá de ser indutiva.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste capítulo, são apresentadas as principais conclusões do trabalho e delineadas algumas linhas de orientação de trabalho futuro.

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente trabalho, teve como objectivo o desenvolvimento de uma plataforma de simulação que permite a simulação do trânsito de energia de uma rede de energia eléctrica pelo método de Newton-Raphson. Teve também como objectivo a inclusão e desenvolvimento de modelos *FACTS* respectivamente:

- *Fixed Shunt*;
- *Switched Shunt*;
- *STATCOM*.

Para validação desta plataforma de simulação, foi realizada a comparação de resultados obtidos por simulação em regime permanente com os de um programa de referência⁸. Constatou-se que a plataforma desenvolvida apresenta os mesmos resultados que o programa mencionado.

Na óptica do trânsito de energia, o *STATCOM* é visto como uma fonte de tensão. O *Fixed Shunt* e o *Switched Shunt* comportam-se como elementos passivos, pelo que são elementos sensíveis à variação da tensão aos seus terminais.

O funcionamento do *Switched Shunt* é por aplicação de escalões ao passo que no caso do *STATCOM* permite entre um ajuste mais fino e daí permitir uma maior precisão na obtenção do valor de tensão no barramento a compensar.

Salienta-se a excelente capacidade de resposta destes dispositivos estáticos em reagir com eficácia à alteração do diagrama de cargas ao longo do dia, permitindo uma mais adequada gestão da potência reactiva da rede.

Foi estudada a possibilidade de aplicação de *FACTS* para controlar as tensões que se podem desenvolver aos terminais de linhas MAT em regime permanente decorrente da sua energização.

Nesse sentido, foram identificados os seguintes factores que influenciam o valor da tensão aos seus terminais:

- **Nível de tensão**, a relação potência reactiva por unidade de comprimento (MVar/100km) para o nível de 150kV apresenta um valor próximo de 7MVar/100km, para o nível de 220kV a relação é de 8MVar/100km e por fim no nível de 400kV a mesma é de 30MVar/100km (isto sempre em linha simples, para resultados mais pormenorizados ver alínea 4.6 e anexo A). Para linha dupla, o resultado é o dobro do obtido em linha simples;

⁸ PSS®E University versão 33, da Siemens

- **Comprimento da linha e Diagrama de carga**, confirma-se que quanto maior o comprimento maior é a reactiva produzida pela linha e maior é o valor da tensão no fim da linha em condições de vazio de carga;
- **Topologia da linha**, a compensação de potência reactiva numa linha dupla é aproximadamente o dobro do valor do que a correspondente em linha simples, independentemente da carga de linha do sistema ser indutivo ou capacitivo, para um mesmo nível de tensão.

Para desenvolvimentos futuros, pode-se:

- Incluir o modelo do transformador;
- Transformador desfazador nos modelos da plataforma de simulação desenvolvida;
- Desenvolver modelos *FACTS* apresentados na secção 3.3;
- Incluir outros tipos de controlo para o *STATCOM*;
- Investigar em que medida ou condições a compensação serie é mais adequada ou vantajosa que a compensação paralela no controlo de tensão de redes MAT.

BIBLIOGRAFIA

Na próxima página, é indicado a bibliografia considerada relevante e que serviu de base para a elaboração desta Dissertação de Mestrado.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1]. “Redes de Energia Eléctrica, uma análise sistémica” –Sucena Paiva, J.P., IST Press, Abril de 2005, ISBN 978-972-8469-66-5;
- [2]. “Power Generation Operation and Control” – Allen J. Wood e Bruce F. Wollenberg (A Wiley-interscience Publication, second edition), 1996, ISBN 0-471-58699-4;
- [3]. “Electric Energy Systems Theory - An introduction” – Olle L. Elgerd, McGraw-Hill Inc, 1982, ISBN 0-07-Y66273-8;
- [4]. “Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control” – Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, Springer, 2006, ISBN-10 3-540-30606-4 ;
- [5]. Kerry Diehl, Member IEEE, John A. Diaz de Leon II, Senior Member IEEE, and Manisha Ghorai, Member IEEE, “Applying SVCs on Distribution Systems”; 978-1-4244-6547-7/10, 2010;
- [6]. Juan Dixon, Luis Morán, José Rodriguez e Ricardo Domke, “*Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-art Review*”, Proc. IEEE, Vol. 33, pp. 2144-2164, Dezembro 2005;
- [7]. R. Grunbaum, A. Petersson, and B. Thorvaldsson, “*Facts, improving the performance of electrical grids*”, ABB Rev., pp. 11-18, Mar 2003;
- [8]. Release Notes for PSS[®]E 33.2, Julho 2012;
- [9]. FACTS – Flexible AC Transmission Systems, Answers for Energy, Siemens AG – Energy Sector, order nº E50001-G610-A113-V1-4A00 (2011);
- [10]. Bindeshwar Singh, N. K. Sharma and A. N. Tiwari, and S. P. Singh, “*Incorporation of FACTS Controllers in Newton Raphson Load Flow for Power Flow Operation, Control and Planning: A Comprehensive Survey*”, (IJCSE) International Journal on Computer Science and Engineering, Vol.02, Nº 06, 2010, pp. 2117-2124;
- [11]. IEC 60038 International Standart, Edition 6.2, 2002-07.

ANEXO A - Dados e Resultados

O anexo A deste trabalho, é composto pelos dados das redes dos exemplos de aplicação do capítulo IV, bem como os resultados obtidos nas simulações.

A. RESULTADOS OBTIDOS DO ESTUDO DA LINHA

Seguidamente são apresentados os resultados tabelados que servem de suporte às conclusões obtidas no capítulo IV do trabalho.

