



Dissertação

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Energia e Automação

*Simulação de Fenómenos Transitórios em  
Microrrede*

Filipe Marques Cordeiro

Leiria, março de 2018





Dissertação

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Energia e Automação

*Simulação de Fenómenos Transitórios em  
Microrrede*

Filipe Marques Cordeiro

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Luís Miguel Pires Neves,  
Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, março de 2018



## Dedicatória

*À minha família e amigos, pelo apoio dado.*

*"Não interessa o que se trata de levar a termo:  
o que interessa é perseverar até ao fim."  
(Confúcio)*



# Agradecimentos

Um agradecimento especial à minha esposa, pela paciência que sempre teve durante todo o processo de desenvolvimento desta dissertação. Agradeço-lhe todo o conforto, mesmo nos momentos mais difíceis. Agradeço-lhe também a troca de ideias e de opiniões, oferecendo-me sempre o seu apoio e força, no decorrer de toda a realização deste mestrado. Deu-me o ânimo e o apoio necessário para não me deixar desistir deste longo e trabalhoso processo, ajudando-me a conciliar a vida pessoal, profissional e acadêmica.

Aos meus pais, à minha irmã e ao meu sobrinho, pelo incentivo e apoio dado, compreendendo sempre a minha ausência nos momentos familiares, apoiando-me sempre nos avanços pessoais e profissionais a que me propus.

Aos meus sogros e aos meus cunhados, que sempre me ajudaram psicologicamente para o avanço do meu trabalho e que sempre compreenderam também a minha ausência em momentos familiares.

Ao meu orientador, Professor Doutor Luís Neves, pelo apoio e orientação dado durante todo o desenvolvimento e realização desta dissertação, que foi longo. E agradeço-lhe também a sua disponibilidade e pelas críticas construtivas apresentadas.

Agradeço ainda aos meus amigos, e colegas de curso, principalmente ao Fábio e ao Nelson, que tantas vezes me ouviram e que me acompanharam durante todos este processo de realização do mestrado. Agradeço-lhes também todo o apoio dado, que me ajudou a nunca desistir, apesar de todas as adversidades, fortalecendo o desenrolar do processo.



# Resumo

Atualmente a utilização eficiente de energia é imprescindível para promover a necessidade de estar atento a novas formas de produção, provenientes de fontes endógenas, permitindo assim a redução do consumo de combustíveis fósseis. Os desenvolvimentos diários dessas produções endógenas, ao nível de utilização isolada, ou na concretização do aproveitamento das mesmas para a implementação em redes existentes, traduz uma melhoria no conceito de uma descentralização da produção, levando à necessidade da melhoria das condições de interligação das pequenas produções à rede principal. O conceito de produtor fornecedor, associado a microrredes está implementado, mas não se podem descartar as condições ideais de interligação, bem como a garantia do fornecimento da energia na melhor das condições, não devendo esta, perturbar nem desequilibrar a estabilidade das redes de energia.

As formas de verificação das condições de interligação e de estabilidade, são utilizadas a partir de modelos matemáticos de todos os sistemas de produção, bem como das redes de energia. Para melhoria das formas de análise deste tipo de funcionalidades, a utilização de *softwares* que geram rotinas matemáticas, é fundamental para a verificação em contexto teórico. O software a utilizar nesta dissertação será o ATP com ambiente gráfico ATPDraw, para verificação dos comportamentos ao longo do tempo, incluindo os efeitos transitórios derivados de comutações de cargas, linhas ou redes.

Neste sentido, o objetivo desta dissertação é direcionada para o estudo das variações transitórias em situações de ligação e consignação de sistemas de produção de energia a redes descentralizadas, para funcionar em microrredes. É de igual modo verificada a conversão de energia por fontes renováveis, nomeadamente fotovoltaicos e eólico. O estudo de sistemas eólicos é feito através do acoplamento de máquinas elétricas síncronas e assíncronas, baseadas nos modelos simulados em software, consideradas controláveis a nível de frequência e tensão, melhorando as condições reais de acoplamento e interligação.

**Palavras-chave:** Microrredes de energia, EMTP/ATP, análise de transitórios, máquinas síncronas e assíncronas, sistemas fotovoltaicos e eólicos.



# Abstract

Currently the efficient use of energy is essential to promote the awareness of new forms of production, coming from endogenous sources, allowing the reduction of consumption of fossil fuels. The daily developments of these endogenous productions at the level of isolated use or the achievement of their usage for implementation in existing networks represents an improvement in the concept of a actual decentralized production, leading to the need to improve the conditions for interconnecting small productions to the main network. The concept of supplier producer, associated with microgrids, is implemented, but ideal conditions for of interconnection can't be ruled out, as well as guaranteeing the supply of energy in the best conditions, and this should not disturb or unbalance the stability of energy networks.

The forms for verifying interconnection and stability conditions are applied from mathematical models of all production systems as well as from energy networks. To improve the ways of analysing this type of functionalities, the use of software that generates mathematical routines is fundamental for verification in theoretical context. The software used in this dissertation will be the ATP with ATPDraw graphical environment, to verify behaviours over time, including the transient effects derived from switching loads, lines or networks.

Thus, the objective of this dissertation is directed to the study of transient variations in circumstances of connection and assignment of energy production systems to decentralized networks, to work in microgrids. It is also verified the production of energy by renewable sources, namely photovoltaic, and wind systems. The study of wind systems is done through the coupling of synchronous and asynchronous electric machines, based on simulated software models, considered controllable in terms of frequency and voltage, improving the real conditions of coupling and interconnection.

**Keywords:** Power microgrids, EMTP/ATP, transient analysis, synchronous and asynchronous machines, photovoltaic and wind systems.



# Lista de Figuras

2.1	Representação da produção centralizada vs produção distribuída [1]. . . . .	6
2.2	a)Previsão de consumo de energia 2040, escala quatrilhão BTU[2]. b)Previsão de produção de energia com base renovável, escala bilhões kWh[3]. . . . .	7
2.3	Interligação de cenários de produção sustentável numa microrrede [4]. . . . .	10
2.4	Arquitetura de uma Microrrede EU[5]. . . . .	11
2.5	Arquitetura tipo de uma microrrede CERTS [5]. . . . .	12
2.6	Arquitetura tipo de uma microrrede EU com MGCC [5]. . . . .	13
2.7	Controlo da energia reativa com regulação da tensão. . . . .	14
2.8	Controlo da energia ativa com regulação da velocidade angular. . . . .	15
2.9	Diretrizes da norma IEEE 1547 [6]. . . . .	18
3.1	Representação de parâmetros distribuídos. . . . .	24
3.2	Circuito equivalente de representação de linha com parâmetros distribuídos. . . . .	25
3.3	Parâmetros das linhas em ATPDraw. . . . .	26
3.4	Comparação de transitórios simulados em PI vs Parâmetros Distribuídos	29
3.5	Tipologias de turbinas eólicas e respetivas interligações [7]. . . . .	30
3.6	Diagrama de simulação do vento em ATP. . . . .	33
3.7	Velocidade final do vento após aplicação das perturbações. . . . .	34
3.8	Estrutura global do modelo dos ventos e da potência e binário mecânico em ATPDraw. . . . .	36
3.9	Representação da Potência Mecânica vs Binário Mecânico. . . . .	37
3.10	Estrutura global de uma célula fotovoltaica[8]. . . . .	38
3.11	Simulação de célula fotovoltaica em ATP. . . . .	39
3.12	Representação gráfica de uma variação da incidência numa célula fotovoltaica em ATP. . . . .	40
3.13	Conversor AC-DC e Inversor DC-AC . . . . .	40
3.14	Estrutura global simulação conversor AC-DC-AC em ATPDraw. . . . .	41
3.15	Simulação gráfica: ENTRADA - CONVERSÃO - RETIFICAÇÃO - SAÍDA. . . . .	42
3.16	Máquina síncrona - tipologia elétrica [9]. . . . .	43
3.17	Estrutura global máquina síncrona [10]. . . . .	45
3.18	Sistema de controlo de excitação - Máquina Síncrona [11]. . . . .	46

3.19	Simulação controlo tensão em ATPDraw. . . . .	46
3.20	Simulação gráfica controlo AVR. . . . .	47
3.21	Ajuste da frequência da rede [12]. . . . .	47
3.22	Simulação gráfica de controlo da frequência. . . . .	48
3.23	Sistema de controlo de potência mecânica/binário. . . . .	49
3.24	Controlo proporcional de binário . . . . .	49
3.25	Estrutura global máquina assíncrona [10]. . . . .	50
3.26	Máquina assíncrona - tipologia elétrica [13]. . . . .	50
3.27	Representação de uma máquina assíncrona em ATPDraw, como modelo Windsyn. . . . .	52
3.28	Simulação gráfica energia - máquina assíncrona - ATP. . . . .	52
4.1	Diagrama de distribuição da rede IEEE de 30 barramentos. . . . .	54
4.2	Modelação da rede IEEE 30 Barramentos em ATP. . . . .	55
4.3	Introdução de fontes iniciais, pré-isolamento. . . . .	56
4.4	Estabilidade inicial - PowerWorld. . . . .	58
4.5	Funcionamento com a sub-rede isolada - PowerWorld. . . . .	58
4.6	Funcionamento da rede IEEE 30 Barramentos em microrrede. . . . .	59
4.7	Rede IEEE-30 com a possibilidade de usar fontes ideais ou modelos de geradores, dependendo da definição de comutação dos disjuntores associados. . . . .	60
4.8	Tensões de barramentos com a introdução de fontes síncronas. . . . .	61
4.9	Interligação de máquina síncrona no barramento 22. . . . .	62
4.10	Potências injetadas no barramento 21 e 22 em simulação. . . . .	62
4.11	Desequilíbrios por não existir controlo da frequência. . . . .	63
4.12	Frequência no barramento 14 e 22 em transitórios. . . . .	64
4.13	Tensões nos barramentos 14 e 21 em transitórios. . . . .	64
4.14	Interligação da máquina assíncrona à microrrede. . . . .	65
4.15	Tensão nos barramentos 14 e 21 com ligação de máquina assíncrona. . . . .	66
4.16	Frequência da microrrede vista no barramento 14. . . . .	67
4.17	Débito de potências fornecidas pelo gerador de apoio da máquina assín- crona. . . . .	67
4.18	Débito de potências fornecidas pela máquina assíncrona. . . . .	68

# Lista de Tabelas

2.1	Benefícios e impactos da geração distribuída. . . . .	9
3.1	Modelação de linhas de transmissão [14] [15]. . . . .	24
3.2	Matriz de transformação - Clarke . . . . .	27
3.3	Matriz de diagonal - Clarke . . . . .	27
3.4	Valores angulares $\alpha_{ij}$ da máquina síncrona de ímanes permanentes [9]. . . . .	44
4.1	Explicação da figura 4.3. . . . .	57
4.2	Explicação da figura 4.6. . . . .	59
4.3	Valores de tensões em situação transitória referente à figura 4.13. . . . .	63
A.1	Barramentos IEEE - 30 barramentos . . . . .	79
A.2	Linhas IEEE - 30 barramentos . . . . .	80



# Lista de Siglas

AC	-	<i>Alternating Current</i>
AEP	-	<i>American Electric Power</i>
ATP	-	<i>Alternative Transients Program</i>
AVR	-	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
BPA	-	<i>Boneville Power Administration</i>
BTU	-	<i>British Thermal Unit</i>
CDF	-	<i>Common Data Format</i>
CERTS	-	<i>Consortium for Electric Reliability Technology Solutions</i>
CO2	-	Dióxido de Carbono
DC	-	<i>Direct Current</i>
DG	-	<i>Distributed Generation</i>
DMG	-	<i>Distribution Management System</i>
EMTP	-	<i>Eletromagnetic Transient Program</i>
FP	-	<i>Framework Programmes</i>
IEA	-	<i>International Energy Agency</i>
IEEE	-	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MGCC	-	<i>Microgrid Central Controller</i>
PSS	-	<i>Power System Stabiliser</i>
PU	-	Por Unidade
PWM	-	<i>Pulse-Width Modulation</i>
MT	-	Média Tensão
TACS	-	<i>Transient Analysis of Control Systems</i>
TNA	-	<i>Transient Network Analyser</i>
SEE	-	Sistema Elétrico de Energia
SI	-	Sistema Internacional de Unidades



# Conteúdo

Dedicatória	III
Agradecimentos	V
Resumo	VII
Abstract	IX
Lista de Figuras	XII
Lista de Tabelas	XIII
Lista de Siglas	XV
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Estado-da-arte</b>	<b>5</b>
2.1 Geração de energia . . . . .	5
2.1.1 Formas de geração e distribuição de energia . . . . .	5
2.1.2 Geração Distribuída e as suas vantagens . . . . .	8
2.2 Microrrede de energia . . . . .	9
2.2.1 Constituição de uma microrrede . . . . .	10
2.2.2 Modos de controlo de uma microrrede . . . . .	12
2.2.3 Microrrede e segurança na interligação . . . . .	15
2.3 Simuladores de sistemas de energia . . . . .	20
<b>3 Modelação de uma microrrede</b>	<b>23</b>
3.1 Redes de energia . . . . .	23
3.1.1 Linhas de transmissão - parâmetros distribuídos . . . . .	23
3.1.2 Transformação de Clarke aplicado à verificação de transitórios . . . . .	25
3.2 Sistemas de conversão primária de energia . . . . .	29
3.2.1 Sistemas eólicos . . . . .	30
3.2.2 Sistema fotovoltaico . . . . .	37
3.3 Conversores eletrónicos de energia . . . . .	39
3.4 Modelação de uma máquina síncrona . . . . .	41
3.4.1 Máquina síncrona - Controlo AVR . . . . .	45
3.5 Modelação de um máquina assíncrona . . . . .	49
<b>4 Análise de microrredes interligadas e isoladas</b>	<b>53</b>
4.1 Modelação de uma rede de distribuição . . . . .	54
4.2 Rede interligada . . . . .	56
4.3 Rede isolada . . . . .	57
4.4 Simulação de rede com modelos de máquinas síncronas . . . . .	59

4.5	Rede isolada com gerador assíncrono . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Conclusões e trabalho futuro</b>	<b>69</b>
5.1	Conclusões . . . . .	69
5.2	Propostas de trabalho futuro . . . . .	70
	<b>Bibliografia</b>	<b>73</b>
<b>A</b>	<b>Rede IEEE-30</b>	<b>79</b>
A.1	IEEE-30 - Barramentos . . . . .	79
A.2	IEEE 30 - Linhas . . . . .	80
<b>B</b>	<b>Códigos fonte de modelos em ATP</b>	<b>81</b>
B.1	Modelo de simulação do vento . . . . .	81
B.2	Modelo de simulação do vento . . . . .	83
B.3	Modelo de controlo de frequência para máquina síncrona . . . . .	85

# Capítulo 1

## Introdução

A preocupação crescente com as alterações climáticas tem como consequência uma maior procura de soluções que permitam reduzir a emissão de gases de efeito de estufa, nomeadamente de CO<sub>2</sub>, através da redução do uso de combustíveis fósseis, entre os quais o petróleo, o carvão e o gás natural. A implementação de medidas, ou tentativa de colocar em prática algumas medidas para redução de consumo de energia proveniente de fontes de energia fóssil, leva à aplicação de medidas de incentivo e promoção de utilização de energias renováveis e aumento da eficiência no sistema e nos usos finais de energia.

Com base em grandes objetivos a União Europeia, representada pelo Parlamento Europeu, como elemento de ligação entre os estados membros, propõe metas ao nível da produção de energia, proveniente de energias renováveis, sendo a mais recente a que pretende que até 2030, o consumo de energia renovável seja superior a 35%, do consumo total de energia <sup>1</sup>.

No contexto da procura do aumento da eficiência energética, e do aumento da penetração de energias renováveis, é necessário alterar o paradigma de planeamento e operação das redes elétricas, que deverão ganhar flexibilidade de forma a melhor se adaptarem às características específicas das novas formas de produção e consumo. Neste âmbito, vários investigadores têm vindo a propor uma reorganização do sistema elétrico, introduzindo o conceito de microrredes como formas de permitir a gestão isolada de partes da rede que possam por essa via melhor se adaptar às variações decorrentes da variabilidade das fontes e outros fenómenos, procurando contribuir para uma maior resiliência do sistema como um todo. .

Devido ao aumento das necessidades de implementação de sistemas controlados de

---

<sup>1</sup><http://www.europarl.europa.eu/portal/pt>

alimentação de energia, provenientes de sistemas isolados de produção com inserção à rede [16], é exigida a necessidade de verificar se as redes de energia e sistemas existentes, garantem a capacidade de aguentar a sua auto-sustentabilidade, em casos de existência única e simplesmente de sistemas isolados de produção, denominadas de microrredes [17].

Com a evolução de softwares computacionais, que ajudam a implementação de sistemas e rotinas matemáticas de elevada complexidade, as implementações podem ser simuladas de forma mais simples. A forma de implementação, com grande potencialidade de gestão, simula comportamentos de redes de distribuição em regime estacionário e os mesmos efeitos em regimes transitórios, ou seja, verificações de compatibilidades e estabilidades nas linhas de distribuição, de transporte ou mesmo em interligações de sistemas de produção descentralizada, como as unidades de micro-produção.

O software de simulação *Alternative Transients Program* (ATP), versão de domínio público do *Eletromagnetic Transient Program* (EMTP), e o ATPDraw, [18] são ferramentas de elevada potencialidade para o desenvolvimento de simulações de redes de energia elétrica, contendo inúmeros modelos, muito validados, dos diversos elementos que compõem o sistema, e possuindo a capacidade de introdução de novos modelos, assim como blocos de controlo, permitindo desta forma simular um grande número de fenómenos, com um elevado grau de confiabilidade.

Os objetivos essenciais desta dissertação, serão assim testar de forma simulada o funcionamento de microrredes e os fenómenos decorrentes das suas manobras de interligação com a rede, permitindo também adquirir uma experiência muito importante no uso deste tipo de ferramenta de apoio.

De forma a interpretar a organização deste trabalho, verifica-se para além deste capítulo introdutório, um total de cinco capítulos, com o desenvolvimento do trabalho elaborado. No capítulo 2 serão abordadas as formas de gestão de energia, nomeadamente ao nível da produção e da distribuição, incluindo os dois tipos fundamentais, a geração centralizada e distribuída, e serão descritos os tipos de microrredes e os controlos aplicáveis ao nível da gestão e da sua interligação, focando as normas aplicáveis. O capítulo 3, aborda as formas de modelação de uma microrrede, realçando a base para implementação em sistemas de simulação, procurando desenvolver as bases teóricas de transporte e distribuição de energia, e serão interpretados os modelos de sistemas fotovoltaicos de produção de energia e os sistemas eólicos, interligados mecanicamente a máquinas elétricas síncronas e assíncronas, para produção de energia. No capítulo 4 será feita a descrição de todos os sistemas simulados, incluindo interligações, e a forma

de os modelar em ATP. Neste capítulo serão também demonstrados os resultados das simulações, apresentando os resultados obtidos na interligação de sistemas, focando alterações ou estabilidades transitórias na rede elétrica estudada. No capítulo 5, são descritas conclusões do trabalho desenvolvido.



# Capítulo 2

## Estado-da-arte

### 2.1 Geração de energia

Atualmente existe uma crescente alteração da forma de exploração do Sistema Elétrico de Energia, tanto ao nível da produção como da sua distribuição. A típica produção centralizada, está a ser substituída através da pequena geração disseminada pela rede, definida como geração distribuída. A geração distribuída é constituída por produções localizadas mais próximo dos respetivos consumidores, que pode trazer vantagens nomeadamente ao nível das perdas, podendo ainda ter a possibilidade de pequenas partes da rede funcionar de forma isolada, resistindo melhor a eventuais fenómenos adversos, mas não obstante como desvantagens a existência de fluxos invertidos, comprometendo o funcionamento das proteções [19].