Considerou-se as seguintes características para as linhas:

Tensão [kV]	km	Tipo de Linha	R [pu]	X [pu]	B [pu]	Tipo de Linha	R [pu]	X [pu]	B [pu]
150	100	Linha simples	0.05605	0.19233	0.06018	Linha Dupla	0.02774	0.09520	0.11871
150	200	Linha simples	0.11209	0.38466	0.12035	Linha Dupla	0.05548	0.19039	0.23741
150	300	Linha simples	0.16814	0.57699	0.18053	Linha Dupla	0.08322	0.28559	0.35612
150	400	Linha simples	0.22419	0.76932	0.24071	Linha Dupla	0.11096	0.38078	0.47483
220	100	Linha simples	0.01585	0.08810	0.12936	Linha Dupla	0.00799	0.04388	0.26343
220	200	Linha simples	0.03170	0.17620	0.25871	Linha Dupla	0.01598	0.08776	0.52685
220	300	Linha simples	0.04756	0.26430	0.38807	Linha Dupla	0.02397	0.13164	0.79028
220	400	Linha simples	0.06341	0.35240	0.51742	Linha Dupla	0.03197	0.17552	1.05370
220	500	Linha simples	0.07926	0.44050	0.64678	Linha Dupla	0.03996	0.21940	1.31713
400	100	Linha simples	0.00181	0.02079	0.54786	Linha Dupla	0.00091	0.01040	1.09572
400	200	Linha simples	0.00362	0.04158	1.09572	Linha Dupla	0.00181	0.02079	2.19144
400	300	Linha simples	0.00542	0.06237	1.64357	Linha Dupla	0.00271	0.03119	3.28714
400	400	Linha simples	0.00724	0.08316	2.19144	Linha Dupla	0.00362	0.04158	4.38288
400	500	Linha simples	0.00905	0.10395	2.73930	Linha Dupla	0.00453	0.05198	5.47860
400	600	Linha simples	0.01085	0.12474	3.28714	Linha Dupla	0.00543	0.06237	6.57428

Tabela 1 - Características em pu das linhas de 150, 220 e 440kV

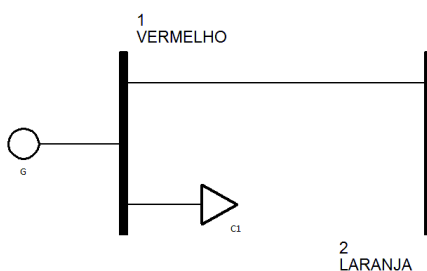


Figura 1 – Linha com 2 barramentos

Foram criados alguns cenários e comparados os resultados entre si, para que se pudesse-se ter a noção do comportamento da potência reactiva na linha e a forma de se efectuar a sua compensação.

A.1 Linha de 100km

- Linha simples de 150 kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.1064	-0.10	0.9911	1.65	-58.9	1.1000	0.00	3.6
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0058	-0.10	0.9008	1.65	-48.7	1.1000	-1.05	-53.8
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9053	-0.10	0.9054	-0.10	0.0	1.1000	-3.75	-111.8

Tabela 2 - Linha simples de 150kV, com 100km

- Linha dupla de 150 kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.1063	-0.09	1.0461	0.82	-65.7	1.1000	0.00	7.2
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0057	-0.09	1.0057	-0.09	0	1.1000	-1.68	-108.9
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9051	-0.09	0.9051	-0.09	0	1.1000	-3.75	-226.1

Tabela 3 - Linha Dupla de 150kV, com 100km.

- Linha simples de 220 kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.1063	-0.06	0.9119	1.76	-199.6	1.1000	0.00	7.8
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0057	-0.06	0.9090	0.94	-99.1	1.1000	-1.03	-117.2
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9052	-0.06	0.9052	-0.06	0.0	1.1000	-2.30	-242.8

Tabela 4 - Linha Simples de 220kV, com 100km.

- Linha dupla de 220 kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.1064	-0.06	1.0778	0.21	-69.7	1.1000	0.00	15.9
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0058	-0.06	1.0058	-0.06	0	1.1000	-1.05	-235.2
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9052	-0.06	0.9052	-0.06	0	1.1000	-2.33	-487.3

Tabela 5 - Linha Dupla de 220kV, com 100km.

- Linha simples de 400kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.0500	0.00	1.0500	0.00		1.0500	0.00	
Laranja	2	1.0560	-0.03	1.0429	0.03	-65.30	1.0500	0.00	30.2
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0057	-0.03	1.0057	-0.03	0.00	1.0500	-0.25	-222.4
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9052	-0.03	0.9052	-0.03	0.00	1.0500	-0.83	-727.9

Tabela 6 - Linha Simples de 400kV, com 100km.

- Linha dupla de 400kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.0500	0.00	1.0500	0.00		1.0500	0.00	
Laranja	2	1.0560	-0.03	1.0494	0.00	-66.10	1.0500	0.00	60.4
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0057	-0.03	1.0057	-0.03	0.00	1.0500	-0.25	-444.5
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9052	-0.03	0.9052	-0.03	0.00	1.0500	-0.84	-1455.0

Tabela 7 - Linha Dupla de 400kV, com 100km.

A.2 Linha de 200km

- Linha simples de 150 kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.1263	-0.40	0.9097	2.87	-49.7	1.1000	0.00	7.3
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0237	-0.40	1.0237	-0.40	0.0	1.0500	-0.84	-21.4
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9213	-0.40	0.9213	-0.40	0.0	1.1000	-3.75	-50.5

Tabela 8 - Linha Simples de 150kV, com 200km.

- Linha Dupla de 150 kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.1254	-0.39	1.0075	1.40	-60.9	1.1000	0.00	14.4
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0231	-0.39	1.0231	-0.39	0.0	1.1000	-1.68	-43.7
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9210	-0.39	0.9210	-0.39	0.0	1.1000	-3.75	-102.3

Tabela 9 - Linha Dupla de 150kV, com 200km.

- Linha simples de 220kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.1256	-0.24	1.0158	0.79	-61.9	1.1000	0.00	15.7
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0233	-0.24	1.0233	-0.24	0.0	1.1000	-1.03	-46.9
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9210	-0.24	0.9211	-0.24	0.0	1.1000	-2.30	-109.7

Tabela 10 – Linha Simples de 220kV, com 200km.