A injeção máxima admissível a realizar por sistemas endógenos, em redes de geração distribuída, segundo a IEA poderá estar compreendida entre os 10 e os 250kW. Segundo o IEEE a introdução máxima poderá ir de alguns kW até vários MW [20]. As potências associadas neste tipo de tipologia, por exemplo em sistemas solares fotovoltaicos, centraliza-se a partir de 1 kW, de forma a alimentar redes e cargas locais ou partes de uma determinada rede [21].

#### 2.1.1 Formas de geração e distribuição de energia

A realidade da implementação de redes com acoplamento de sistemas de geração distribuída, também denominada por dispersa, descentralizada ou embebida, foi estudada de forma a dar resposta às necessidades de fazer chegar energia elétrica às zonas mais

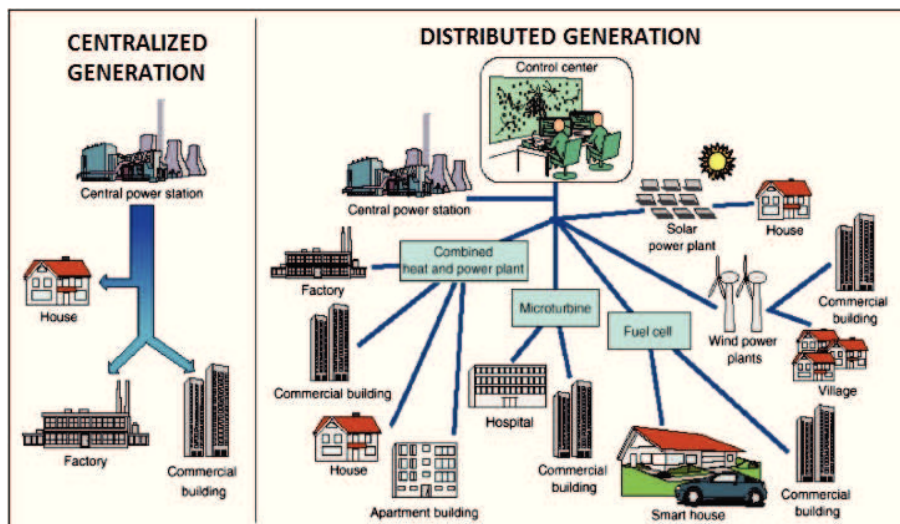


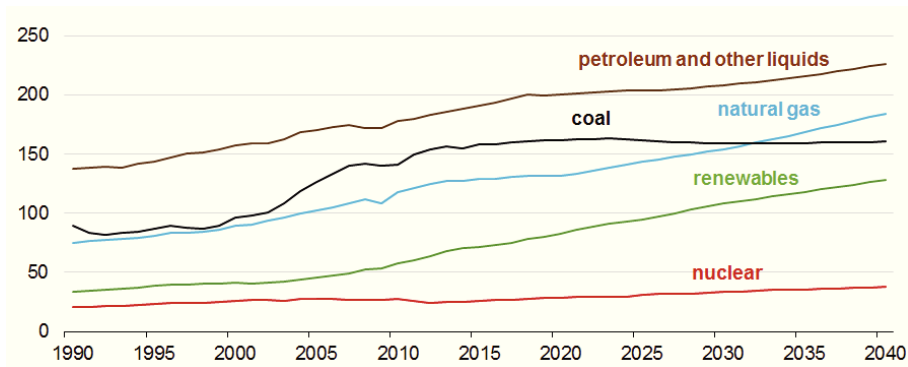
Figura 2.1: Representação da produção centralizada vs produção distribuída [1].

rurais ou zonas mais dispersas, onde as redes de energia elétrica não chegava ou era definida como não vantajoso, motivado pelos elevados custos de implementação. Com a melhoria da tecnologia e a crescente eficiência das redes de distribuição de energia, bem como os investimentos em melhores formas de transporte de energia elétrica, nomeadamente pelo aumento dos níveis de tensão nas redes de transporte, manteve-se a geração centralizada como forma geral de distribuição de energia. Não obstante, a produção descentralizada não deixou de ser um fenómeno crescente, proporcionado pelas técnicas de controlo de interligação, que serão descritas nos capítulos 2.2.1 e 2.2.2.

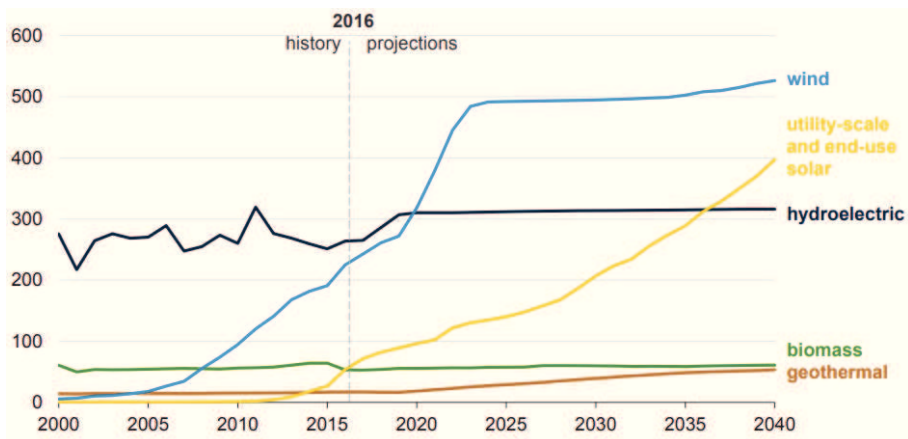
Na figura 2.1, verifica-se um esquemático das formas das redes, de geração centralizada e de geração distribuída. A geração centralizada poderá ter interligada nas redes de transporte ou nas redes de distribuição, sistemas de geração distribuída. Desta forma no contexto global existe a possibilidade de interligação de novas fontes de energia ao longo dos seus percursos, reduzindo perdas na distribuição e aumentando a fiabilidade no abastecimento.

Com o aumento da escassez de produtos com base em consumíveis fósseis, nomeadamente petróleo e carvão, foi necessário pesquisar novas formas de produção de energia, tanto pela escassez dos recursos, bem como pelo aumento crescente das necessidades e dos consumos de energia.

Na figura 2.2 podem-se verificar as perspectivas de consumo de energia e as estatísticas das formas de distribuição da produção, comparativamente à procura. Pela análise pode concluir-se que a procura irá continuar a aumentar, mas que se pretende uma estabilização da produção com recurso a combustíveis fósseis, como o petróleo e o



a)



b)

Figura 2.2: a)Previsão de consumo de energia 2040, escala quadrilhão BTU[2]. b)Previsão de produção de energia com base renovável, escala bilhões kWh[3].

carvão. É ainda evidente, que as energias renováveis terão que ser a forte aposta, para colmatar as necessidades de consumo, sendo estimado um aumento significativo nos próximos 25 anos, tal como anteriormente referido e validado na perspectiva da União Europeia. Neste sentido, a investigação e a implementação de investimentos em eficiência energética ao nível das energias renováveis, permitirá uma redução de consumo de energia primária, reduzindo dessa forma a dependência de combustíveis fósseis [22].

Numa análise das previsões da produção por base da energia renovável e a sua previsão de procura da energia elétrica 2.2, os sistemas de aproveitamento hidroelétrico, biomassa e geotérmico tende a manter a sua tendência atual. Se compararmos, podemos verificar que os sistemas eólicos, atualmente estão em elevada expansão, possivelmente por incentivos criados para a implementação dos mesmos, desejando-se se sejam crescentes até 2023. A nível de destaque está o aproveitamento com base no sol ou incidência solar, que com a melhoria das técnicas de fabrico e redução de custos de aplicação, levam a que sejam os sistemas que mais prosperem nesta previsão a longo prazo, próximos 20 anos.

## 2.1.2 Geração Distribuída e as suas vantagens

A implementação de sistemas de geração distribuída, deverá ter em conta diversos aspetos contemplando como principais, as necessidades efetivas da sua implementação em determinados sistemas, ou que mais valias poderá trazer ao sistema energético, na sua operacionalidade, na qualidade e na segurança de abastecimento. A nível de vantagens gerais poderá verificar-se na tabela resumo 2.1 <sup>1</sup>, quais os impactos na redução das potências de ponta, na segurança de abastecimento, ou mesmo em situações de emergência aquando da necessidade de as microrredes trabalharem de forma isolada, ou desacopladas da rede geral.

A implementação de geração distribuída pode ser aplicável em situações específicas, contabilizando sempre a sua viabilidade financeira e económica[23]. As aplicabilidades iniciais de implementação foram em locais isolados, evitando investimentos muito significativos e problemas logísticos para se levar energia elétrica a esses pontos. A mesma inviabilidade económica também se verifica na necessidade de reforço de certas linhas de distribuição e de transporte, motivado pela necessidade de novas cargas. A aplicabilidade de uma geração descentralizada poderá ser mais económica, devido à criação de pontos de alimentação perto das necessidades de consumo, reduzindo os custos na distribuição, que por vezes, são exageradamente altos, trazendo a própria produção descentralizada, melhorias em termos da fiabilidade dos sistemas de energia elétrica.

Ao observar um sistema de produção e distribuição de energia de forma centralizada, e ao ser aplicada a injeção de energia em algum ponto dessa rede, poderemos ter benefícios tais como:

- Aumento da fiabilidade do sistema energético;
- Redução de investimentos face ao aumento de novas centrais centralizadas e respetivos reforços de linhas de distribuição;
- Melhoria da qualidade da energia, motivado pelo conceito "produção mais próxima do consumo, reduz as perdas de energia";
- Maior facilidade para colmatar necessidades de ponta ou emergência;
- Redução do impacto visual das grandes distribuições, colocando pequenas produções que mais facilmente são enquadráveis na paisagem ou nas zonas rurais.

---

<sup>1</sup>[http://www.hamyaraval.ir/Solutions/hamyaraval\\_distributed\\_generation/index.html](http://www.hamyaraval.ir/Solutions/hamyaraval_distributed_generation/index.html)

Tabela 2.1: Benefícios e impactos da geração distribuída.

		BENEFIT CATEGORIES							
		Energy Cost Savings	Savings in Transmission and Distribution Losses and Congestion Costs	Deferred Generation Capacity	Deferred Transmission and Distribution Capacity	System Reliability Benefits	Power Quality Benefits	Land Use Effects	Reduced Vulnerability to Terrorism
<i>DG Services</i>	Reduction in Peak Power Requirements	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Provision of Ancillary Services: - Operation Reserves - Regulation - Blackstart - Reactive Power	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Emergency Power Supply	✓	✓			✓	✓		

## 2.2 Microrrede de energia

As microrredes são sistemas de fornecimento de energia elétrica, interligadas de forma sincronizada com redes de distribuição ou simplesmente isoladas, funcionando de forma autónoma, em conceito de geração distribuída. O conceito de microrrede torna os sistemas elétricos de energia mais eficientes, proporcionado pelas menores perdas elétricas, em caso de comparação com as redes de distribuição centralizada. Ao existir uma produção mais próxima da sua utilização, é facultada uma redução das emissões de gases de efeito de estufa, motivado pela redução da produção através das centrais consideradas convencionais, carvão, gás natural e petróleo, já que a maioria das microrredes de produção centralizada são provenientes de energias ou materiais endógenos, renováveis. A estabilidade de um sistema energético poderá ser colmatado por microrredes em caso de falha do sistema principal de abastecimento. A microrrede poderá trabalhar de forma isolada, desde que garantidas as mesmas condições de equilíbrio da rede principal, não colocando em risco a qualidade de abastecimento dos consumidores locais, rurais ou urbanos. A figura 2.3 representa um exemplo de uma pequena rede de energia com exemplos de algumas possíveis interligações em pontos específicos de produção de energia.

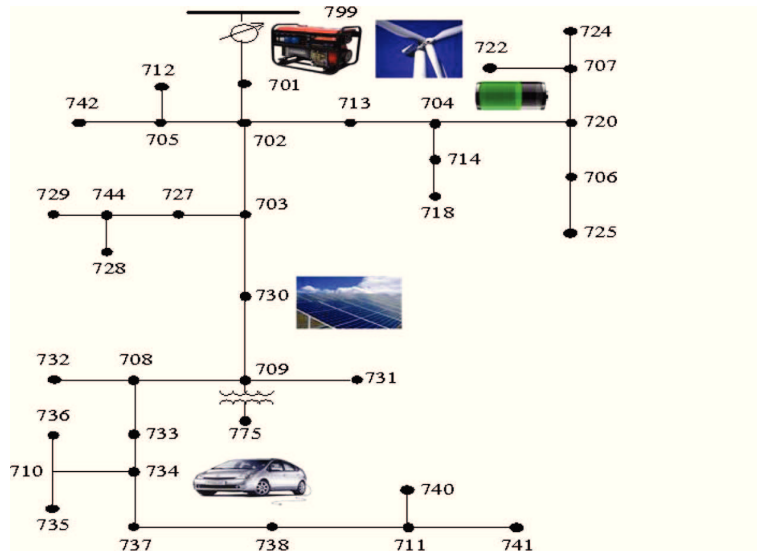


Figura 2.3: Interligação de cenários de produção sustentável numa microrrede [4].

## 2.2.1 Constituição de uma microrrede

De acordo com projetos recentes [24], a estrutura funcional de uma microrrede deve ser gerida por um sistema de controlo central, denominado por *microgrid central controller* (MGCC), sendo proposta uma estrutura hierárquica de controlo. Os elementos mais importantes da MGCC deverão ser instalados do lado da baixa tensão, local onde a microrrede faz a interligação com a rede de Média Tensão, reforçando a gestão das operações tanto de forma técnica como económica. Em segundo nível hierárquico, é aplicado o MGCC do lado da micro-geração, controlando a produção e os respetivos armazenamentos, quando existentes. Por último, o MGCC é aplicado às cargas ou possíveis cargas que poderão estar ligadas à rede. Na figura 2.4 está representada uma microrrede tipo, com os locais de aplicação de MGCC's.

Os MGCC's têm uma rede de comunicação associada, para controlo das microrredes e das cargas, monitorizando dessa forma os níveis de consumo, e promovendo um antecipar da necessidade de consumo de cargas, em concordância com a produção necessária, não só em produção contínua ou intermitente, em sistemas eólicos, fotovoltaicos, entre outros [25]. A comunicação entre o MGCC e um *Distribution Management System* (DMG) [26], realizada pelo lado do operador, é gerida de forma a ter as previsões históricas e reais das necessidades da rede de distribuição, promovendo uma boa operacionalidade entre os intervenientes, tanto de produção, como de distribuição ou despacho elétrico, promovendo facilidades de operacionalidade e diversidade de controlo, reduzindo custos de operação e aumentando a segurança.

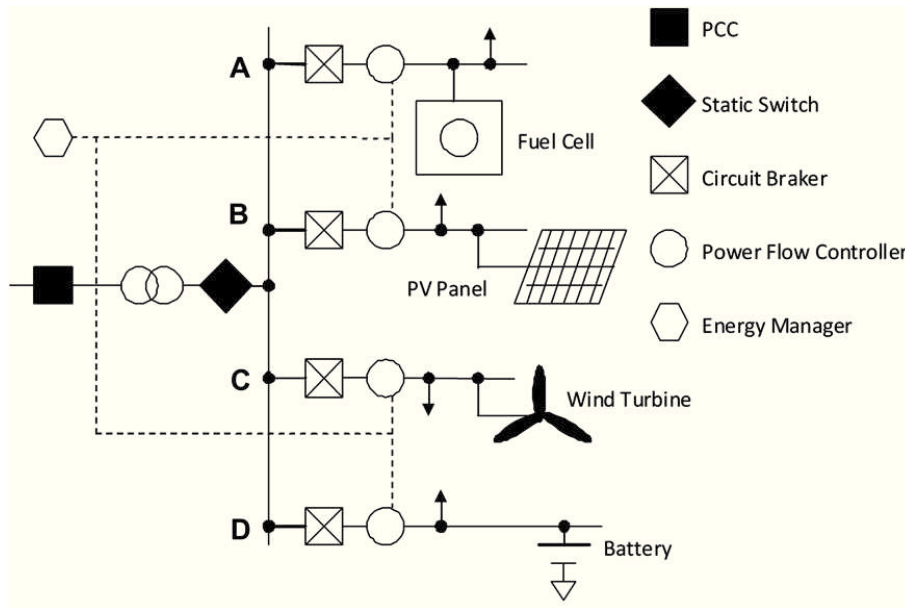


Figura 2.4: Arquitetura de uma Microrrede EU[5].

O sistema DMG apoia os operadores e controladores do despacho elétrico, na distribuição de energia, coordenando sempre a sua necessidade com as efetivas no sistemas, através dos diagramas das cargas e das necessidades eminentes, garantindo fiabilidade e eficiência.

As microrredes, podem funcionar em dois modos distintos, podendo ser definidos da seguinte forma:

- **Modo de interligação normal:** a microrrede está conectada a uma rede principal de Média Tensão, fornecendo ou consumindo energia da rede, dependendo da produção própria e das necessidades instantâneas.
- **Modo de interligação de emergência:** a microrrede opera de forma autónoma da rede principal. Esta poderá ser desligada da rede de Média Tensão (MT) por anomalia ou por necessidades de intervenção na microrrede em questão. Esta rede poderá funcionar de forma isolada normalmente, mas desconectada da rede principal, assegurando a alimentação das cargas nela associadas, garantindo a estabilidade e a monitorização efetuada pela MGCC [27].

Na ótica de um outro tipo de controlo existe o implementado pelo *Consortium for Electric Reliability Technology Solutions* (CERTS) o qual propõe um ilimitado número de micro-produções ligadas à rede principal de distribuição da rede elétrica [28]. O tipo de instalação permite interligações de produção autónoma até 2MW [5], reduzindo os custos de controlo e de monitorização.

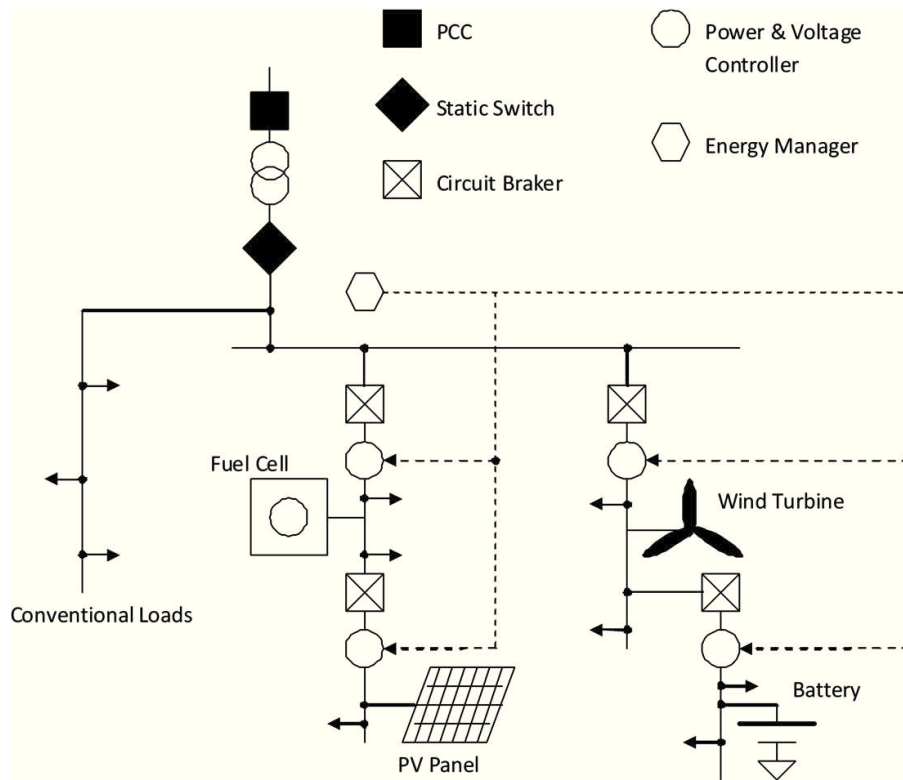


Figura 2.5: Arquitetura tipo de uma microrrede CERTS [5].