- Linha dupla de 220kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.1260	-0.25	1.0684	0.30	-68.5	1.1000	0.00	31.9
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0237	-0.25	1.0237	-0.25	0.0	1.1000	-1.05	-93.7
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9213	-0.25	0.9213	-0.25	0.0	1.1000	-2.33	-219.7

Tabela 11 - Linha Dupla de 220kV, com 200km.

- Linha simples de 400kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.0500	0.00	1.0500	0.00		1.0500	0.00	
Laranja	2	1.0745	-0.12	0.9750	0.36	-239.74	1.0500	0.00	60.4
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0233	-0.12	0.9750	0.12	-116.45	1.0500	-0.25	-65.9
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9210	-0.12	0.9750	-0.42	130.27	1.0500	-0.83	-318.6

Tabela 12 – Linha Simples de 400kV com 200 km

- Linha dupla de 400kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.0500	0.00	1.0500	0.00		1.0500	0.00	
Laranja	2	1.0745	-0.12	0.9750	0.36	-479.47	1.0500	0.00	120.8
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0233	-0.12	0.9750	0.12	-232.89	1.0500	-0.25	-131.8
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9210	-0.12	0.9576	-0.32	180	1.0500	-0.83	-673.3

Tabela 13 - Linha Dupla de 400kV com 200km

A.3 Linha de 300km

- Linha simples de 150 kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.1603	-0.92	1.0000	1.51	-26.30	1.1000	0.00	7.3
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0548	-0.92	1.0548	-0.92	0.00	1.1000	-1.68	-21.4
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9493	-0.92	0.9493	-0.92	0	1.1000	-3.75	-50.5

Tabela 14 - Linha Simples de 150kV, com 300km.

- Linha dupla de 150kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.1588	-0.89	0.9812	1.79	-57.8	1.1000	0.00	21.5
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0535	-0.89	1.0535	-0.89	0.0	1.1000	0.00	-17.1
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9481	-0.89	0.9481	-0.89	0.0	1.1000	0.00	-56.2

Tabela 15 - Linha Dupla de 150kV, com 300km.

- Linha simples de 220kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.1594	-0.56	0.9933	1.00	-59.2	1.1000	0.00	23.5
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0540	-0.56	1.0540	-0.56	0.0	1.1000	-1.03	-18.2
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9486	-0.56	0.9486	-0.56	0.0	1.1000	-2.30	-60.1

Tabela 16 - Linha Simples de 220kV, com 300km.

- Linha dupla de 220kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.1603	-0.57	1.0711	0.27	-68.9	1.1000	0.00	47.8
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0548	-0.57	0.9737	0.27	-56.9	1.1000	-1.05	-35.9
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9493	-0.57	0.9494	-0.57	0.0	1.1000	-2.33	-119.9

Tabela 17 - Linha Dupla de 220kV, com 300km.

- Linha simples de 440kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.0500	0.00	1.0500	0.00		1.0500	0.00	
Laranja	2	1.1067	-0.27	1.0258	0.11	-126.3	1.0500	0.00	90.6
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0540	-0.27	1.0140	-0.07	-61.7	1.0500	-0.25	6.4
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9486	-0.27	0.9126	-0.07	-50	1.0500	-0.55	-162.1

Tabela 18 - Linha Simples de 400kV, com 300km.

- Linha Dupla de 400kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.0500	0.00	1.0500	0.00		1.0500	0.00	
Laranja	2	1.1067	-0.27	1.0449	0.02	-196.50	1.0500	0.00	181.2
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0540	-0.27	1.0336	-0.17	-64.10	1.0500	0.00	12.8
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9486	-0.27	0.9126	-0.07	-99.90	1.0500	0.00	-324.1

Tabela 19 - Linha Dupla de 400kV, com 300km.

A.4 Linha de 400km

- Linha simples de 150 kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.2117	-1.70	1.0000	1.51	-25.0	1.1000	0.00	14.6
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.1017	-1.71	1.0000	0.00	-12.0	1.1000	-1.68	0.2
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9914	-1.70	0.9914	-1.70	0.0	1.1000	-3.75	-14.3

Tabela 20 - Linha Simples de 150kV, com 400km.

- Linha dupla de 150kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.2088	-1.66	0.9660	2.02	-56.0	1.1000	0.00	28.7
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0990	-1.66	1.0990	-1.66	0	1.1000	-1.68	-0.3
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9890	-1.66	0.9890	-1.66	0	1.1000	-3.75	-29.6

Tabela 21 - Linha Dupla de 150kV, com 400km.

- Linha simples de 220kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.2102	-1.03	0.9817	1.11	-57.8	1.1000	0.00	31.3
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.1003	-1.04	0.9525	0.49	-72.6	1.1000	-1.03	0
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9901	-1.03	0.9901	-1.03	0.0	1.1000	-2.30	-31.4

Tabela 22 - Linha Simples de 220kV, com 400km.

- Linha dupla de 220kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.2119	-1.06	1.0861	0.13	-70.8	1.1000	0.00	63.7
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.1017	-1.06	0.9873	0.13	-58.5	1.1000	-1.05	1
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9915	-1.06	0.9917	-1.07	0	1.1000	-2.33	-62.1

Tabela 23 - Linha Dupla de 220kV, com 400km.

- Linha Simples de 400kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.0500	0.00	1.0500	0.00		1.0500	0.00	
Laranja	2	1.1552	-0.50	0.9750	0.36	-404.09	1.0500	0.00	120.8
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.1002	-0.50	0.9750	0.12	-280.81	1.0500	-0.25	57.7
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9902	-0.50	0.9750	-0.42	-34.09	1.0500	-0.83	-68.7

Tabela 24 - Linha Simples de 400kV com 400km

- Linha dupla de 400kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.0500	0.00	1.0500	0.00		1.0500	0.00	
Laranja	2	1.1552	-0.50	0.9750	0.36	-404.09	1.0500	0.00	241.6
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.1002	-0.50	0.9750	0.12	-280.81	1.0500	-0.25	115.3
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	0.9902	-0.50	0.9750	-0.42	-34.09	1.0500	-0.83	-173.4

Tabela 25- Linha Dupla de 400kV com 400km

A.5 Linha de 500km

- Linha simples de 220kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.2822	-1.71	0.9803	1.12	-55.7	1.1000	0.00	39.1
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.1656	-1.71	1.0000	0.00	-32.3	1.1000	-1.03	14.1
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	1.0490	-1.71	1.0490	-1.71	9.6	1.1000	-2.30	-11.0

Tabela 26 - Linha Simples de 220kV, com 500km.

- Linha dupla de 220kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.1000	0.00	1.1000	0.00		1.1000	0.00	
Laranja	2	1.2852	-1.76	0.9832	1.11	-116.0	1.1000	0.00	79.7
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.1683	-1.76	1.0130	-0.14	-61.6	1.1000	-1.05	29.5
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	1.0515	-1.76	1.0515	-1.76	0	1.1000	-2.33	-21.0

Tabela 27 - Linha Dupla de 220kV, com 500km.

- Linha Simples de 400kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.0500	0.00	1.0500	0.00		1.0500	0.00	
Laranja	2	1.1067	-0.27	1.0258	0.11	-126.3	1.0500	0.00	90.6
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.0540	-0.27	0.9770	0.11	-97	1.0500	-0.25	6.4
Vermelho	1	0.9500	0.00	0.9500	0.00		0.9500	0.00	
Laranja	2	1.0013	-0.27	0.9633	-0.07	-55.7	1.0500	-0.52	-77.8

Tabela 28 - Linha Simples de 400kV, com 500km

- Linha Simples de 400kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.0500	0.00	1.0500	0.00		1.0500	0.00	
Laranja	2	1.2242	-0.83	1.0360	0.07	-300	1.0500	0.00	302
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.1659	-0.83	1.0180	-0.09	-240	1.0500	-0.25	201
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	1.0493	-0.83	1.0493	-0.83	0	1.0500	-0.83	-1.2

Tabela 29 - Linha Dupla de 400kV, com 500km

A.6 Linha de 600 km

- Linha Simples de 400kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.0500	0.00	1.0500	0.00		1.0500	0.00	
Laranja	2	1.3205	-1.29	1.0299	0.10	-190.9	1.0500	0.00	181.2
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.2576	-1.29	0.9809	0.10	-173.2	1.0500	-0.25	139.1
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	1.1318	-1.29	0.9527	-0.29	-108.9	1.0500	-0.83	54.9

Tabela 30 - Linha Simples de 400kV, com 600km.

- Linha Dupla de 400kV

Barramento		S/ Compensação		Switched Shunt			STATCOM		
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	V [pu]	ang [°]	[MVar]	V [pu]	ang [°]	[MVar]
Vermelho	1	1.0500	0	1.0500	0.00		1.0500	0.00	
Laranja	2	1.3205	-1.29	1.0299	0.10	-381.90	1.0500	0.00	362.4
Vermelho	1	1.0000	0.00	1.0000	0.00		1.0000	0.00	
Laranja	2	1.2576	-1.29	1.0182	-0.09	-311.00	1.0500	-0.25	278.2
Vermelho	1	0.9000	0.00	0.9000	0.00		0.9000	0.00	
Laranja	2	1.1318	-1.29	0.9164	-0.09	-251.90	1.0500	-0.83	109.7

Tabela 31 - Linha de 400kV, com 600km.

ANEXO B - Manuais

Neste capítulo dos anexos poderemos consultar o modo como foram testadas as linhas / redes utilizando o PSS@E e a ferramenta de cálculo concebida para este trabalho em VBA Excel.

B. Manuais

Neste capítulo dos anexos pretende-se mostrar a construção de casos com o PSS®E *University* versão 33 da Siemens.

Sendo que o objectivo do trabalho ao qual pertencem estes anexos, são a presença de um *FACTS (STATCOM)* numa linha/rede e a sua influência no trânsito de potências nas mesmas. O estudo foi realizado em regime permanente.

Esta abordagem será realizada através do PSS®E e da ferramenta de cálculo Programada para comprovar a eficácia do método em questão e a sua aplicação.

B.1 INTRODUÇÃO AO PSS®E

Para iniciar o PSS®E *University* v33 fazer:

- Iniciar;
- Todos os programas
- Siemens PTI;
- PSS®E *University*33

O PSS®E *University* v33 é em muito semelhante ao PSS®E para uso profissional, mas com algumas limitações, como no caso da limitação do número de barramentos. Esta versão é cedida pela Siemens de forma gratuita para uso dos estudantes universitários, para que estes possam ter acesso a uma ferramenta de cálculo bastante versátil.

O PSS®E tem uma componente gráfica com muitas semelhanças a outros programas de ambiente Windows, pelo que o seu uso é amigável.

- Criar um caso com o PSS®E

Após iniciar o programa de cálculo da Siemens (Figura 1 - PSS®E *University* v33 após iniciar) não temos as folhas de cálculo visíveis, pelo que ou criamos um caso novo ou abrimos um já criado anteriormente.

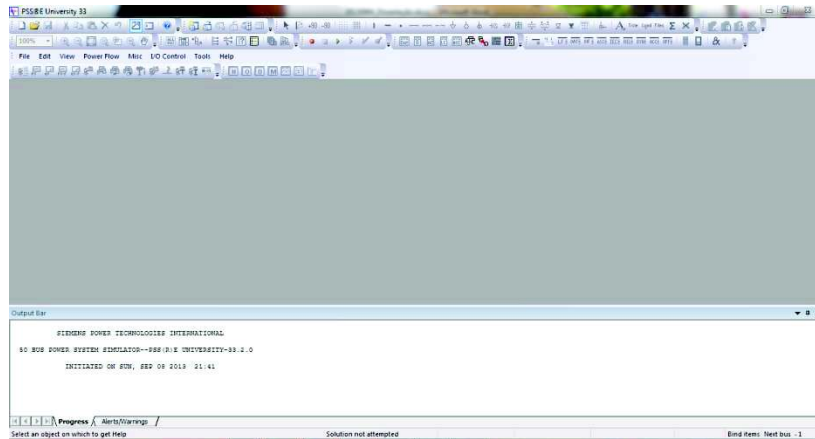


Figura 1 - PSS@E University v33 após iniciar

Neste caso optamos por criar um novo, então vamos a “File” seguido de “new” e na caixa de opções que surge (Figura 2 - Opção Nova rede) seleccionamos “Network case”