Nas microrredes com conceito CERTS, as interligações são controladas localmente através de inversores e controladores reguladores, sendo equipamentos normalizados que funcionam todos do mesmo modo, independentemente da marca ou modelo. A vantagem relativa à microrrede típica europeia com controlo MGCC, define-se pela exclusão da necessidade de uma monitorização constante por parte do MGCC, sendo apenas definido o seu funcionamento e quando é que é ligado e em que condições.

### 2.2.2 Modos de controlo de uma microrrede

Numa microrrede podem existir dois tipos de unidades de produção, quanto às características das grandezas elétricas produzidas. Os painéis fotovoltaicos e as pilhas de combustível geram corrente contínua (DC) e os geradores rotativos, normalmente associados a turbinas eólicas, hidráulicas ou a máquinas térmicas, geram normalmente corrente alternada (AC).

Conforme se pode verificar na figura 2.6, as fontes geradoras de energia, em DC são convertidas em AC, as fontes de produção em AC, são convertidas em DC e novamente em AC, de modo a controlar os parâmetros de inserção na rede.

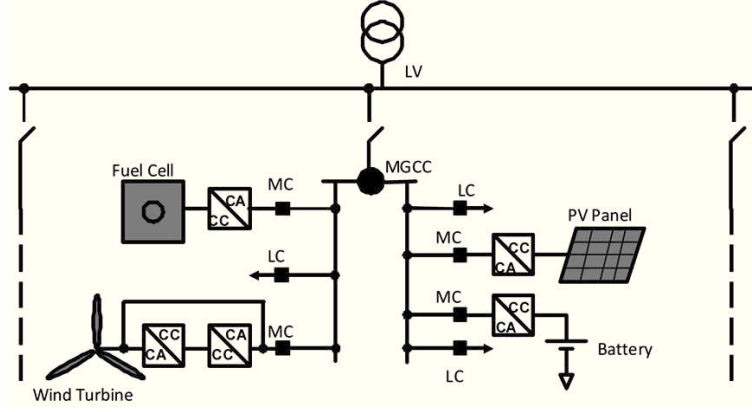


Figura 2.6: Arquitetura tipo de uma microrrede EU com MGCC [5].

Conforme a referência [5] a conversão DC-AC, é normalmente efetuada por um inversor fonte-de-tensão, que faz a interligação à rede principal através de uma indutância, de forma a manter a tensão aos seus terminais constante. Esse conversor é responsável pelo controlo da fase e da amplitude da tensão de saída (V).

De forma a esquematizar essa forma de regulação dos valores a injetar na rede, a sua caracterização poderá ser dada pela dedução das equações 2.1,2.2,2.3.

$$P = \frac{3VE}{2X} \sin \delta_p \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{3V}{2X} (V - E \cos \delta_p) \quad (2.2)$$

$$\delta_P = \delta_V - \delta_E \quad (2.3)$$

Na interpretação das equações, 2.3 o  $\delta_V$  e o  $\delta_E$  representam a variação de ângulo das tensões fase-neutro V e E, aqui representadas em amplitude. Por atribuição, P depende diretamente de  $\delta_P$ , corrigindo pequenas variações, sendo Q diretamente dependente da amplitude da tensão V, conforme as equações 2.1 e 2.2.

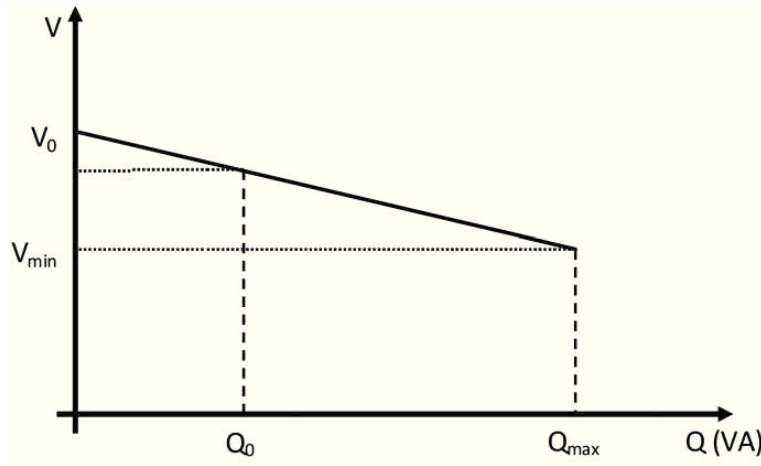


Figura 2.7: Controlo da energia reativa com regulação da tensão.

### 2.2.2.1 Controlo de tensão e energia reativa

Num sistema de produção e transporte de energia, o controlo do fluxo de energia reativa é imprescindível [29]. Em sistemas de micro-geração associado a microrredes, existe a necessidade de controlo da energia reativa em circulação, através da regulação da tensão, devido à dimensão das redes que não permitem um elevado trânsito de energia reativa, tendo que ser utilizada a existente na microrrede, provocando a necessidade de existir um controlo mais apertado. Essa regulação é ilustrada por intermédio de um sistema gráfico em rampa, com declive, que representa os parâmetros que demonstram o sistema de controlo. Ou seja, se a potência reativa aumentar, a tensão deverá reduzir, e se a potência reativa diminuir, a tensão terá que subir. Desta forma, poderá atribuir-se a explicação da figura 2.7 à equação 2.4.

$$V - V_0 = -k_q(Q - Q_0) \quad (2.4)$$

### 2.2.2.2 Controlo da frequência e energia ativa

Nos sistemas de microrredes com geradores assíncronos ou síncronos, existe a necessidade de reduzir as variações de frequência, consequência das alterações de potência, e por variações do binário resistente das máquinas primárias. Para tal, é necessário efetuar o controlo da frequência angular do respetivo gerador, através do controlo da variação da potência ativa da máquina. De forma a reverter um abaixamento da frequência, ou uma elevação da mesma, é necessário impor um controlo para ajuste da potência das máquinas primárias, de forma a regressar aos valores da frequência

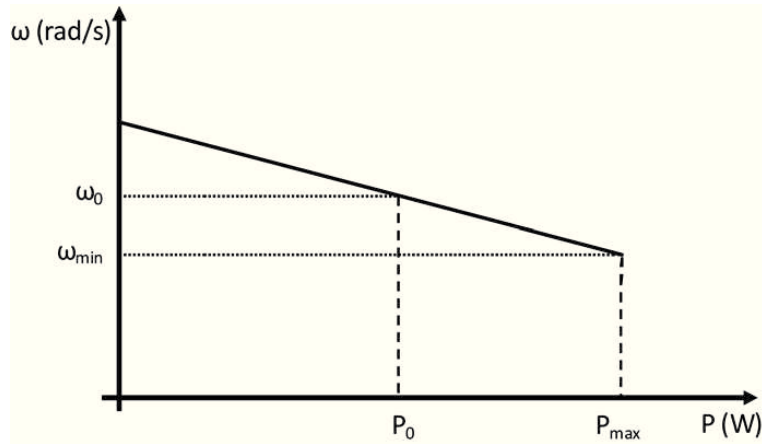


Figura 2.8: Controlo da energia ativa com regulação da velocidade angular.

iniciais. A conversão segue uma relação linear, como a representada na figura 2.8 e pela equação 2.5.

Os sistemas de microrredes poderão funcionar em modo interligado com uma rede principal, ou por motivos de exploração ou de avaria ou de consignação e poderão trabalhar isoladamente. Ao entrar em modo de funcionamento isolado, poderá sofrer uma instabilidade, variando a frequência, motivado pelo desacoplamento de cargas da rede principal, ou por acondicionamento do trânsito de potência na própria microrrede, o que poderá provocar um abaixamento da frequência, no caso de existirem muitas cargas ligadas, ou um aumento caso a geração atual seja muito superior ao consumo, surgindo transitórios até à estabilização, se for o caso [30].

$$\omega - \omega_0 = -k_p(P - P_0) \quad (2.5)$$

### 2.2.3 Microrrede e segurança na interligação

O modo de operação generalizado de uma microrrede, de funcionamento isolado ou interligado, com ou sem micro-geração associada, tem regras definidas para a sua estabilidade e monitorização, conforme descrito nas referências [31] e [32]. Os autores em questão abordam as formas de controlo das redes, bem como as hierarquias seguidas para gestão e interligação das rede energéticas.

A título bibliográfico, a interligação de redes está normalizada por intermédio de regras técnicas elaboradas pelo IEEE, seguidas nos Estados Unidos. Na Europa segue

normas relevantes dadas pelo IEC (EIC-Comité Internacional Eletrotécnico).

A normalização da interligação de redes, nos Estados Unidos, está definido na normativa IEEE 1547 denominada por IEEE *Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems* [33], com implementação nos sistemas elétricos de energia dos Estados Unidos. Esta norma define requisitos técnicos e especificações técnicas sobre a interligação de sistemas de energia, focando-se a nível de condições de segurança e manutenção, aplicados aos locais onde os pontos de interligação forem definidos. Essa mesma norma verifica e desenvolve testes de operacionalidade, bem como requisitos de teste de desenvolvimento em projeto e formas de produção e consignações das interconexões no Sistema Elétrico de Energia (SEE). A base de enquadramento para o estudo a desenvolver neste trabalho inclui máquinas geradoras de energia, síncronas e assíncronas, e respetivos conversores de energia de fontes primárias. Atualmente esta norma, que se encontra sempre em desenvolvimento e em constante atualização, é definida pela expansão de oito diretrizes provenientes da norma principal, de forma a esclarecer os modelos atuais, possibilitando a análise e o estudo das mesmas, de forma direcionada. Seguidamente apresenta-se uma breve análise sobre cada diretriz, podendo ser verificado na figura 2.9, as respetivas séries de interconexão e as suas variantes de implementação [6]<sup>2</sup>.

- IEEE 1547.1-2005/IEEE 1547.1a-2015 (*IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*) - Procedimentos para teste de conformidade e de avaliação. A norma define o tipo de testes, a forma de produção e as regras para demonstrar que a interligação está de acordo com a norma principal, IEEE 1547. A atualização de 2005 define os testes de tensão e a forma de regulação por intermédio da frequência.
- IEEE 1547.2-2008 (*IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*) - Define detalhes técnicos sobre a forma de interpretação da norma principal, aplicada à implementação da interligação das redes.
- IEEE 1547.3-2007 (*Guide For Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems*) - Esta norma fornece diretrizes de formas de monitorizar as redes e a respetiva ligação. Faz também a avaliação da gestão dos recursos da interconexão dos sistemas de energia elétrica.

---

<sup>2</sup><http://grouper.ieee.org/groups/>

- IEEE 1547.4-2011 (*Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems*) - Este documento fornece as normas das boas práticas para a elaboração do projeto e da operacionalidade da interligação das microrredes. Analisa as formas de estudo da ligação e consignação de partes do sistema da rede isolada de energia.
- IEEE 1547.5-2015 (*Draft Technical Guidelines for Interconnection of Electric Power Sources Greater than 10MVA to the Power Transmission Grid*) - A definição da arquitetura e da construção efetiva é fornecida nesta norma, bem como as formas físicas de interligação e respetivos requisitos de manutenção. Esta norma apresenta diretrizes para o despacho elétrico de redes, a interligar fontes de elevada capacidade, até 10MVA de interligação.
- IEEE 1547.6-2011 (*Recommended Practice For Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems Distribution Secondary Networks*) - Define recomendações para a interligação de redes de geração distribuída a interligar em redes secundárias de distribuição.
- IEEE 1547.-7-2013 (*Draft Guide to Conducting Distribution Impact Studies for Distributed Resource Interconnection*) - Este modelo define metodologias para a elaboração de estudos e projetos que estudem o potencial dos impactos da incorporação de microrredes de geração distribuída em redes de energia de geração centralizada, focando-se nas formas de redução do impacto e da instabilidade aquando a interligação.
- IEEE 1547.8 (*Recommended Practice for Establishing Methods and Procedures that Provide Supplemental Support for Implementation Strategies for Expanded Use of IEEE Standard 1547*) - Esta norma recomenda a forma de expandir a norma de referência, para desenvolvimento de novos projetos, de operacionalidade, de testes e simulação.

Relativamente aos Sistemas Eléctricos de Energia, a legislação aplicável aos mesmos na Europa é muito dispersa e reduzida, não existindo regulamentação específica sobre a criação ou interligação de microrredes. A documentação existente apresenta apenas algumas diretivas criadas pela Comissão Europeia e diretrizes de boas práticas para a pesquisa e desenvolvimento tecnológico, denominado por *Framework Programmes for*

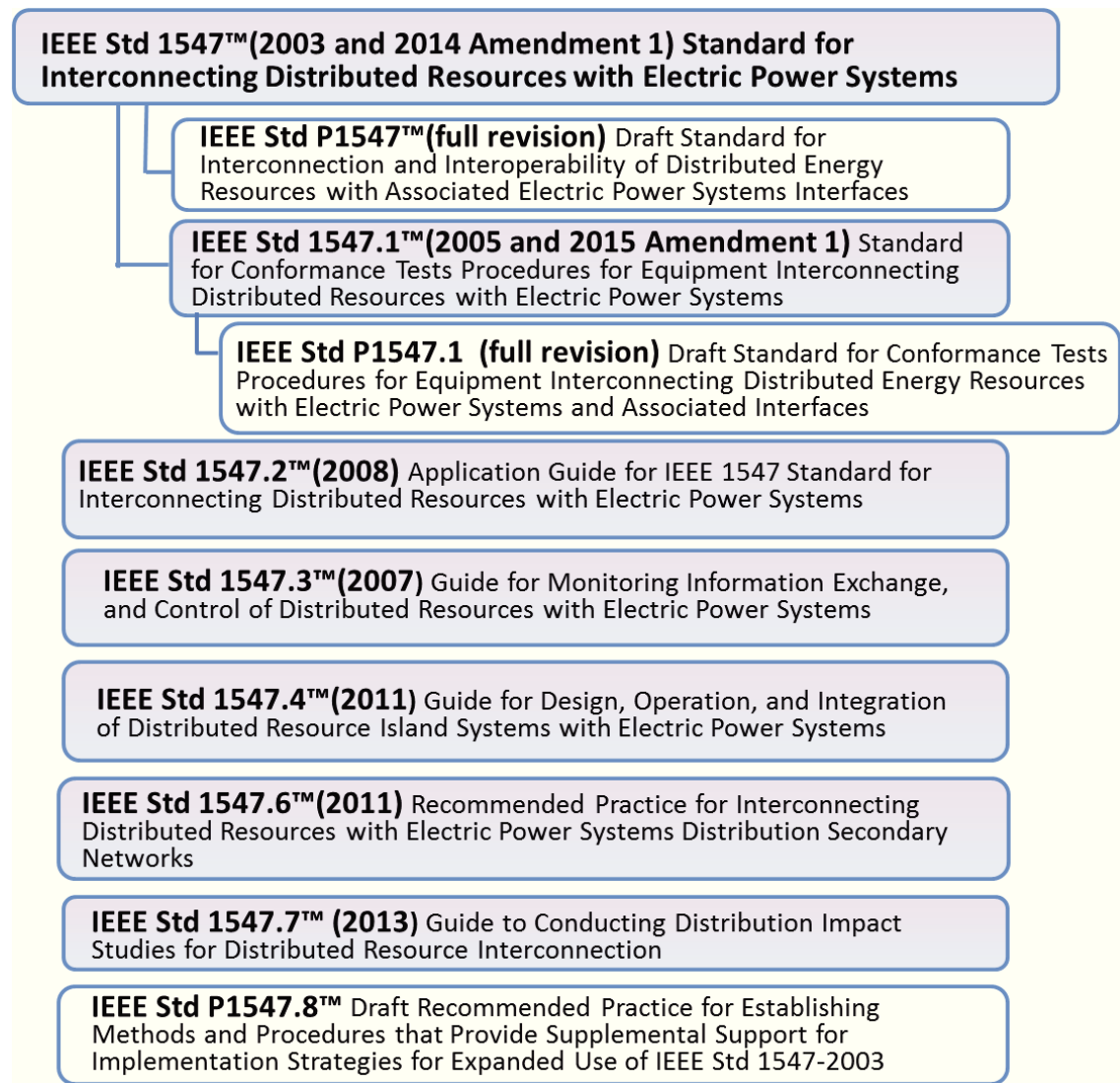


Figura 2.9: Diretrizes da norma IEEE 1547 [6].

*Research and Technological Development* abreviado em *Framework Programmes* (FP). Estas diretrizes definem regras e formas de interligação, entre os sistemas de produção de energia renovável e as rede de distribuição ou microrredes [34]. Em 2009 foi criada a comissão de trabalho para desenvolver recomendações e boas práticas para este tema, ficando a sua definição denominada por *Smart Grids Task Force* <sup>3</sup>.

As diferentes diretivas relativas à regulamentação das energias renováveis, estão definidas em diversas normas, que definem a verificação atual para aplicabilidade, sendo estas apresentadas de seguida [35] <sup>4</sup>:

<sup>3</sup><https://ec.europa.eu/energy/en/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters/smart-grids-task-force>

<sup>4</sup><http://eur-lex.europa.eu/homepage.html>

- 2013/347/EC (*Trans-European Energy Infrastructure*) - Este regulamento define as orientações relativas às infraestruturas energéticas transeuropeias, aplicada aos objetivos e prioridades nos projetos relativos às *smartgrids*.
- 2009/28/EC (*Renewable Energy Directive*) - Esta diretiva promove a utilização de energia, proveniente de fontes renováveis, colocando objetivos mínimos de utilização deste tipo de energias até 2020, sendo as formas mais relevantes a energia eólica, solar, geotérmica e de biomassa. Esta diretiva revogou a 2001/77/EC (*Renewable Energy Sources in the Internal Electricity*).
- 2006/32/EC (*Energy Efficiency and Energy Service*) - A diretiva expõe as normas aplicáveis à eficiência na utilização final de energia e reforça a regulamentação dos serviços energéticos. Tem como objetivo a melhoria da eficiência energética nos estados membros da União Europeia, harmonizando os sistemas, de forma a reduzir falhas nas interligações, fomentando a melhoria da qualidade da energia nos consumidores finais.
- 2009/72/EC (*Rules for Electricity Market*) - A diretiva regulariza e estabelece regras comuns para o mercado interno da eletricidade. Torna diretrizes para a geração, a transmissão, a distribuição e o fornecimento de energia, de forma a melhorar a eficiência dos próprios consumidores, garantindo sempre uma proteção ambiental sustentável.
- 2012/27/UE (*Energy Efficiency*) - A diretiva promove a necessidade de aumentar a eficiência energética, redefinindo os requisitos para a conceção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia, bem como a definição da sua rotulagem e uniformizações. Esta diretiva revogou a 2004/8/EC (*Promotion of Cogeneration*) e a 2006/32/EC (*Energy End-Use Efficiency and Energy Services*).

Não existindo normas definidas, nem a existência de políticas e regulamentos para a geração distribuída ou para as microrredes, cada estado membro implementa as suas diretrizes, baseadas nas diretivas aplicáveis e, seguindo as suas particularidades e políticas internas, aplicando-as de forma a promover o desenvolvimento da exploração das energias renováveis e de forma a promover o melhoramento das microrredes [36].