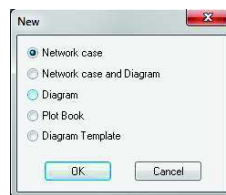


Figura 2 - Opção Nova rede

Na caixa de diálogo “Build New Case” (Figura 3 - Construção de um novo caso), podemos escolher:

- a potência de base da nossa rede;
- a frequência usada;
- as unidades para relação de transformação de potência nos transformadores;
- e o nome da rede (para identificar o caso).

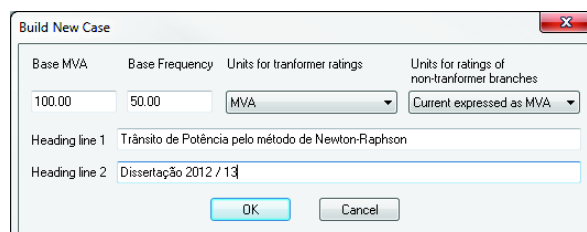


Figura 3 - Construção de um novo caso

- **Introdução dos dados dos barramentos**

Quando iniciamos o caso, deparamo-nos com um ambiente em muito semelhante ao do Excel. Seleccionamos então o separador dos barramentos (*Bus* na Figura 4 - Escolha da tabela dos barramentos).

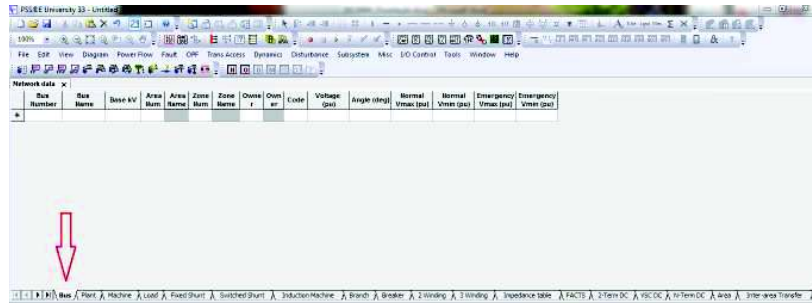


Figura 4 - Escolha da tabela dos barramentos

Das opções que temos à disposição, iremos preencher então:

- O número do barramento ("*Bus number*");
- O nome que iremos atribuir ao barramento ("*Bus name*");
- A tensão de base do barramento ("*Base kV*"), onde normalmente usa-se a tensão nominal do barramento;
- O código do tipo de barramento ("*code*"), que pode ser:
 - ❖ Tipo 1, para os barramentos de carga (ou PQ);
 - ❖ Tipo 2 para os barramentos de geração (ou PV);
 - ❖ Tipo 3 para os barramentos de referência.
- E no caso de querer introduzir uma admitância (em MVar) ligada ao barramento, preenchemos a opção

- **Introdução das linhas**

Para introduzir dados referentes às linhas (Figura 5 - separador da linhas), activamos o separador referente às linha ("*branch*") e preenchemos pelo menos:

- O barramento de origem ("*From bus number*");
- O barramento de destino ("*To bus number*");
- A "*Id*" da linha (que será 1 por defeito se for uma única linha a ligar dois barramentos);
- A resistência da linha ("*Line R*", em pu);

- A reactância da linha ("line X", em pu);
- E por a admitância transversal total da linha ("charging B, em pu).

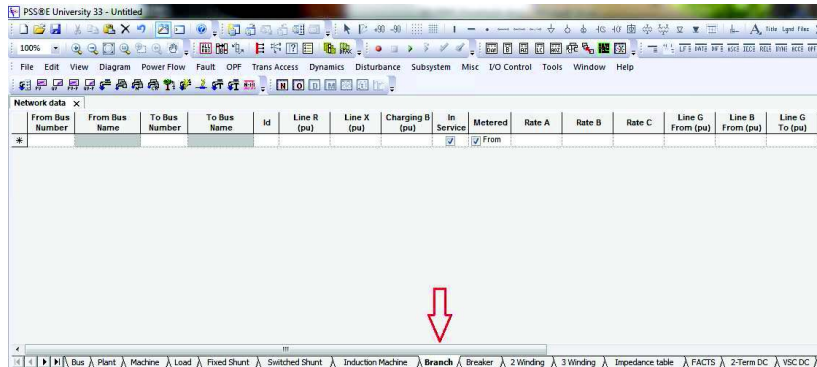


Figura 5 - separador da linhas

- **Introdução dos dados dos geradores**

Para a introdução dos geradores no sistema, primeiro activamos o separador das centrais (Figura 6 - separador das centrais ("Plant")), pois estas iram identificar a que barramento irá corresponder os gerador ou geradores que iram acolher.

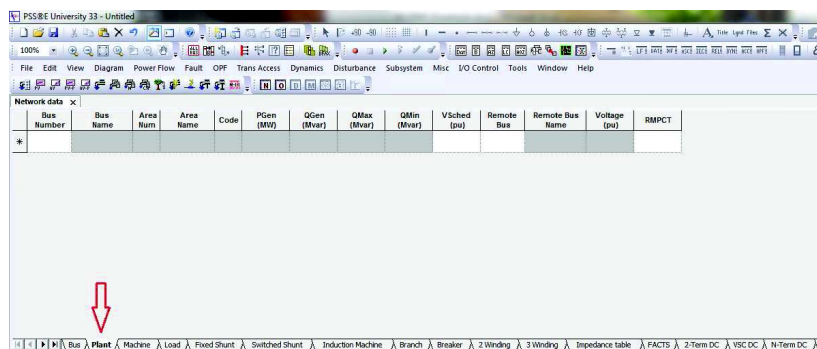


Figura 6 - separador das centrais ("Plant")

Apos ter sido criada a central, podemos atribuir então os geradores (Figura 7 - Separador dos geradores ("Machines")) correspondentes

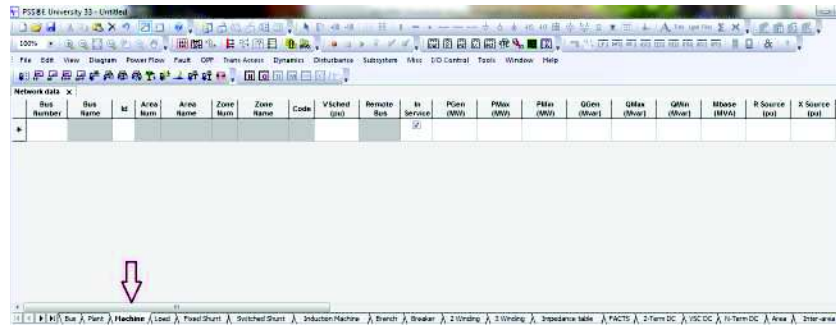


Figura 7 - Separador dos geradores ("Machines")

Neste separador interessa-nos introduzir os dados referentes a:

- Número de barramento ("*bus number*");
- "Id" do gerador (se for 1 ou o primeiro será por defeito 1);
- A tensão que se imposta no barramento ("*VSched*", em pu);
- A potência activa gerada ("*PGen*", em MW);
- A potência activa máxima ("*PMax*", em MW);
- A potência activa mínima ("*PMin*", em MW);
- A potência reactiva gerada ("*QGen*", em MVar);
- A potência reactiva máxima ("*QMax*", em MVar);
- A potência reactiva mínima ("*QMin*", em MVar);

- **Introdução dos dados das cargas**

Na introdução dos dados das cargas (Figura 8 - Separador das cargas ("*Load*")), precisamos preencher:

- Número de barramento ("*bus number*");
- "Id" da carga (se for 1 ou o primeiro será por defeito 1);
- O valor correspondente à potência activa ("*PLoad*", em MW);
- O valor correspondente à potência reactiva ("*QLoad*", em MVar).

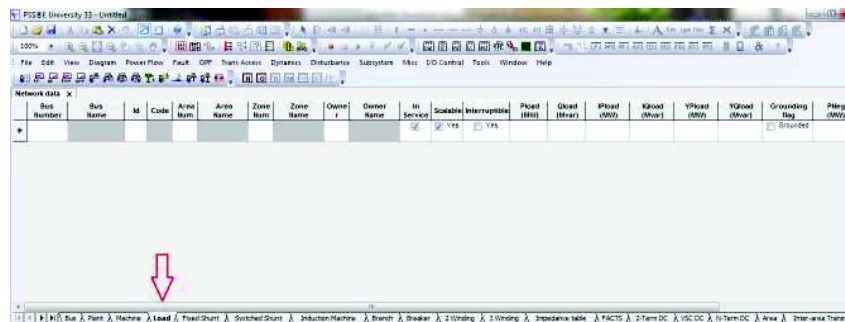


Figura 8 - Separador das cargas ("Load")

- **Fixed shunt no PSS®E**

E no caso de querer introduzir uma admitância (em MVar) ligada a um dado barramento, no separador do “Fixed Shunt” (Figura 9 - Separador do *Fixed Shunt*) preenchemos as opções:

- De número do barramento (“*bus number*”);
- “*G-shunt*” para a introdução de uma condutância (em MW);
- Ou “*B-shunt*” para a introdução de susceptância (em MVar).

Estas últimas duas opções correspondem a admitâncias transversais.

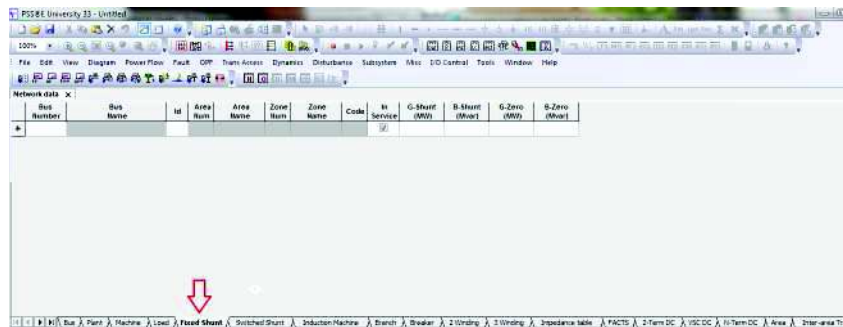


Figura 9 - Separador do *Fixed Shunt*

- **Switched Shunt no PSS®E**

Para o preenchimento dos dados no separador do *Switched Shunt* (Figura 10 - Separador do *Switched Shunt*) e visto que para o trabalho para o qual existem estes anexos, interessar a compensação paralela (“*Shunt*”) então iremos preencher:

- Número de barramento (“*bus number*”);
- Na opção “*In service*” deixamos ficar o “visto”;
- Na opção “*Control Mode*”, escolhemos o modo 1 (“*Discrete, cntr voltage*”);
- Na opção “*Adjustment method*”, permanece a opção de defeito (“*Sequential input order*”);
- Seguidamente estabelecesse a tensão máxima admissível no barramento (“*Vhi*”, em pu);
- E controlamos a tensão mínima admissível no barramento (“*Vlo*”, em pu);
- Na opção “*RMPCT (%)*”, iremos determinar 100;

- A opção “*Binit*” (MVar), permite-nos estabelecer um valor arranque;
- Na opção “*Blk 1 – steps*”, estabelecemos o numero máximo de baterias a usar um “*Blk 1 – Bstep* (MVar)”;
- Seguidamente estabelecemos o valor das baterias a usar em “*Blk 1 – Bstep* (MVar)”

NOTA: nestas duas últimas opções temos 8 casos de cada.