## 2.3 Simuladores de sistemas de energia

### Software de simulação ATP / ATPDraw

Este software é um simulador de elevada potencialidade, sendo um sucedâneo do *Electromagnetic Transients Program* (EMTP) desenvolvido nos finais da década de 1960 por Hermann W. Dommel, na Universidade Técnica de Munique, para ser uma alternativa digital aos simuladores analógicos de redes, denominados por *Transient Network Analyser* (TNA). Posteriormente foi criado o *Alternative Transients Program* (ATP), baseada no EMTP, para simular fenómenos transitórios, bem como, para a simulação de equipamentos, sistemas de proteção, simulação de falhas e estudo de sistemas de controlo <sup>5 6 7</sup>. Na década de 1990, foi criado o interface gráfico ATPDraw, para dar uma imagem gráfica e facilitada da implementação de componentes, representados através de sistemas elétricos e eletrónicos, baseados em código ATP. Para apoiar a visualização dos sistemas, existe o PlotXY, que representa os resultados das simulações. Para simular um SEE, o ATPDraw possui diversos modelos, quer ao nível de linhas, de transformadores ou de máquinas. Contempla ainda duas linguagens de modelação, em blocos ou em código em *MODELS*, possibilitando a criação de novos modelos ou simular elementos complexos, tais como controladores [37].

### Software de análise MatPower

O software MatPower é um dos pacotes de arquivo do MATLAB, preparado para resolver problemas de fluxos de energia. O Matpower é baseado em rotinas de cálculo de trânsitos de potência, em AC e DC, aplicadas a redes em regime permanente e a redes isoladas [38] <sup>8</sup>. O simulador aceita como código base parâmetros reais de linhas, transformadores e cargas para a implementação de redes de transporte ou de distribuição de energia. Para interpretar melhor e verificar as funcionalidades da aplicação poderá consultar-se a bibliografia [39].

Neste trabalho o MATPower, será utilizado para efetuar a simulação da rede base em estudo, de forma a verificar os comportamentos em regime estacionário da mesma.

---

<sup>5</sup><http://www.eeug.org/>

<sup>6</sup><http://www.atpdraw.net/>

<sup>7</sup><https://sites.google.com/site/atpcaue/el-atp-empt>

<sup>8</sup><http://www.pserc.cornell.edu//matpower/>

## Software de análise PowerWorld

O software PowerWorld é um software, tal como o MatPower, de desenvolvimento de estudos de fluxos de potência, com a particularidade, neste caso, de ter um ambiente gráfico, baseado em programação linear para encontrar soluções ideais [40]. Este software permite definir várias realidades de simulação, quer ao nível estacionário, quer ao nível da implementação de falhas, curto-circuitos, entre outros. O PowerWorld poderá ser definido como um programa interativo de simulação, aplicado à operacionalidade de sistemas de potência de redes simuladas <sup>9</sup>.

A simulação usada em PowerWorld neste trabalho, aplicar-se-á na verificação dos trânsitos de potência, para verificar o ou os melhores locais para desacoplar a rede de transporte, da rede de distribuição, tornado-a isolada, de forma a garantir que não colapsa ou entra em falha.

---

<sup>9</sup><https://www.powerworld.com/>



# Capítulo 3

## Modelação de uma microrrede

### 3.1 Redes de energia

#### 3.1.1 Linhas de transmissão - parâmetros distribuídos

Os transitórios em determinadas frequências, são definidas nas *guidelines*, apresentadas pelo *CIGRE* [15], demonstrando modos de verificação e comparação. Uma dessas *guidelines* ajuda a definir que métodos de simulação deverão ser utilizados em determinadas gamas de frequências, tal como demonstrado na tabela 3.1. Aí verifica-se a diferenciação e a sugestão para as simulações em cada tipo de necessidade. Os fenómenos transitórios poderão ser verificados de diversas formas, baseados na frequência de simulação dos mesmos. A tabela referida demonstra a relação entre a frequência e as necessidades a verificar, para cada tipo de situação.

O uso de parâmetros distribuídos nos modelos de linhas de transmissão de energia elétrica, em contexto de simulação, permite a interpretação mais aproximada da realidade da distribuição de energia. Em alta tensão a resistência dos condutores tende a ser ignorada, sendo a relação entre a tensão e a corrente, em função da distância e do tempo, definida através da equação 3.1, onde  $L'$  representa a Indutância por unidade básica de comprimento e pela equação 3.2, onde  $C'$  representa a Capacitância por unidade básica de comprimento [41].

$$\frac{\delta e}{\delta x} = L' \left( \frac{\delta i}{\delta t} \right) \quad (3.1)$$

Tabela 3.1: Modelação de linhas de transmissão [14] [15].

	Low Frequency Transients	Slow Front Transients	Fast Front Transients	Very Fast Front Transients
	0.1 Hz - 3 kHz	50/60 Hz - 20kHz	10 kHz - 3MHz	100 kHz - 50 MHz
Topic	Group I	Group II	Group III	Group IV
Representation of transposed lines	Lumped parameters; Multiphase $\pi$ circuits	Distributed parameter; Multiphase model; Multiphase $\pi$ circuits possible	Distributed parameter; multiphase model	Distributed parameter; single-phase model
Line asymmetry	Important	Capacitive and inductive asymmetry important; For statistical study inductive asymmetry not important	Negligible for single-phase simulations, otherwise important	Negligible
Frequency-dependent parameters	Important	Important	Important	Important
Corona effects	Important if phase conductor voltage can exceed the corona inception voltage	Negligible	Very important	Important

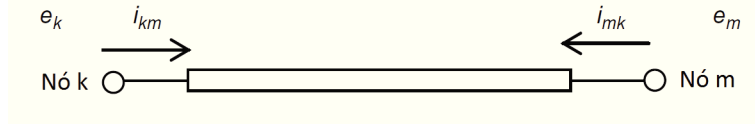


Figura 3.1: Representação de parâmetros distribuídos.

$$\frac{\delta i}{\delta x} = C' \left( \frac{\delta e}{\delta t} \right) \quad (3.2)$$

Assumindo uma linha de distribuição com parâmetros distribuídos, como mostra a figura 3.1, a interligar os nós "k" e "m", a representação através de um circuito equivalente pode ser feita como ilustra a figura 3.2, em função da impedância  $Z$ , da velocidade de propagação  $v$  e de um intervalo de tempo  $\tau$ , de acordo com a equação 3.3 [41].

$$\begin{aligned} e_k(t - \tau) + Z * i_{km}(t - \tau) &= e_m(t) - Z * i_{mk}(t) \\ e_k(t) - Z * i_{km}(t) &= e_m(t - \tau) + Z * i_{mk}(t - \tau) \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \\ v = \frac{1}{\sqrt{L' * C'}} \\ \tau = \frac{1}{v} \end{cases}$$

A equação 3.4 [41] representa a tensão e a corrente vista do lado do nó  $k$ , ao qual se refere a figura 3.2 representativa das duas parametrizações, tanto de tensão como de

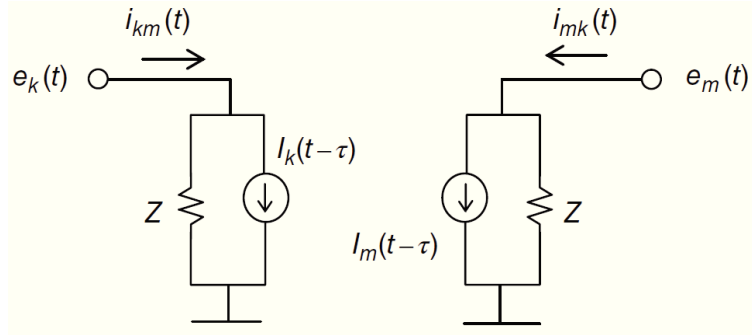


Figura 3.2: Circuito equivalente de representação de linha com parâmetros distribuídos.

corrente. Denominando-se a corrente  $i_{km}(t)$  representada pela tensão do seu próprio nó e a corrente é dependente do tempo de propagação  $\tau$ .

$$\begin{aligned} i_{km}(t) &= \frac{1}{Z}e_k(t) + I_k(t - \tau) \\ I_k(t - \tau) &= -\frac{1}{Z}e_m(t - \tau) - i_{mk}(t - \tau) \end{aligned} \quad (3.4)$$

De forma a definir as linhas da rede de distribuição e de transporte do modelo IEEE-30 barramentos, num modelo de linha passível de funcionar em parâmetros distribuídos, ou seja, com valores por unidade de km, foi necessário redefini-los com base nos valores das tabelas típicas das redes IEEE, definidas em formato cdf. Os valores base das resistências, das reatância e da susceptância das linhas está definida na tabela do apêndice A.2, bem como a definição dos comprimentos utilizados para simular as linhas em questão. O ficheiro e a forma de interpretação do mesmo, poderá ser verificado na bibliografia <sup>1</sup>, que serve ser um apoio para a implementação de outros tipos de linhas, noutros formatos, diferentes dos daqueles aqui utilizados. Na figura 3.3, poderá verificar-se a "janela" do modelo da linha, LINEZT\_3, utilizada em ATP para simular a rede em causa.

### 3.1.2 Transformação de Clarke aplicado à verificação de transitórios

Na simulação de linhas de transmissão, estas podem ser simuladas através de diversos métodos, entre os quais em modelo PI ou em parâmetros distribuídos. Na definição do modelo em PI, existe a necessidade de saber, para a sua implementação, os valores e os

<sup>1</sup>[https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg\\_tca30bus.htm](https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm)

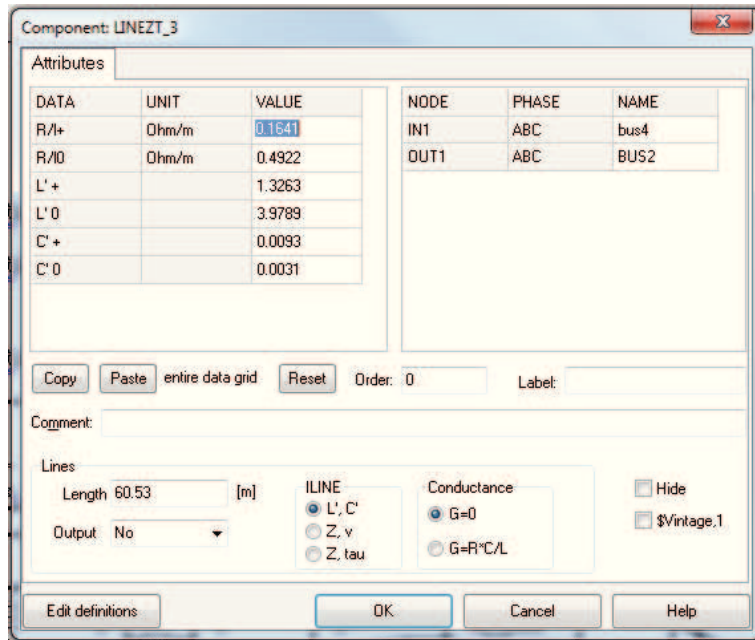


Figura 3.3: Parâmetros das linhas em ATPDraw.

comportamentos resistivos, capacitivos e indutivos de cada linha, considerando-a num todo. Deste modo, este método torna-se pouco preciso em situações de verificação de comportamentos transitórios ao longo das linhas. Neste sentido, o modelo de linhas de transmissão, baseado em parâmetros distribuídos, poderá ser um método mais preciso do que o modelo em PI. Ou seja, a simulação em parâmetros distribuídos é baseada em valores por unidade de comprimento, podendo assim, simular os fenómenos com base no comportamento efetivo da linha [42].

Para o desenvolvimento desta dissertação torna-se crucial o uso de linhas definidas, através de parâmetros distribuídos. Deste modo com este tipo de simulação, é possível observar de forma mais pormenorizada e precisa, os fenómenos e variações nas interligações, e no comutar de cargas. Para que as iterações sejam mais rápidas, o ATP, através do uso de parâmetros distribuídos, implementados nas linhas, recorre à transformação de matrizes. O exemplo para a simulação de redes de transporte/transmissão é facilitado através do modelo distribuído com linhas transpostas, que usa o modelo de *Clarke*  $\alpha\beta$  através de uma matriz de transformação de "m" fases balanceadas, dada pela tabela 3.2.

Ao aplicar a transformação de fase "m" às matrizes de fase balanceadas, é obtida a matriz diagonal dada pela tabela 3.3.

O valor dado de  $Z_{g-m}$  representa a matriz de terra e  $Z_{L-m}$  representa a matriz de linha. De forma a facilitar o desenvolvimento e a solução, é mais fácil trabalhar

Tabela 3.2: Matriz de transformação - Clarke

$$\bar{T}_i = \begin{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{m}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \cdot & \frac{1}{\sqrt{j(j-1)}} & \cdot & \frac{1}{\sqrt{m(m-1)}} \\ \frac{1}{\sqrt{m}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \cdot & \frac{1}{\sqrt{j(j-1)}} & \cdot & \frac{1}{\sqrt{m(m-1)}} \\ \frac{1}{\sqrt{m}} & 0 & -\frac{2}{\sqrt{6}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \frac{-(j-1)}{\sqrt{j(j-1)}} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{1}{\sqrt{m}} & 0 & 0 & \cdot & 0 & \cdot & \frac{-(m-1)}{\sqrt{m(m-1)}} \end{vmatrix}$$

Tabela 3.3: Matriz de diagonal - Clarke

$$\begin{vmatrix} Z_{g-m} & & & & & & \\ & Z_{L-m} & & & & & \\ & & \cdot & & & & \\ & & & \cdot & & & \\ & & & & Z_{L-m} & & \end{vmatrix}$$

com valores de linhas independentes transformando assim as linhas de fase "m" de equações dependentes para uma matriz "M" de equações independentes. Muitas linhas transpostas e não transpostas podem ser decompostas em transformações diagonais, de forma a obter parâmetros modais, baseados na teoria do vetor próprio. Verifica-se assim que a equação diferencial de fase pode ser dada pela representação feita na equação 3.5

$$\begin{aligned} \frac{d^2 V_{ph}}{dx^2} &= \bar{Z}_{ph} \bar{Y}_{ph} V_{ph} \\ \frac{d^2 V_{mode}}{dx^2} &= \bar{\Lambda} V_{mode} \\ \bar{\Lambda} &= T_v^{-1} \bar{Z}_{ph} \bar{Y}_{ph} \bar{T}_v \end{aligned} \quad (3.5)$$

A diagonal dos elementos de  $\bar{\Lambda}$  são auto-valores da matriz produto de  $\bar{Z}_{ph} \bar{Y}_{ph}$  e  $\bar{T}_v$  que é a matriz de vetores próprios, da matriz modal da matriz produto.

Para definição da corrente, as definições são equiparáveis à forma de dimensionar os valores já apresentados. Neste sentido, a corrente poder-se-á definir através da equação 3.6

$$\begin{aligned}
\bar{I}_{mode} &= \bar{T}_i \bar{I}_{ph} \\
\frac{d^2 V_{mode}}{dx^2} &= \bar{\Lambda} V_{mode} \\
\bar{T}_i &= [\bar{T}_v^t]^{-1}
\end{aligned} \tag{3.6}$$

As formas de representação das linhas trifásicas são dadas pela matriz 3.7 e 3.8, apresentadas de de seguida.

$$\bar{T}_i = \begin{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{2}{\sqrt{6}} \end{vmatrix} \tag{3.7}$$

$$\bar{Z}_{012} = \bar{T}_i^{-1} \bar{Z}_{abc} \bar{T}_i \tag{3.8}$$

A definição da impedância, será descrita conforme a equação 3.9, onde  $Z_s$  é a impedância de fase e  $M_u$  é a impedância de neutro.

$$\begin{aligned}
\bar{Z}_{123} &= \begin{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{2}{\sqrt{6}} \end{vmatrix}^{-1} \begin{vmatrix} Z_s & M_u & M_u \\ M_u & Z_s & M_u \\ M_u & M_u & Z_s \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{2}{\sqrt{6}} \end{vmatrix} \\
\iff \bar{Z}_{123} &= \begin{vmatrix} Z_s + 2M_u & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - M_u & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - M_u \end{vmatrix}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

De forma a dar um exemplo prático na leitura de uma rede de distribuição, poderá observar-se na figura 3.4 a exatidão aproximada para a verificação de transitórios em linhas de transmissão. O exemplo em questão, representa uma linha de aproximadamente 515 km, onde é aplicada uma tensão de 10VDC de teste, para verificar a resposta da linha através dos diferentes tipo de simulação [14]. Estes tipos de simulações podem ser baseadas no conceito de ondas viajantes, para verificar falhas em sistemas, em alta frequência, através de métodos como de Bergeron, ou pelo diagrama de Lattice, podendo ser verificado de forma mais aprofundada alguns desses conceitos nas referências [43] ou [44].

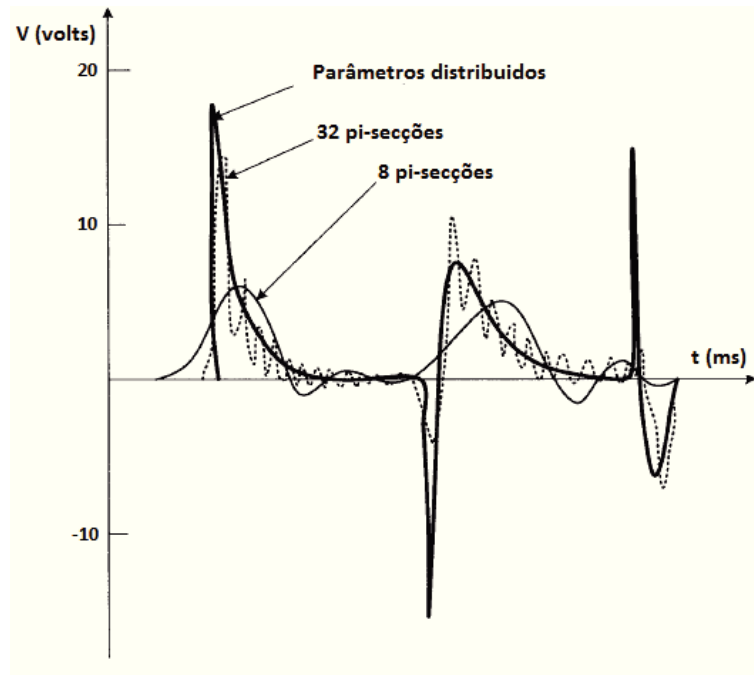


Figura 3.4: Comparação de transitórios simulados em PI vs Parâmetros Distribuídos

## 3.2 Sistemas de conversão primária de energia

Com o aumento do consumo energético, apoiado pela produção de elementos provenientes de combustíveis fósseis, nomeadamente petróleo e carvão, o SEE terá que se adaptar a essas novas formas de energia, visto terem um elevado grau de imprevisibilidade no fornecimento. Para isso, é importante a modelação de microrredes, com capacidade de auto-produção e de suportarem os fenómenos de ligar e desligar cargas e geradores.

O aproveitamento de energia primária para produção de outra forma de energia, tem base fundamental para a utilização de energia de carácter renovável, considerada inesgotável para a sua utilização noutras formas, necessárias.

Foi realizada a simulação de uma turbina eólica e de um painel fotovoltaico em ATPDraw, que será apresentado em capítulos seguintes.