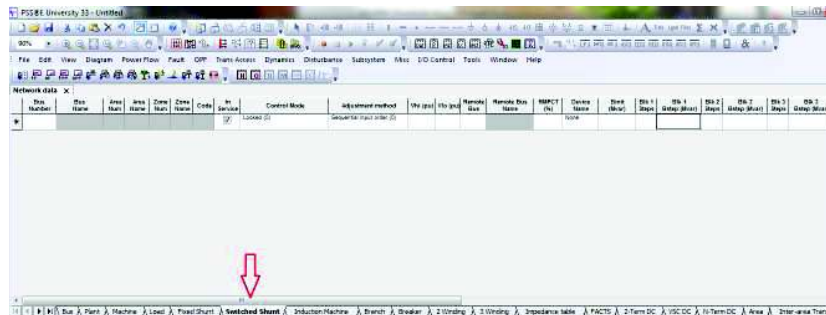


Figura 10 - Separador do *Switched Shunt*

Nos campos “*Blk n – Bstep* (MVar)”, podemos introduzir capacitâncias e indutâncias em que as primeiras têm valor positivo e têm de ser as primeiras a ser introduzidas. Ao passo que as segundas, têm valor negativo e são as últimas baterias a ser introduzidas.

- **FACTS no PSS®E para controlo de tensão no barramento de origem**

O *FACTS* (Figura 11 - Separador do *FACTS*), como no caso do presente trabalho interessa o *STATCOM*, então:

- Podemos introduzir o nome do dispositivo;
- Temos de introduzir o barramento onde o dispositivo se encontra (em “*Sending Bus Number / Name*”);
- Na opção “*control Mode*”, escolhemos “Normal”, visto tratar-se de um “*STATCOM*”;
- Preenchemos a opção “*V send Setpoint*” para determinar a tensão a impor no barramento;
- Na opção “*Shunt Max*”, estabelecemos o valor da carga a atribuir ao *STATCOM* (em MVar);

- A opção RMPCT (%), fica a 100, ou seja carga máxima se necessário.

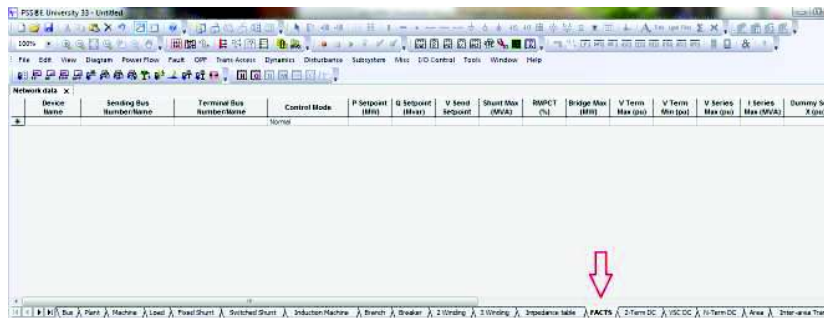


Figura 11 - Separador do FACTS

- **FACTS no PSS®E para controlo de tensão num barramento de Remoto**

O FACTS (Figura 11 - Separador do FACTS), altera por opção a potência reactiva no barramento onde está sediado, até ser obtido o nível de tensão no barramento pretendido. Então, após completar os passos definidos anteriormente:

- Preencher a opção “*Remote Bus*” com o número do barramento que pretendemos controlar.

Como óbvio, na opção “*Shunt Max*”, teremos de garantir que o valor da carga a atribuir ao STATCOM (em MVar) é suficiente para o referido controlo.

B.2 FERRAMENTA DE CÁLCULO EM VBA

O programa de cálculo foi realizado em VBA do *MS-Excel* e *MS-Excel*. A programação se feita em linguagem do VBA. Como este programa contém macros no *MS-Excel*, isto permite poder seleccionar o menu pretendido (Figura 12 - Menu Principal) como efectuar a escolha de qualquer opção pretendida no “Menu Principal”. Os cálculos realizam-se pelo método de Newton-Raphson.



Figura 12 - Menu Principal

Tal como é mostrado na figura anterior, o utilizador tem 9 opções:

- 1-Inserir dados dos barramentos;
- 2-Inserir dados das linhas;
- 3-Inserir dados dos geradores;
- 4-Inserir dados das cargas;
- 5-*Switched Shunt*;
- 6-*FACTS*;
- 7-Calcular;
- 8-Resultados do último cálculo;
- Sair, que permite sair do programa.

• Barramentos

Na opção “Inserir dados dos Barramentos” (Figura 13 - Menu dos Barramentos), tal como o nome da opção indica, serão colocados os dados dos barramentos tais como: o nome, tensão nominal tipo de barramentos (PV, PQ ou ref), o valor do “*Fixed Shunt*” (se existir no barramento), o módulo da tensão no barramento (em pu) e o argumento da tensão (em °).

Nesta página é definida a tensão e a potência de base.

Após o preenchimento desta página, existem três botões de opção para:

- Seguir para o “Menu Principal”;
- Passar à página de inserção dos dados das Linhas;
- Ou sair.

Número	Nome	U _n [kV]	Q _{conv} [MVA]			S _{base} [MVA] U _{base} [kV]	
			Tipo	ou F. Shunt	V [pu]	Arg [°]	100
1	Vermelho	150.0	ref	0.0	1.00	0	
2	Laranja	150.0	PQ	0.0	1.00	0	
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							

1 - Barramentos

Menu Principal

2 - Inserir dados das Linhas

0 - Sair

Figura 13 - Menu dos Barramentos

• Linhas

Neste menu, existe uma tabela para preencher os dados das linhas (Figura 14 - Menu das Linhas). O utilizador terá de introduzir o número do barramento de origem seguido do barramento de destino e seguem-se os valores da impedância Directa Longitudinal (desmembrada em Resistência + Reactância), a Admitância Directa Transversal. As opções extras deste menu, é o utilizador poder “ligar” e “desligar” as linhas sem ter de apagar os respectivos valores quando pretender realizar alguma análise de contingência. Outra opção, é a liberdade de escolha entre introduzir os dados em pu ou nas unidades respectivas (resistência e reactância em Ω e admitância em S [Siemens]).