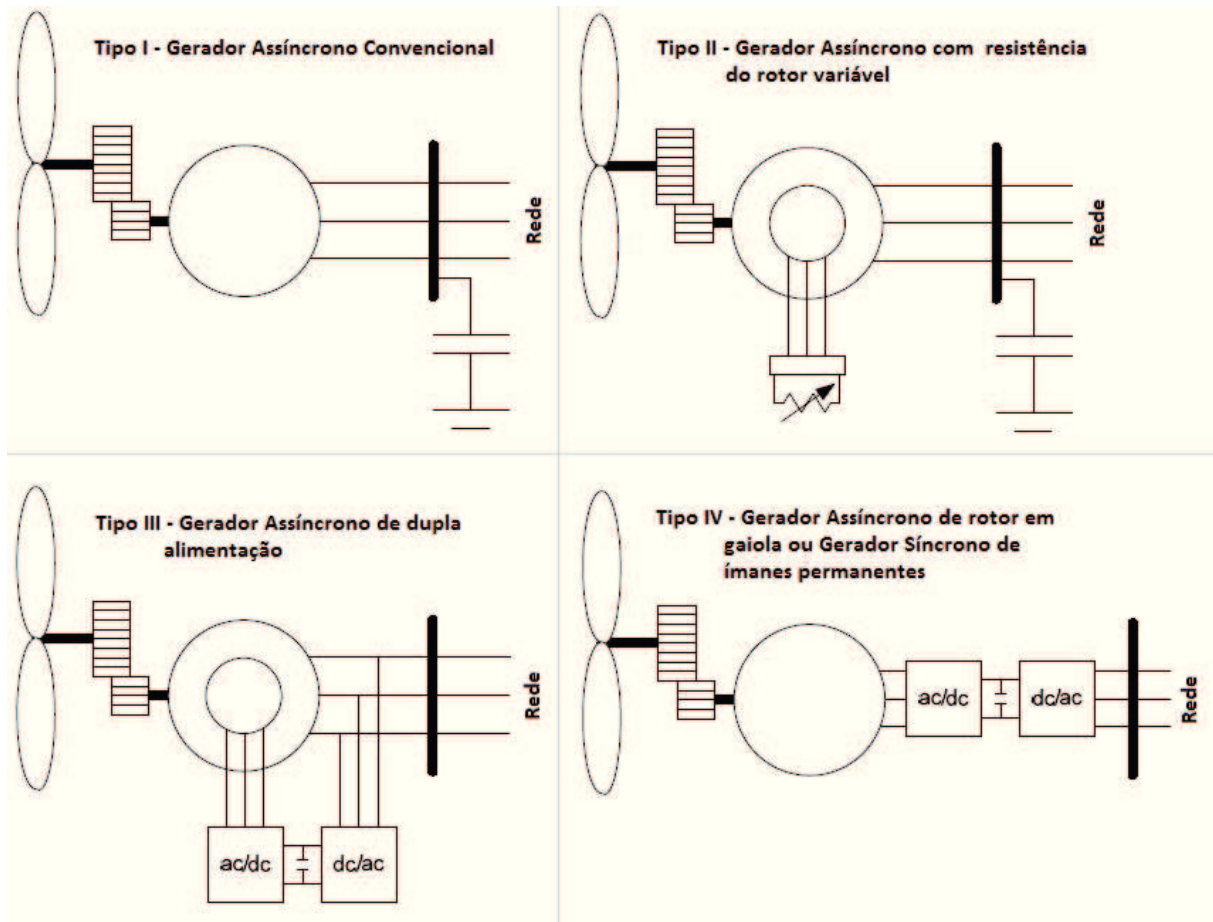


Figura 3.5: Tipologias de turbinas eólicas e respectivas interligações [7].

### 3.2.1 Sistemas eólicos

Nos sistemas de produção primária de energia, por base de energia proveniente do vento, poderá considerar-se a existência de três tipos de tipologias de sistemas eólicos. A forma de conversão de energia depende da máquina primária utilizada, podendo ser síncrona (ímãs permanentes) ou assíncrona (rotor em gaiola, de dupla alimentação, entre outras). Na figura 3.5, poderá verificar-se um esquema representativo dos modelos.

#### 3.2.1.1 Modelação do vento

O modelo matemático da representação dos ventos poderá ser descrito conforme a equação 3.10, definida por quatro variáveis, representando as principais componentes de simulação da velocidade do vento, incluindo fatores externos, tal como turbulências ou mesmo ressonâncias [45].

$$V_{wind} = V_{base} + V_{gust} + V_{ramp} + V_{noise}(m/s) \quad (3.10)$$

Onde  $V_{wind}$ , dá a velocidade final do vento disponível,  $V_{base}$  representa a velocidade média de funcionamento prevista,  $V_{gust}$ , modela a rajada de vento,  $V_{ramp}$ , dá o diferencial de velocidade do vento e  $V_{noise}$  o valor da turbulência.

O valor base é definido pela média da velocidade do vento do local onde será instalado o sistema, sendo representada através da equação 3.11, e onde  $K_B$  uma constante.

$$V_{base} = K_B \quad (3.11)$$

A velocidade da rajada de vento poderá ser descrita através das equações 3.12 e 3.13.

$$V_{gust} = \begin{cases} 0 & t < t_{s.gust} \\ V_{cos} & t_{s.gust} < t < t_{s.gust} + T_{gust} \\ 0 & t > t_{s.gust} + T_{gust} \end{cases} \quad (3.12)$$

$$V_{cos} = \left( \frac{AMP_{gust}}{2} \right) \left\{ 1 - \cos 2\pi \left[ \left( \frac{t}{t_{s.gust}} \right) - \left( \frac{t_{s.gust}}{T_{gust}} \right) \right] \right\} \quad (3.13)$$

O valor da rajada de vento, é definida com diferenciais de tempo e de valores de pico, onde  $t$ , dá o tempo de verificação,  $T_{gust}$  (s), o período da rajada, o  $t_{s.gust}$  (s) define o período inicial da rajada e  $AMP_{gust}$  (m/s) dá o pico da rajada.

A velocidade diferencial da velocidade do vento poderá ser descrita através das equações 3.14 e 3.15.

$$V_{ramp} = \begin{cases} 0 & t < t_{ramp} \\ V_r & t_{i-ramp} < t < t_{f-ramp} + t_{gust} \\ 0 & t > t_{f-ramp} + t_{gust} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$V_r = AMP_{ramp} \left[ 1 - \frac{(t - t_{e-ramp})}{(t_{s.ramp} - t_{e.ramp})} \right] \quad (3.15)$$

O valor do diferencial da variação do vento é definido pelos tempos iniciais e finais da rampa, definidos por  $t_{s.rampa}$  (s) e  $t_{e.rampa}$  (s), respetivamente e por  $AMP_{rampa}$  (m/s), que define a rampa máxima definida.

A definição da turbulência, é descrita nas equações 3.16, 3.17 e 3.18, que representa as pequenas perturbações introduzidas pelo vento, definidas pelas mudanças repentinas do mesmo.

$$V_{noise} = 2 \sum_{i=1}^N [S_v(\omega_i) \Delta\omega]^{\frac{1}{2}} \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (3.16)$$

$$\omega_i = \left(i - \frac{1}{2}\right) \Delta\omega \quad (3.17)$$

$$S_v(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 \left[1 + \left(\frac{F\omega_i}{\mu\pi}\right)^2\right]^{\frac{4}{3}}} \quad (3.18)$$

N equação 3.16,  $\phi_i$  define de forma aleatória a uniformidade da variação, dentro de um intervalo entre 0 e  $2\pi$ .  $\Delta\omega$  (rad/s) representa a velocidade angular, definida entre 0.5 e 2.0 rad/s,  $N$  consolida o número de iterações, momentaneamente definidas por 50. Valores estes que definem a precisão da variação. A densidade do espectro é definida pela equação 3.18, onde  $K_N$  define o coeficiente de deslocação do vento, definida por 0.004 e  $F$  representa a escala da turbulência, normalmente definida para 2000. O mesmo acontece quando aplicável a outros valores já apresentados, definindo a precisão de cálculo nas iterações [46].

Na figura 3.6 está representado o esquema em ATP de uma simulação da velocidade do vento com base nos parâmetros teóricos analisados anteriormente, aplicados à simulação. Na representação apenas estão definidos valores fixos para cada parâmetro, mas para simulação de um sistema, basta nos parâmetros de entrada colocar variações nos valores das TACS.

O código desenvolvido para efetuar a simulação da velocidade do vento, através das variações de entrada dos seus parâmetros, poderá ser verificada no apêndice B.1.

De forma a visualizar uma simulação genérica, o gráfico 3.7 representa a simulação

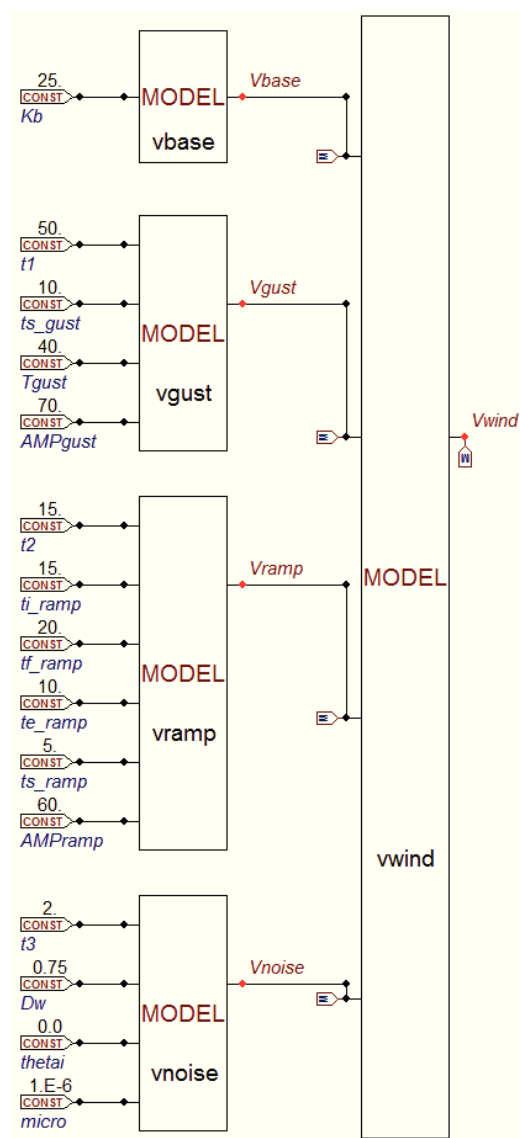


Figura 3.6: Diagrama de simulação do vento em ATP.

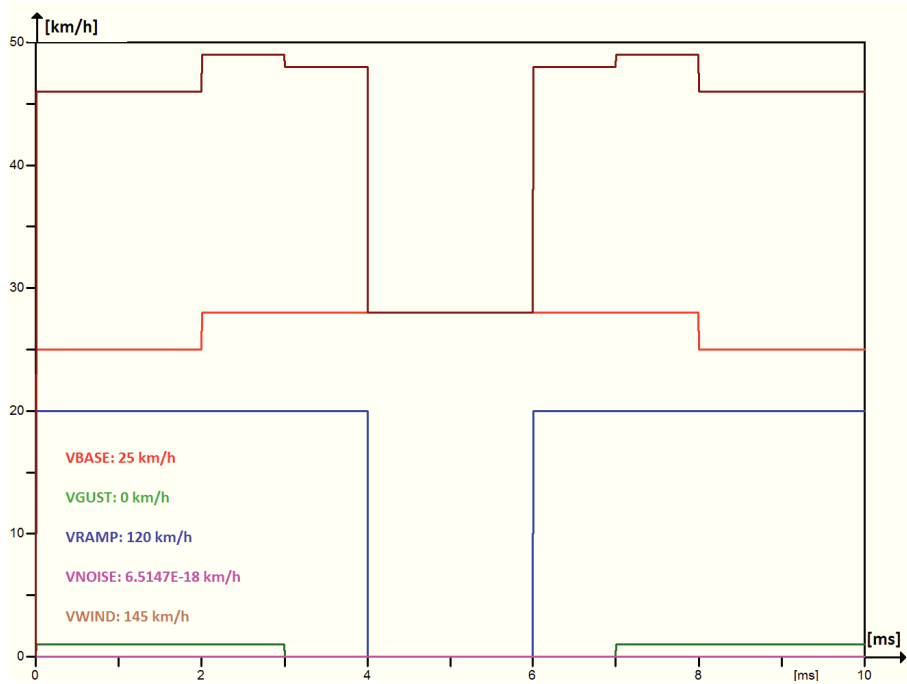


Figura 3.7: Velocidade final do vento final após aplicação das perturbações.

em questão, com valores genéricos introduzidos, fixos.

### 3.2.1.2 Simulação da parte mecânica de uma turbina eólica

As turbinas eólicas são compostas por pás ligadas a um rotor, efetuando a conversão da energia do vento noutras formas de energia, nomeadamente elétrica, através da introdução de geradores elétricos [47]. A energia cinética do vento poderá ser convertida através da equação 3.19, sendo representada em  $J/m^3$ , onde  $V_{wind}$ , representa a velocidade do vento em m/s e  $m$  a massa de ar transponível nas pás em quilogramas (kg).

$$E = \frac{1}{2}mv_{wind}^2 \quad (3.19)$$

A potência mecânica convertida no rotor da eólica pode ser caracterizada através da equação 3.19 em Watts (W), sendo  $A$  a área das pás constituintes do aerogerador em  $m^2$  e  $\rho$  a densidade do ar, normalmente estandardizada de 1.255 de pressão a um determinado nível do mar e a 25°C dada em  $kg/m^3$ .

O coeficiente de potência é uma relação entre a velocidade do vento incidente e a

sua velocidade rotacional, dada pelas equações 3.20, 3.21, 3.22 e 3.23, sendo dada  $\lambda$  a velocidade a que rodam as pás e  $\beta$  o ângulo que estão perante a incidência do vento.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v_{wind}^3 \quad (3.20)$$

$$C_p = \frac{P_{mec}}{P_{wind}} \quad (3.21)$$

$$\lambda = \frac{V_{blade}}{V_{wind}} \Leftrightarrow \lambda = \frac{\omega_r R}{V_{wind}} \quad (3.22)$$

Os valores polinomiais da equação *lambda* são representados por  $V_{blade}$ , que dá a velocidade existente na extremidade da pá dada em m/s, onde  $R$  representa o raio do rotor e  $\omega_r$  dá a velocidade angular do rotor em rad/s.

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A V_{wind}^3 \quad (3.23)$$

Com os coeficientes de potência mecânica no lado de rotação das pás poderá equacionar-se a polinização do Binário Mecânico disponibilizado pelo sistema  $T_{mec}$ .

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega_r} \quad (3.24)$$

O Binário gerado será a representação da integração no sistema de rotação da caixa de transmissão entre a turbina eólica e a máquina primária.

Na figura 3.8, está apresentada a expressão gráfica do modelo da representação da parte mecânica de conversão de energia, em simulação ATPDraw, de representação de uma máquina primária.

O código desenvolvido para efetuar a simulação da potência mecânica e por conseguinte do seu binário gerado, por intermédio da conversão do vento, por uma máquina primária, poderá ser verificada no apêndice B.2.

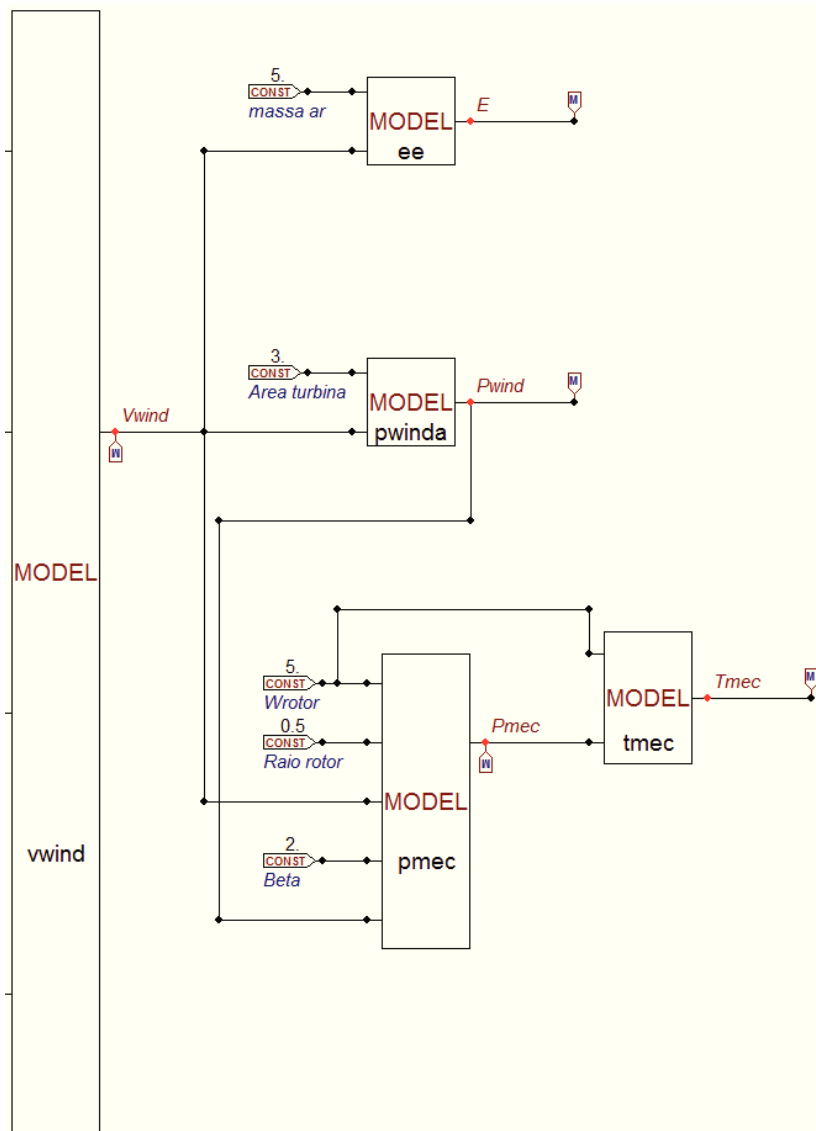


Figura 3.8: Estrutura global do modelo dos ventos e da potência e binário mecânico em ATPDraw.

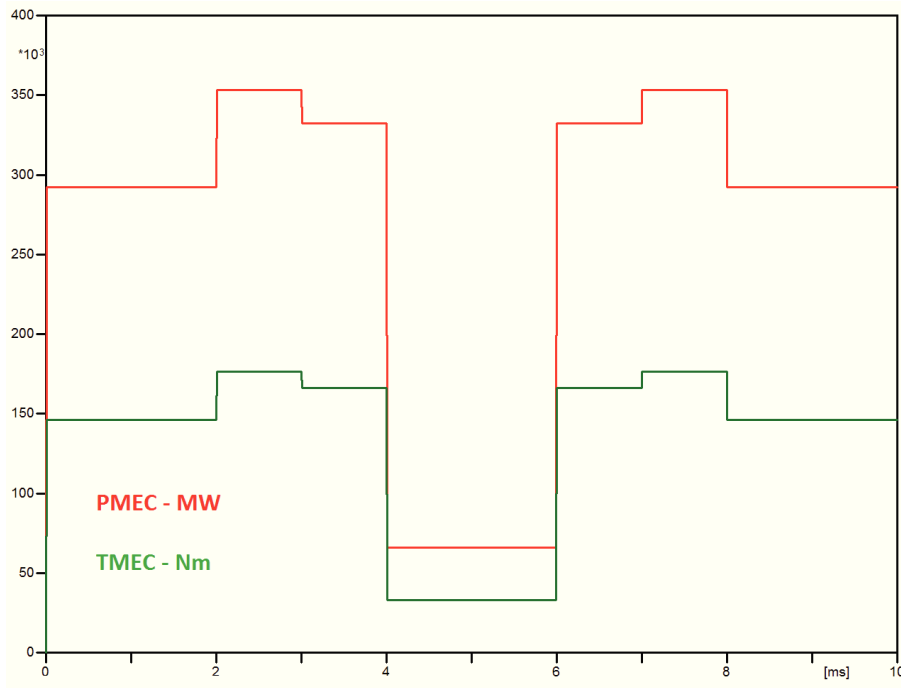


Figura 3.9: Representação da Potência Mecânica vs Binário Mecânico.

Como forma de exemplo com valores standard poderá verificar-se qual a Potência Mecânica e o Binário representativo de um determinado sistema eólico. A representação poderá ser verificada na figura 3.9

Neste trabalho apenas foi implementado o sistema eólico em ATPDraw, não sendo aproveitado como base de simulação para a rede ou mesmo para a simulação de transitórios. A implementação incidirá num sistema de fornecimento de potência mecânica fixo.

### 3.2.2 Sistema fotovoltaico

A geração de energia, baseado em produção através de painéis fotovoltaicos, poderá ser definida segundo o esquemático da figura 3.10, onde representa o comportamento tipo de uma célula fotovoltaica, de forma simplificada [48].

De forma a realizar a simulação seguinte, são representadas as equações que definem o mesmo sistema, incluindo os parâmetros externos que a compõem.

A equação 3.25 representa a tensão em (V) e corrente (A) à saída da célula fotovoltaica, sendo denominado por resistência série  $R_s$  e por  $R_p$  a resistência paralelo. A

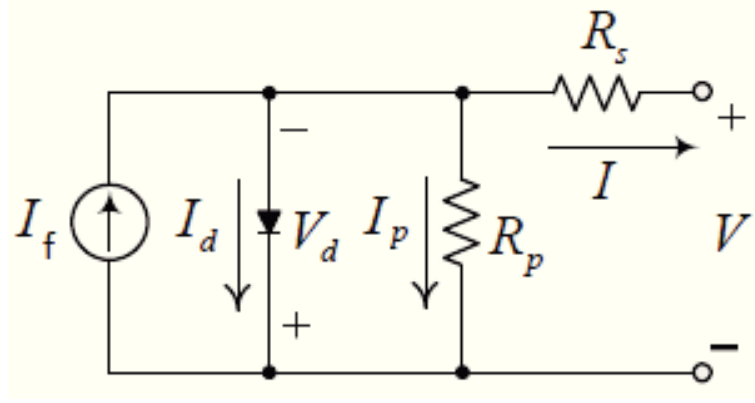


Figura 3.10: Estrutura global de uma célula fotovoltaica[8].

corrente que circula sobre o díodo  $I_d$  é definida pela equação 3.26, onde  $I_s$  designa a corrente de saturação do painel e  $V_t$ , define-se pela equação 3.27.

$$\begin{cases} I = I_f - I_d - I_p \\ V_d = V + I.R_s \end{cases} \quad (3.25)$$

$$I_d = I_s \left( e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right) \quad (3.26)$$

$$V_T = \frac{nkT_k}{q} \quad (3.27)$$

A temperatura  $T_k$  é definida em grau Kelvin ( $^{\circ}K$ ), e  $k$  designa a constante de *Boltzmann*, que toma o valor de  $1.380653 \times 10^{-23}$  Joule/Kelvin  $J/K$  [49], e  $q$  representa a carga do eletrão ou carga elementar, que tem o valor de  $1.60217 \times 10^{-19}$  Coulombs ( $C$ ) [50]. Para cada tipo de placa da célula fotovoltaica, dependendo do tipo de material recebe um valor característico, podendo ser entre um ou dois. No caso da utilização de díodo ideal é utilizado o valor de um, na situação de uso de modelo de díodo de silício cristalino recebe o valor de dois [51] [52].

### 3.2.2.1 Simulação de um painel fotovoltaico

Uma representação da simulação de uma célula fotovoltaica, poderá ser verificada na figura 3.11, que tem um valor fixo de incidência solar em  $I_f$ , e uma ligação base da tensão desejada à saída do painel de 120V, simulando um sistema controlado. Na

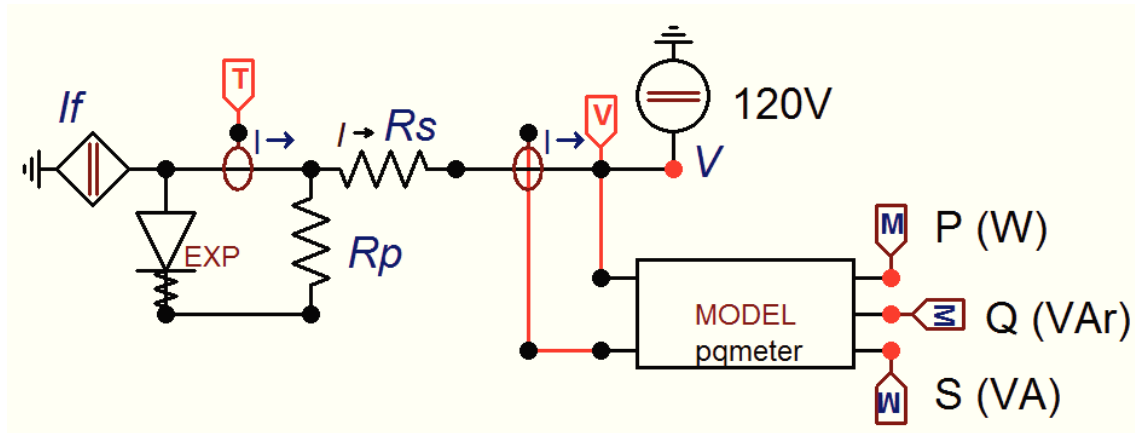


Figura 3.11: Simulação de célula fotovoltaica em ATP.

figura 3.12 verifica-se o débito de potências fornecidas pela célula simulada, através da simulação de vários tipos de incidências. As incidências foram apenas aplicadas para demonstrar a variação da célula, não lineares, de forma a demonstrar o seu comportamento através do ATPDraw.

Tendo em vista o aperfeiçoamento da da simulação, e a concordância de tensões e débito de potência funcional, para a rede em estudo, não foi utilizado neste trabalho a simulação com interligação à rede em estudo, tendo sido apenas utilizada a definição base do sistema. De referir que a fonte de alimentação de tensão representada na figura 3.11, é equivalente à tensão pretendida no barramento DC, antes da conversão em AC.

### 3.3 Conversores eletrônicos de energia

Um sistema de produção com base em turbina eólica tanto pode usar um gerador síncrono com um gerador assíncrono. Em ambos os casos, atualmente a forma mais usada de interligação é através de um conversor eletrônico, de forma a facilitar a adaptação a variações da na velocidade de rotação. Na figura 3.13 está representado um esquema típico de um conversor. O circuito em questão é responsável pela transferência de potência entre a turbina e a rede elétrica, reduzindo as componente harmónicas, melhorando a compatibilidade eletromagnética [53].

A implementação da retificação é efetuada por uma ponte de seis díodos retificados, que têm em paralelo um circuito *snubber* (resistência em série com condensador), que evita oscilações numéricas na simulação. Nos circuitos reais os *snubbers* também são necessários para proteger os componentes dos fenómenos transitórios [54] [55]. As

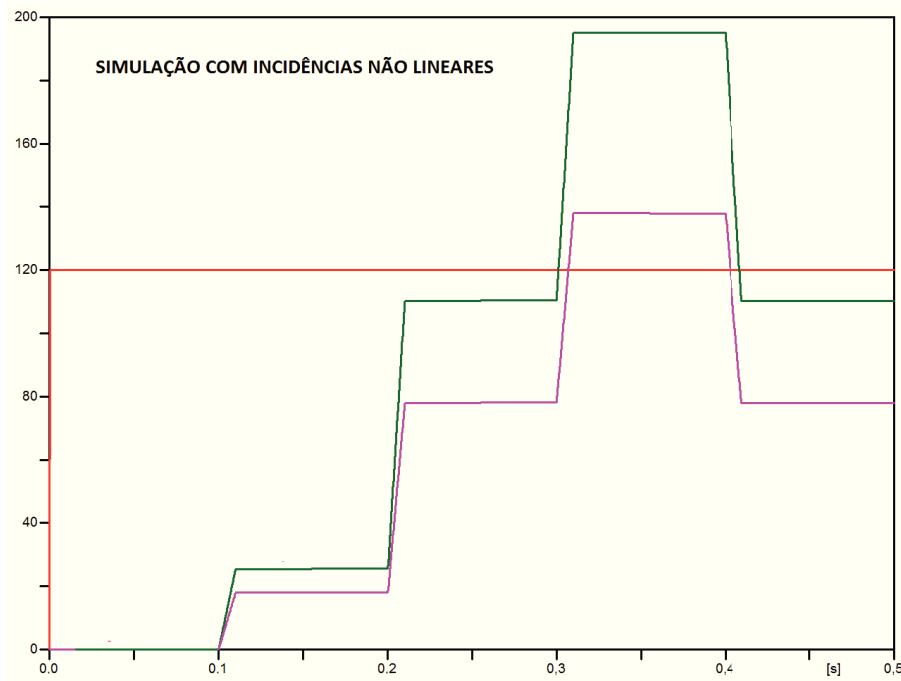


Figura 3.12: Representação gráfica de uma variação da incidência numa célula fotovoltaica em ATP.

resistências em série com os díodos, são de muito baixo valor, impostas pelo ATP, para interligar dispositivos tipo interruptor como os díodos. O controlo da tensão de saída do inversor é efetuado por modelação da largura de pulsos (PWM), que facilita a posterior eliminação de harmónicos. Esta é efetuada através de sinusóides ideais, que definem a referência, para comutação dos transístores. Na figura 3.14 está representada a implementação em ATPDraw de um conversor eletrónico AC-DC, DC-LINK, DC-AC.

A variação de velocidade e as alterações produzidas pelos semicondutores, provo-

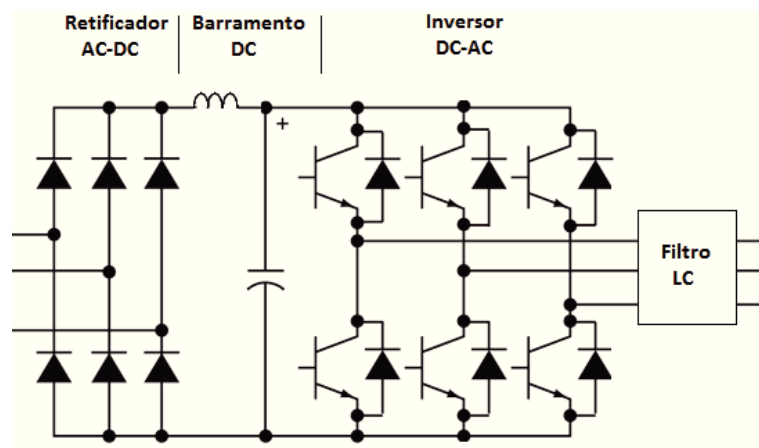


Figura 3.13: Conversor AC-DC e Inversor DC-AC

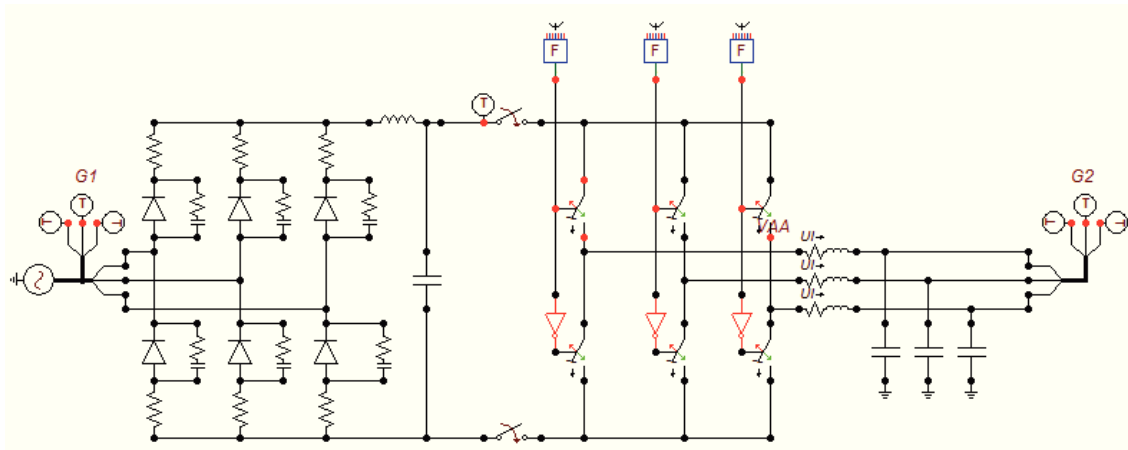


Figura 3.14: Estrutura global simulação conversor AC-DC-AC em ATPDraw.

cam harmónicos, sendo necessário inserir um filtro passivo com a utilização de uma indutância de valor elevado, permitindo assim reduzir os harmónicos na corrente aos valores impostos, por exemplo, pela norma IEEE STD 519-2014 [56].

Na figura 3.15, poderá verificar-se uma simulação genérica, com valor de entrada de 480Vrms. Na figura à esquerda, observa-se a tensão convertida em corrente contínua, após conversão, sendo que na figura à direita verifica-se a demonstração da tensão de saída retificada. Desta forma verifica-se que o sistema tem um tempo de resposta, de 0.15seg, até à tensão do barramento DC estabilizar. Na simulação em questão, apenas aos 0.2seg, foi interligado o retificador DC-AC, por intermédio do fecho dos interruptores, verificando-se pequenas oscilações aquando da sua ligação, apesar de ao final, de 0.05seg, já se encontrar novamente equilibrada. A simulação apresenta apenas uma das fases elétricas na sua simulação, visto as restantes serem equivalentemente equiparáveis.

### 3.4 Modelação de uma máquina síncrona

Um gerador síncrono de ímanes permanentes trifásico de dois pólos, tem uma representação elétrica conforme representada na figura 3.16, sendo  $aa'$ ,  $bb'$ ,  $cc'$  os enrolamentos da armadura, desfasados entre si  $120^\circ$ .

A definição teórica [9] da tensão  $[V]$ , da corrente  $[I]$  e dos fluxos da máquina síncrona de ímanes permanentes é dada pelas equações 3.28, onde os fluxos  $a, b$  e  $c$  são representados pela matriz  $[\lambda_s]$ , através da equação 3.29.

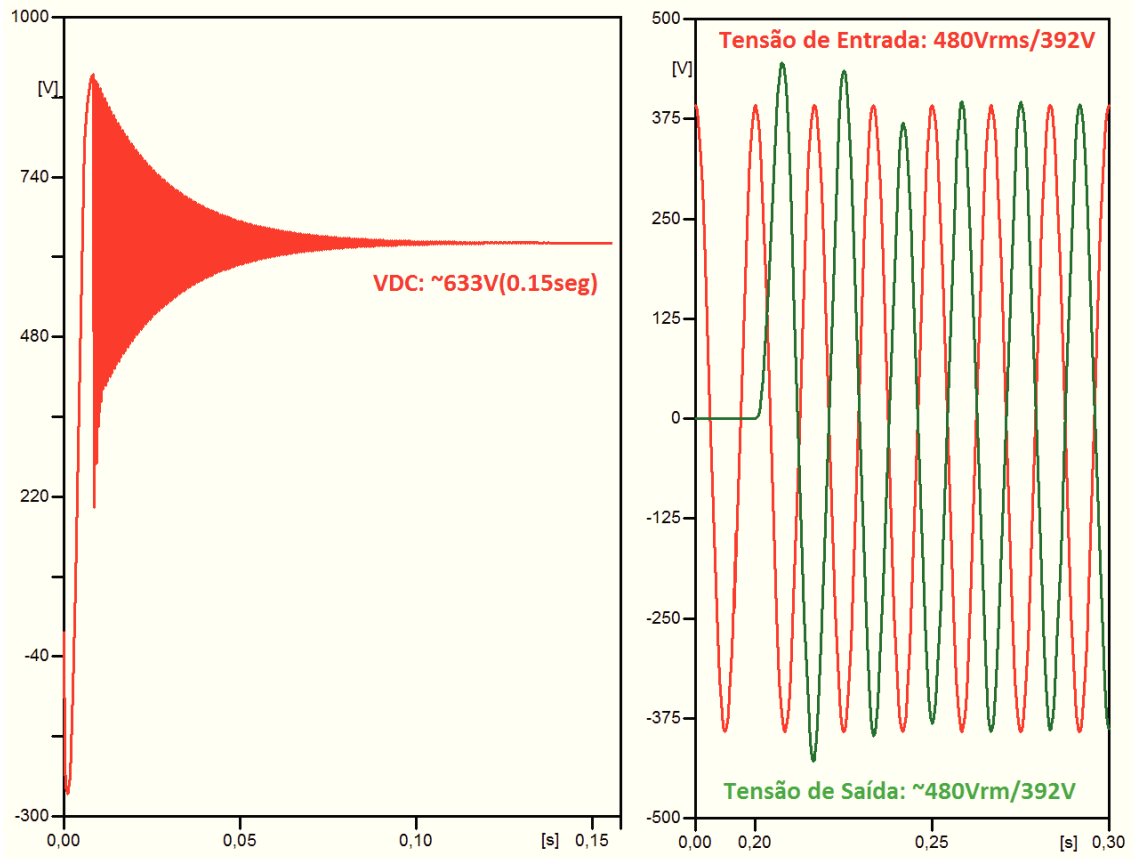


Figura 3.15: Simulação gráfica: ENTRADA - CONVERSÃO - RETIFICAÇÃO - SAÍDA.

$$[V] = -[R_s] \cdot [I] - \frac{\delta[\lambda_s]}{\delta t} \quad (3.28)$$

$$[\lambda_s] = \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & k_{af} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & k_{bf} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & k_{cf} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ F_{PM} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Na equação 3.28,  $[R_s]$  representa a matriz diagonal dos enrolamentos resistivos das fases,  $\lambda_a$ ,  $\lambda_b$  e  $\lambda_c$  definem os fluxos e  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  as correntes de fase. O fluxo magnético do rotor, constante, por ser uma máquina síncrona de ímanes permanentes, é dada por  $F_{PM}$ .

A indutância, ou auto-indutância do estator, para cada uma das fases é definida pela equação 3.30.

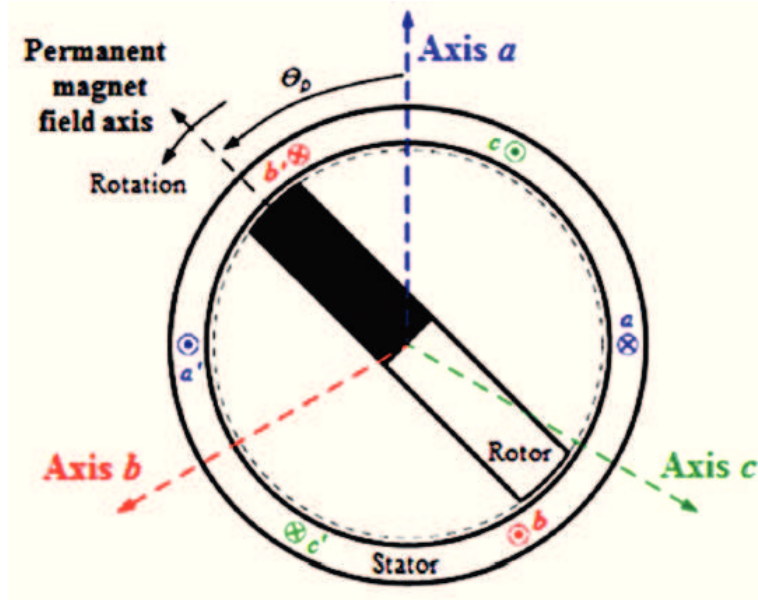


Figura 3.16: Máquina síncrona - tipologia elétrica [9].

$$L_{ii} = -L_s + L_m \cos[2(\theta_e + \alpha_{ii})] \quad (3.30)$$

A indutância mútua entre fases estatóricas, é definida pela equação 3.31.

$$L_{ij} = -M_s + L_m \cos[2(\theta_e + \alpha_{ij})] \quad (3.31)$$

A ligação, ou relação existente entre o campo magnético constante do rotor e os enrolamentos da armadura do estator, são definidos pela equação 3.32

$$k_{iF} = F_{coup} \cos(\theta_e + \alpha_{iF}) \quad (3.32)$$

Na equação 3.30,  $\theta_e$  define o ângulo elétrico entre o eixo da fase  $a$  e o eixo espacial do campo magnético do rotor. A indutância do estator e a sua indutância mútua é dada por  $L_s$  e  $M_s$ , respetivamente. A variação dada pela auto-indutância e a indutância mútua do estator representa-se por  $L_m$ . A variação de  $k_{iF}$  é diretamente proporcional ao fator de relação entre o campo magnético constante do rotor e os enrolamentos da armadura do estator, em que  $F_{coup}$ , tem uma variação entre 0 e 1.