- **Cargas**

No menu das cargas (Figura 16 - Menu das Cargas) do sistema, existe a opção sobre o barramento onde está inserida a carga, a “ID” (identidade) da carga, pois o utilizador tem a hipótese de poder colocar mais do que uma carga sobre o mesmo barramento, a as potências activa e reactiva das cargas. E por fim existe nesta página a possibilidade “ligar” ou “desligar” a carga do sistema, sem ter de eliminar os dados.

Barramento	ID Carga	Carga		
		P _c [MW]	Q _c [MVAr]	θ - Nbo; 1 - Sim
1	1	100.0	40.0	1
2	1	100.0	40.0	0
3				0
4				0
5				0
6				0
7				0
8				0
9				0
6				0
11				0
12				0
13				0
14				0
15				0
16				0
17				0
18				0
19				0
20				0

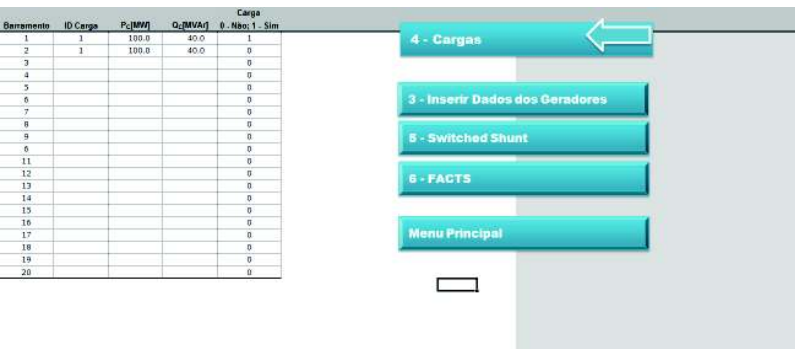



Figura 16 - Menu das Cargas

- **Switched Shunt**

Nesta opção, temos dados do “Switched Shunt” (Figura 17 - Switched Shunt) que é um dispositivo parecido com o “fixed shunt”, apenas diferem no facto deste último ser de valor fixo e o primeiro ser introduzido por escalões conforme a necessidade do sistema.

A primeira opção, o barramento onde o dispositivo será inserido. As duas opções seguintes, serão para determinar a tensão máxima e mínima que o barramento poderá ter sem necessidade de compensação da potência reactiva. As opções que se seguem, existem 3 hipóteses de valores de cargas capacitivas (Q_C [MVAr]) e o número respectivo de baterias por escalão (*Step*). Em seguida existem as mesmas hipóteses mas para cargas indutivas (Q_L [MVAr]). Por fim a opção de “ligar” ou “desligar” o dispositivo.

Barramento	Vhi [pu]	Vlo [pu]	Capacitivo			Indutivo			Switched Shunt ON
			Qc [MVA]	Step	Qc [MVA]	Step	Ql [MVA]	Step	
2	1.05	0.90	20.00	20			-60.00	20	0
									0
									0
									0



6 - Switched Shunt

4 - Cargas

6 - FACTS

Calcular


Menu Principal

Figura 17 - Switched Shunt

- **FACTS**

Este dispositivo, o *FACTS* (Figura 18 - *FACTS (STATCOM)*) permite controlar a tensão no barramento onde está inserido, pelo que tem de se inserir o respectivo número de barramento onde o mesmo se encontra seguido da tensão que o utilizador pretende que este dispositivo imponha no barramento. Seguem-se as hipóteses para as cargas capacitiva e indutivas a atribuir ao dispositivo e tal como nas últimas opções, nesta também existe a possibilidade de “ligar” ou “desligar” o dispositivo.

Barramento	Vobj [pu]	Capacitivo	Indutivo	FACTS
		Qc [MVA]	Ql [MVA]	On/Off
2	1.05	1000	-1000	0
				0
				0



6 - FACTS

5 - Switched Shunt

Calcular

Menu Principal

Sair

Figura 18 - FACTS (STATCOM)

• Resultados

Por último, os resultados dos cálculos (Figura 19 – Tabelas de Resultados). A tabela apresentada com os resultados, incluem o número de iterações para a obtenção do resultado pelo método de Newton-Raphson. Seguem-se as designações dos barramentos com respectivos números tensões (modulo em pu e na unidade e argumento), a geração (dos que têm geração), as cargas (dos que têm cargas) a valores de “*Fixed Shunt*” ou/le “*Switched Shunt*”. Ou seja, as primeiras informações são os dados dos barramentos.

Numa segunda linha, temos o trânsito de potências (activa e reactiva) entre os barramentos, com a emissão de barramento de origem para o de destino e respectivas perdas.

Numa terceira análise, podemos constatar o valor dos escalões do “*Switched Shunt*” quando inserido no sistema e do dispositivo *FACTS (STATCOM)*, também quando inserido no sistema.

Resultado obtido em 3 iterações

Barramento		Tensão		Geração		Carga		F. Shunt	S. Shunt
Nome	Nº	V [pu]	ang [°]	P [MW]	Q [MVA]	P [MW]	Q [MVA]	[MVA]	[MVA]
Vermão	1	1.0000	0.00	90.00	-28.75	90.00	0.00	--	--
Luzito	2	1.0560	-0.27	--	--	--	--	--	--

Barramento		Emissão		Perdas		Barramento		Emissão	
De	Para	P [MW]	Q [MVA]	P [MW]	Q [MVA]	De	Para	P [MW]	Q [MVA]
1	2	0.91	0.00	0.00	0.00	2	1	0.00	0.00

Barramento		Switched Shunt (e=valor das Bases)		FACTS [MVA]	
Step	Q [MVA]	Step	Q [MVA]	Step	Q [MVA]
1	--	--	--	--	--
2	--	--	--	--	--

Jorge Pereira

Cálculo terminado, convergiu em 3 iterações.

OK

Figura 19 – Tabelas de Resultados