Na tabela 3.4 poderá verificar-se qual a variação e a relação entre a posição dos

Tabela 3.4: Valores angulares  $\alpha_{ij}$  da máquina síncrona de ímãs permanentes [9].

$\alpha_{ij}$		$j$			
		$a$	$b$	$c$	$F$
$i$	<b>a</b>	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{5\pi}{6}$	0
	<b>b</b>	$\frac{\pi}{6}$	$-\frac{2\pi}{3}$	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{2\pi}{3}$
	<b>c</b>	$\frac{5\pi}{6}$	$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3}$

enrolamentos do estator ( $a,b,c$ ) e o campo magnético do rotor ( $F$ ).

A representação dos enrolamentos do estator, interpretadas por  $R_s$  (resistência de fase dos enrolamentos),  $L_s$  (coeficiente de auto-indutância),  $M_s$  (coeficiente de indutância mútua) e  $L_m$  (auto-indutância e indutância mútua), podem ser usadas em PU ou em SI, dependendo da parametrização a utilizar [9].

A definição do binário eletromagnético da máquina síncrona define-se através de  $T_{elet}$ , dado pela equação 3.33, onde  $n_p$  define o número de pólos.

$$T_{elet} = \frac{n_p}{2} F_{PM} \sum_i i_i \frac{\delta L_{iF}}{\delta \theta_e} \quad (3.33)$$

A definição do binário eletromecânico, dado pela equação 3.34 é uma relação entre o binário eletromagnético e o binário mecânico  $T_{mec}$  dado em  $N.m$ .

$$T_a = T_{mec} - T_{elet} = J \frac{\delta \omega}{\delta t} \quad (3.34)$$

De uma forma simplista, poderá indicar-se que a velocidade mecânica de rotação do rotor é dada por  $rad/s$ , e o momento de inércia da turbina definido por  $J$ .

A tipologia de implementação de um gerador síncrono pode ser visto na figura 3.17, com representação de controlos nomeadamente inércia, binário e enrolamentos, que são parâmetros definidos na máquina síncrona "SM58/59" do ATP, estando o modelo implementado internamente na máquina. Assim apenas tem que se fornecer os parâmetros com base em dados de fabricante, nomeadamente através de um dos

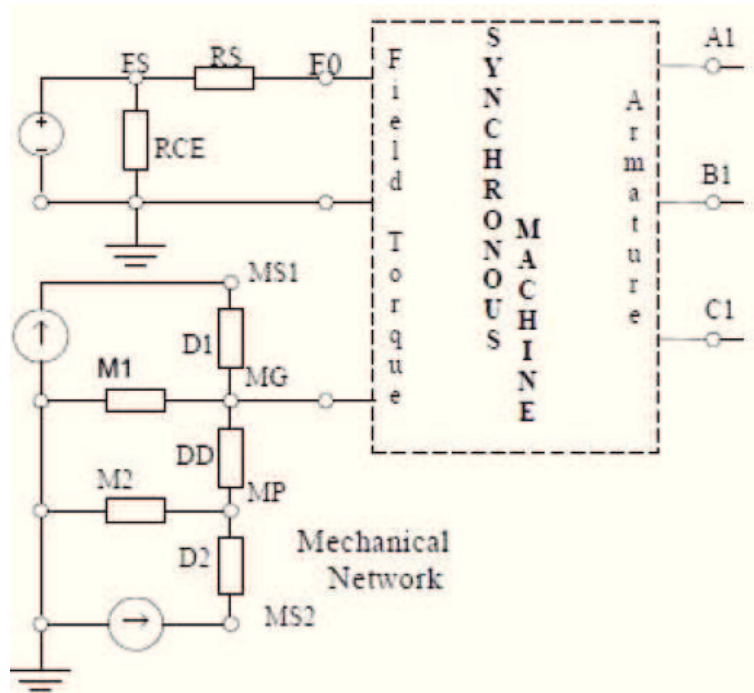


Figura 3.17: Estrutura global máquina síncrona [10].

exemplos que poderão ser verificados em <sup>2</sup>.

### 3.4.1 Máquina síncrona - Controlo AVR

Numa máquina síncrona o controlo da tensão aos seus terminais torna-se uma necessidade, determinada pelas variações de carga das redes. O controlo de tensão das máquinas síncronas tem a denominação de *Automatic Voltage Regulator* (AVR), que define um regulador automático de tensão, que irá realizar uma estabilização da tensão dos terminais dos enrolamentos.

Na figura 3.18 é representado o diagrama de um possível controlo de um gerador de energia síncrono definida pelo IEEE, descrito em [57]. De forma a dar uma melhor explicação do tipo de funcionamento deste controlo implementado, poderá verificar-se na bibliografia [58], que pormenoriza e demonstra as alterações possíveis quando é usado um controlo e quando este não é aplicado.

Na prática, a em ATPDraw, a simulação de um controlo AVR poderá ser definido como demonstra a figura 3.19, baseada em modelo Haginomori [41], com a pretensão de ter uma tensão desejada à saída da máquina síncrona, por intermédio da imposição

<sup>2</sup><http://stamford-avk.com/data-sheets>

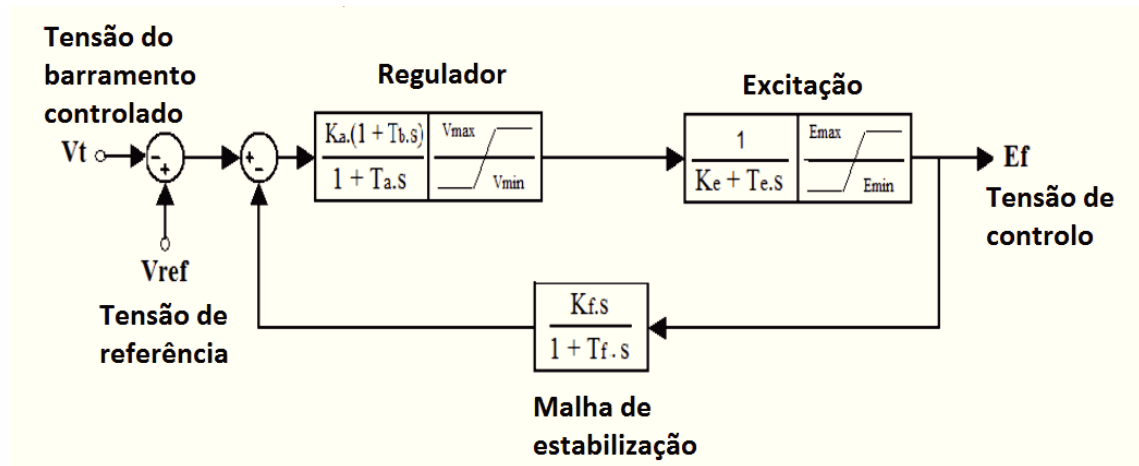


Figura 3.18: Sistema de controlo de excitação - Máquina Síncrona [11].

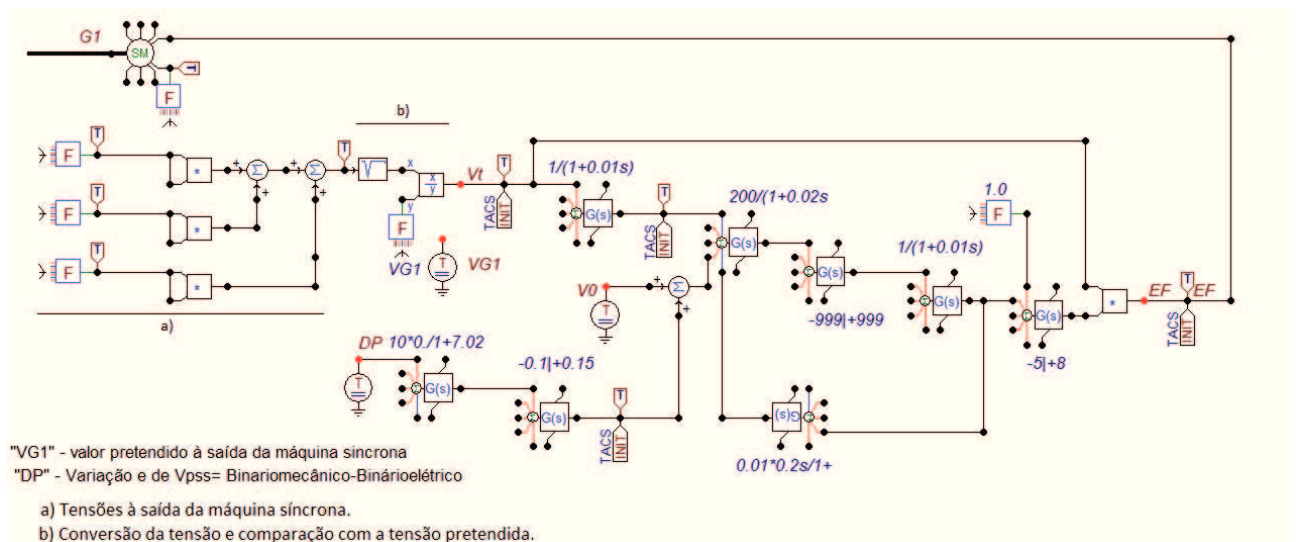


Figura 3.19: Simulação controlo tensão em ATPDraw.

definida pelo controlo AVR, aplicada a uma máquina modelo "SM59" controlada. Na figura 3.20 está representado um modelo de uma observância para aplicar a variação da tensão. No caso exposto, a máquina está definida para 15,5kVrms, e foi solicitada a sua variação para 12,2kVrms. Deste modo poderá verificar-se que a estabilização é mais rápida quanto maior a diferença das duas tensões, inicial e pretendida, garantindo um tipo de resposta, que neste caso simulado é de cerca de 1 segundo.

### 3.4.1.1 Máquina síncrona - Controlo Frequência

Segundo a norma EN 50160 [59], a variação da frequência em Média Tensão "MT", em título de exemplo até 35kV, com interligação de equipamentos síncronos em redes interligadas, a uma frequência industrial de 50Hz, o valor médio da frequência funda-

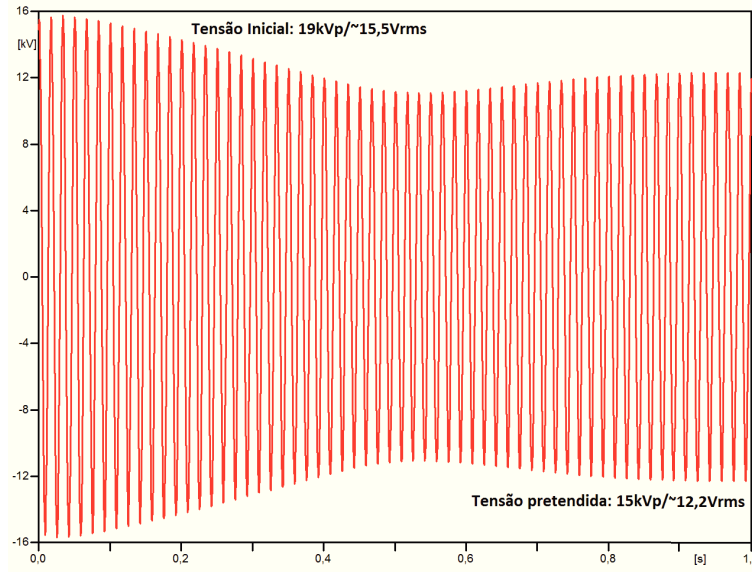


Figura 3.20: Simulação gráfica controlo AVR.

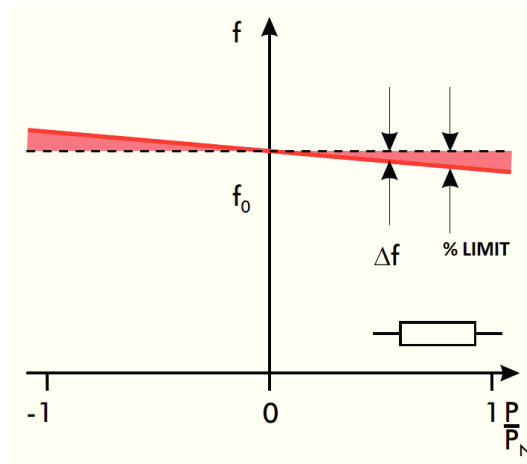


Figura 3.21: Ajuste da frequência da rede [12].

mental fornecida ao cliente utilizador, medida em intervalos de 10s, não deverá ter uma variação superior a  $\pm 1\%$  em cerca de 99.5% de uma semana e não deverá variar mais do que  $-6\%$  e os  $+4\%$  em 100% de uma semana. No caso de redes sem ligação síncrona, ou seja, redes isoladas, a variação poderá ir até  $2\%$  durante 95% de uma semana e até  $\pm 15\%$  em todo o tempo medido, conforme indicado na norma portuguesa [60].

Numa rede elétrica, principalmente se for numa rede isolada, o controlo de frequência é fundamental, visto que um gerador não conseguiria manter a frequência, pois a máquina primária aceleraria ou desaceleraria em função das cargas. Uma das formas de controlo da variação da frequência, poderá ser baseada num sistema de comparação de frequências, da atual e da pretendida. A figura 3.21 representa um gráfico de variação da potência em função da frequência.

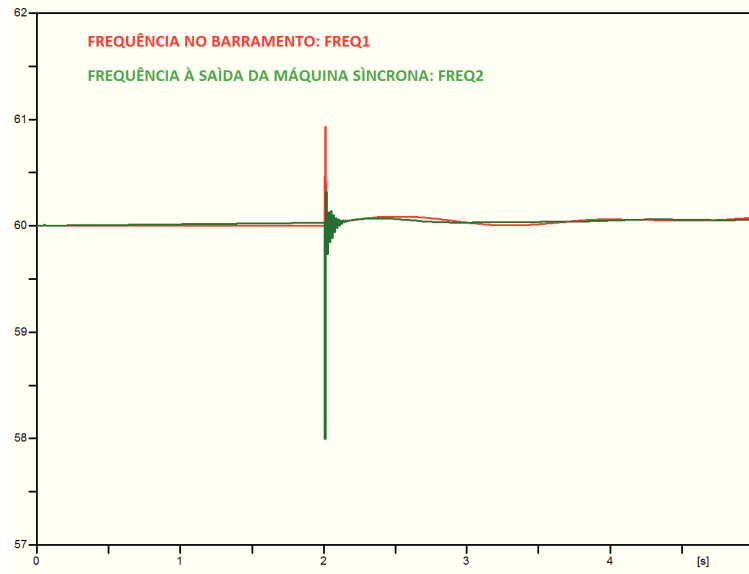


Figura 3.22: Simulação gráfica de controle da frequência.

Numa máquina síncrona, nomeadamente através da implementação do uso de uma SM59 do ATP, máquina a utilizar na simulação, o ajuste da frequência será realizado por intermédio da variação da potência mecânica aplicada à máquina, redefinindo-a consoante os níveis de frequência aos seus terminais.

Na figura 3.22, a título de exemplo, é representada a frequência aos terminais de uma máquina síncrona acoplada a uma rede. Ao efetuar o desacoplamento de uma carga ( $t=2\text{seg.}$ ), verifica-se que a frequência tende a aumentar. O ajuste pretendido, realizado nesta dissertação, permite a redefinição da potência a injetar na máquina, para tentar repor a frequência dentro dos níveis iniciais.

Para efetuar o controlo da frequência dentro dos valores permitidos, desenvolveu-se um código em MODEL do ATP, que efetua a medição da frequência aos terminais da máquina síncrona, comparando-a com a frequência pretendida. Se a sua variação for superior a um determinado valor, será efetuado um reajuste da potência mecânica injetada na máquina síncrona.

O código desenvolvido para efetuar o controlo da frequência e por conseguinte a estabilidade da tensão na rede, através da variação da Potência Mecânica da máquina síncrona, está apresentada no apêndice B.3.

Uma outra forma de efetuar o controlo da frequência baseado na variação da potência, poderá ser verificado conforme o diagrama de blocos de modelos definidos nas normativas IEEE [61], verificado na figura 3.23. Para a implementação desse controlo,

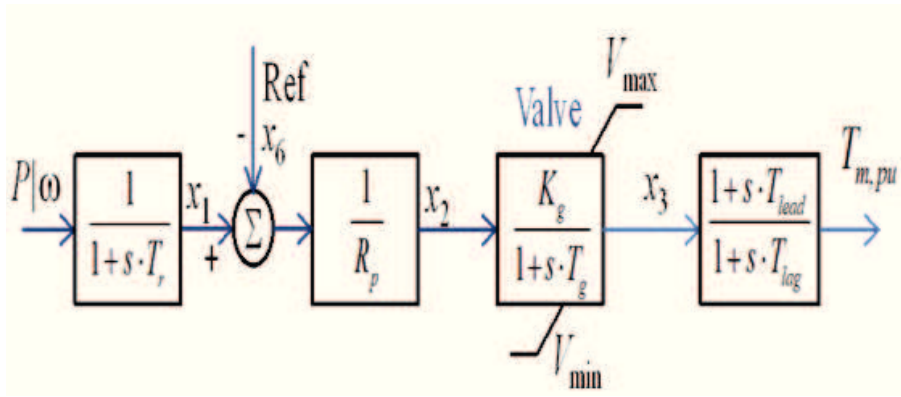


Figura 3.23: Sistema de controlo de potência mecânica/binário.

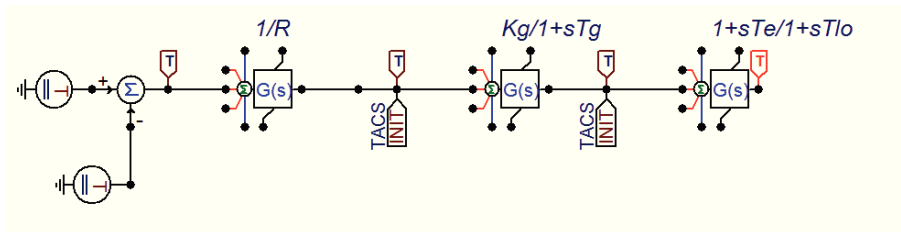


Figura 3.24: Controlo proporcional de binário

foi efetuado um esquema em ATP demonstrado na figura 3.24 para substituição do controlo em *MODEL* que se torna mais lento do que este controlo proporcional.

### 3.5 Modelação de um máquina assíncrona

A tipologia de implementação de uma máquina assíncrona pode ser vista na figura 3.25, que tem o controlo representado por uma carga mecânica, podendo ser uma forma simplificada de uma máquina primária, representada pela analogia binário-corrente. A representação do binário, de carga ou motriz (dependendo se positivo ou negativo) é baseado numa fonte de corrente. A resistência "M1", representa o inverso do coeficiente de atrito e a capacidade "D1" e "D2" representa o seu momento de inércia. A definição do binário é representada pela fonte de corrente e pela resistência infinita "T" [10].

Um gerador assíncrono trifásico, tem uma representação elétrica conforme representada na figura 3.26.

As equações 3.35, 3.36, 3.37, representam respetivamente, o vetor tensão do estator ( $\vec{v}_s$ ), vetor tensão do rotor ( $\vec{v}_r$ ) e a equação de binário, segundo um referencial ortonormado "d - q", com dois eixos, pelo que todos os vetores possuem uma compo-

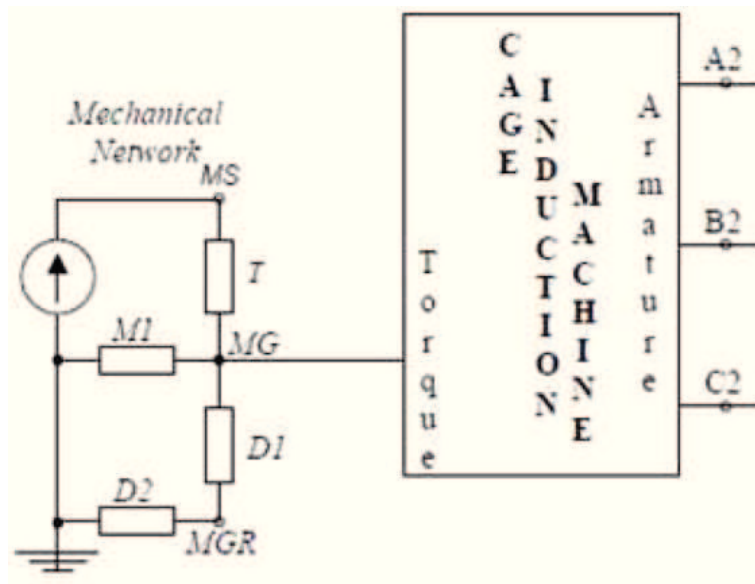


Figura 3.25: Estrutura global máquina assíncrona [10].

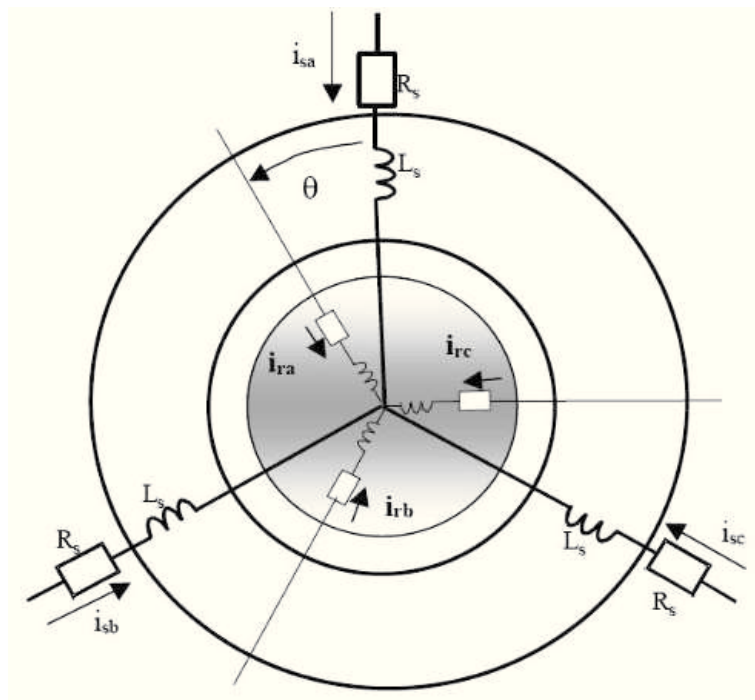


Figura 3.26: Máquina assíncrona - tipologia elétrica [13].

nente segundo "d" e uma componente segundo "q" [62]. Os índices  $s$  e  $r$ , representam grandezas do estator e do rotor. Os fluxos de indução são representados pela letra  $\lambda$ . Nas equações,  $\omega_r$ ,  $\omega_{eixos}$ ,  $T_e$ ,  $T_l$ , representam respetivamente, velocidade de rotação do rotor, a velocidade da referência  $dq$ , o binário eletromagnético e o binário de carga.

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + \dot{\vec{\lambda}}_s + j\omega_{eixos} \vec{\lambda}_s \quad (3.35)$$

$$\vec{v}_r = R_r \vec{i}_r + \dot{\vec{\lambda}}_r + j(\omega_{eixos} - \omega_r) \vec{\lambda}_r \quad (3.36)$$

$$\frac{2J}{P} \dot{\omega}_r = T_e - T_l \quad (3.37)$$

O número de pólos magnéticos é representado por,  $P$  e a inércia do rotor por  $J$ . As relações dos fluxos eletromagnéticos com as correntes nos enrolamentos são dados pelas equações: 3.38, que define o vetor de fluxo do estator; 3.39, que define o vetor de fluxo do rotor. A equação 3.40 representa o binário eletromagnético.

$$\vec{\lambda}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \quad (3.38)$$

$$\vec{\lambda}_r = L_m \vec{i}_r + L_r \vec{i}_r \quad (3.39)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{rd} i_{sq} - \lambda_{rq} i_{sd}) \quad (3.40)$$

No enquadramento, enquanto o motor não conseguir superar a inércia inicial estará a funcionar como motor. Após isso, caso a representação da máquina primária injete binário suficiente, a máquina passará a funcionar como gerador, tornando negativo o binário eletromagnético [63].

A 3.27 apresenta a representação em ATPDraw de uma máquina assíncrona, no caso, com os parâmetros adequados a máquina aplicável a uma máquina de rotor em gaiola. Na figura acima referida, a representação da fonte DC gere o Binário de Carga,

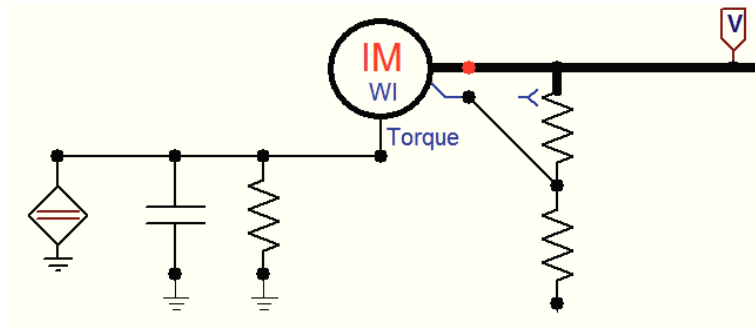


Figura 3.27: Representação de uma máquina assíncrona em ATPDraw, como modelo Windsyn.

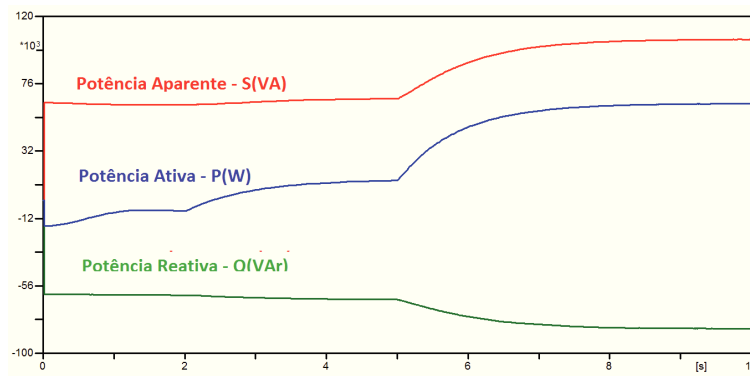


Figura 3.28: Simulação gráfica energia - máquina assíncrona - ATP.

o condensador gere o Momento de Inércia e a Resistência gere o Atrito, e o seu conjunto define a carga mecânica aplicável ao motor assíncrono [18].

Na figura 3.28, é visível o funcionamento da máquina assíncrona, que num período inicial funciona como motor enquanto não é aplicado binário pela máquina primária, passando a funcionar como gerador assim que o binário aplicado ultrapassar as perdas existentes. Na simulação apresentada, verifica-se que a máquina assíncrona funciona como motor até aos 2 segundos, sendo posteriormente aplicado um binário mínimo, que se torna suficiente para compensar o atrito e as perdas, e que a leva a funcionar como gerador. Após os 5 segundos, a aplicação de um binário mais elevado faz aumentar ainda mais o fornecimento de energia ativa.

# Capítulo 4

## Análise de microrredes interligadas e isoladas

Para a simulação de fenómenos transitórios e para a verificação de perturbações em microrredes foi simulada em ATPDraw uma rede baseada numa rede padrão IEEE, com 30 barramentos, doravante denominada de IEEE-30. A rede tem ramos de 132kV com geradores de energia e cargas associadas, tendo outras zonas de 11kV e 33kV. Na figura 4.1 <sup>1</sup> está representado o diagrama da rede de 30 barramentos, composta no original por 41 linhas, 6 geradores e 20 cargas distribuídas pelos barramentos, definindo um consumo total de 335 MW [64].

A referida rede é uma rede de testes trifásica com cargas equilibradas e com uma frequência de funcionamento definida de 60Hz, representando uma parte do sistema elétrico da zona centro-oeste dos EUA, à data de dezembro de 1961. Foi elaborada por Dabbagchi, colaborador da *American Electric Power* (AEP), tendo sido compilada no formato *Common Data Format* (CDF) em agosto de 1993 por Rich Christie professor da Universidade de Washington <sup>2</sup>.

A rede em estudo, tem linhas subterrâneas, aéreas e isoladas, tendo sido escolhida por ser uma rede bastante completa ao nível da sua diversidade tornando permissível realizar estudos e simulações a vários níveis, nomeadamente estudos de funcionamento em rede isolada ou interligada, bem como verificação de comportamentos e estabilidade [64].

---

<sup>1</sup>[https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg\\_tca30bus.htm](https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm)

<sup>2</sup>[https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg\\_tca30bus.htm](https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm)

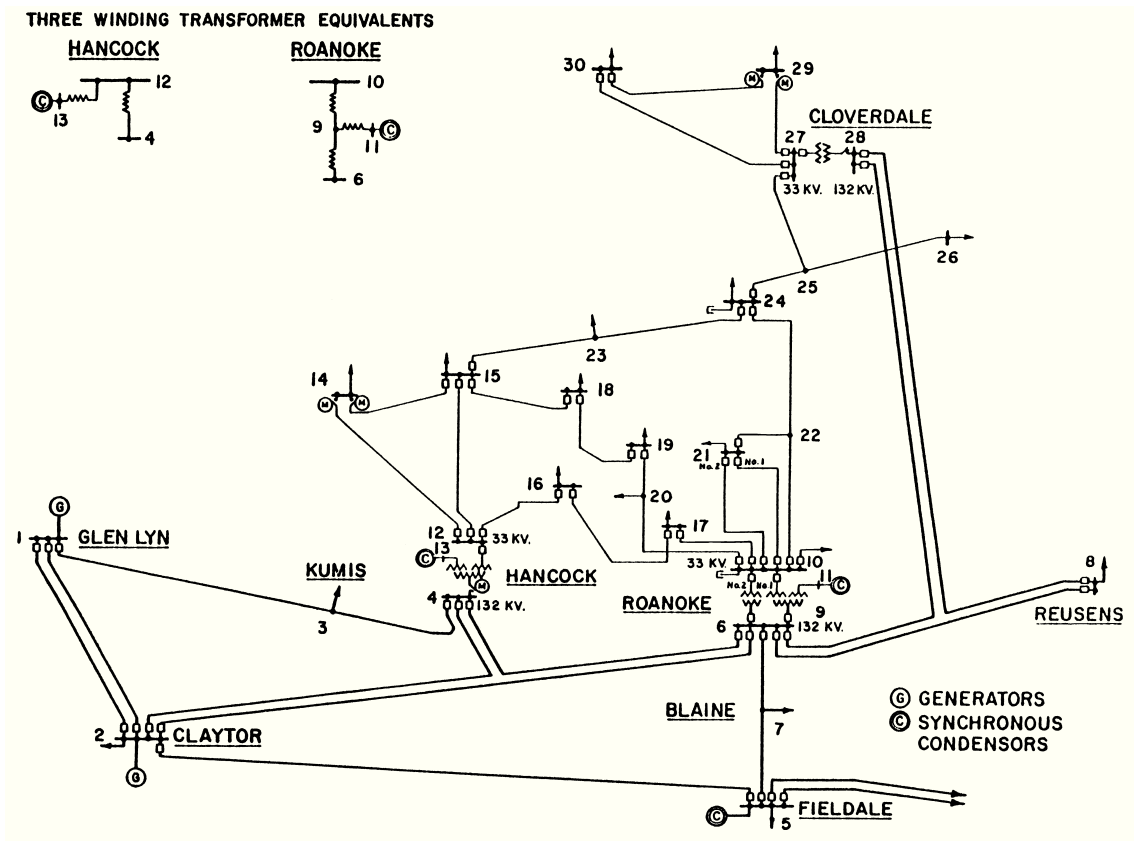


Figura 4.1: Diagrama de distribuição da rede IEEE de 30 barramentos.

## 4.1 Modelação de uma rede de distribuição

A rede IEEE-30 usada, tal como anteriormente mencionado, tem vários níveis de tensão de funcionamento. A modelação da rede foi definida de forma a conseguir ter patamares de tensões distintos, para dar observância principalmente a uma rede de transporte, de 132kV, que alimenta uma rede de distribuição maioritariamente de 33kV. De forma a dar cumprimento ao objetivo proposto, a rede tem zonas com tensões de funcionamento de 33kV, correspondendo a redes de distribuição, que podem eventualmente colocadas a funcionar de forma isolada, ou seja, como microrrede. Na figura 4.2, está representada a rede original simulada em ATP, com alterações definidas ao nível da introdução de dois geradores para garantir a estabilidade do sistema aquando da colocação em funcionamento de forma isolada da microrrede, nomeadamente nos barramentos 21 e 27. A utilização dos softwares PowerWord e MATPower, foi determinante para verificar os fluxos de energia na rede original, e garantir que não existem desequilíbrios de fluxo em determinados pontos da rede, tornando impossível o seu funcionamento.

Para a simulação das linhas elétricas, de transporte e de distribuição foram utilizados modelos de linha com parâmetros distribuídos, mas invariantes na frequência.

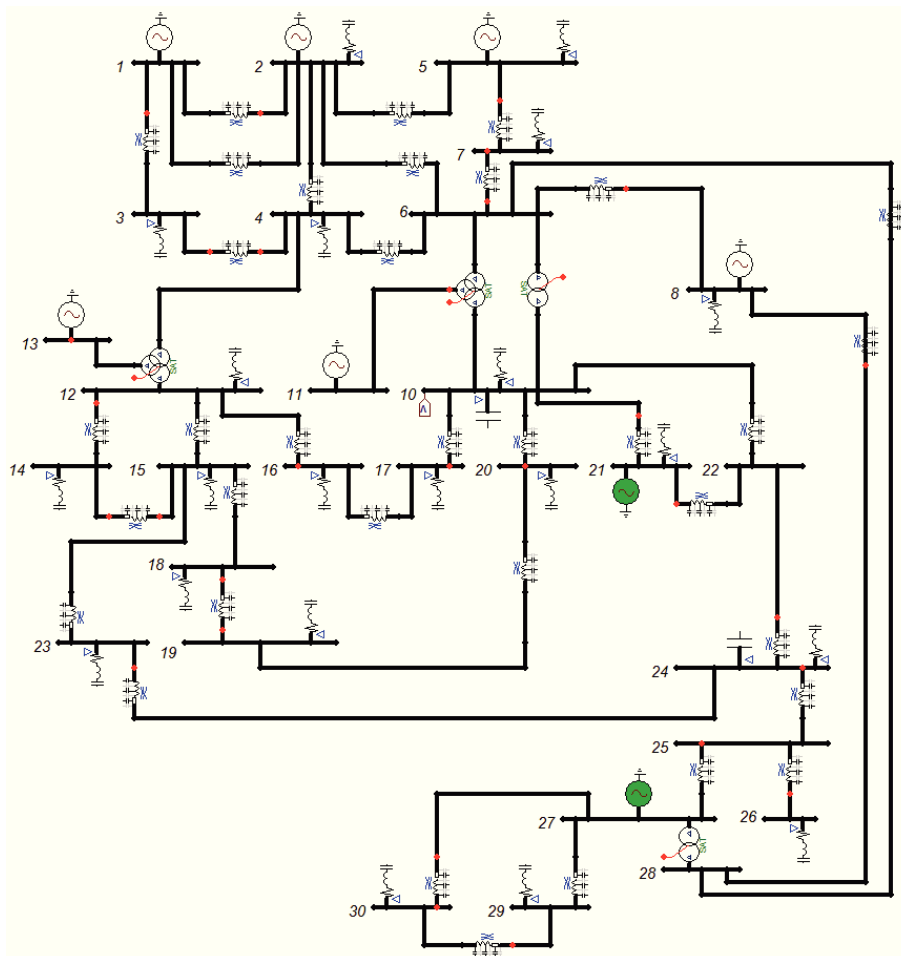


Figura 4.2: Modelação da rede IEEE 30 Barramentos em ATP.

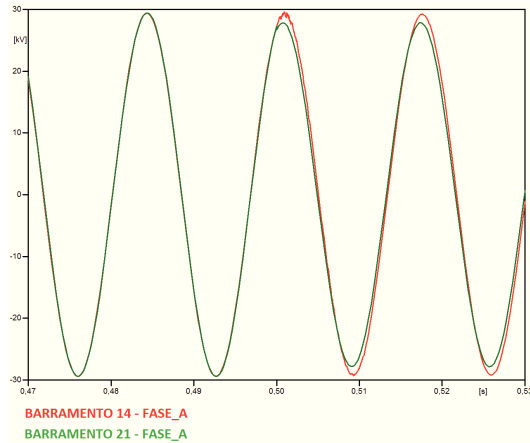


Figura 4.3: Introdução de fontes iniciais, pré-isolamento.

A simulação interna, ou seja, as rotinas matemáticas e as fórmulas de cálculo usadas para simular a rede em ATP, podem ser verificadas no RuleBook do EMTP/ATP na bibliografia [10].

## 4.2 Rede interligada

Na figura 4.3, aos 0.5seg. foram interligadas fontes de energia no barramento 21 e barramento 27, de forma a preparar a rede para funcionar posteriormente em modo microrrede. Os defasamentos e as tensões das fases, foram definidos segundo as tensões e fases apresentadas na tabela IEEE 30 barramentos, representada no apêndice A.1, adaptado ao modelo de linhas utilizado no ATPDraw. Foi verificada a tensão nos barramentos 14, sendo este o barramento mais distante das interligações que vão ser estudadas, e o barramento 21 que será um dos mais próximos das interligações a serem realizadas.

O código desenvolvido para efetuar o controle da frequência e por conseguinte a estabilidade da tensão na rede, através da variação da Potência Mecânica da máquina síncrona está apresentada no apêndice B.3.

Em contexto de explicação, a tabela 4.1 demonstra os valores estabilizados da rede. Verificado-se a redução da tensão, que é motivada pela alteração dos fluxos de potência, nomeadamente de energia reativa.

Tabela 4.1: Explicação da figura 4.3.

<b>Período temporal:</b>	<0.5 seg.		>0.5 seg.	
<b>Barramento em análise:</b>	14	21	14	21
<b>Tensão no Barramento (pico):</b>	29.38 kV	29.42 kV	29.23 kV	27.83 kV

### 4.3 Rede isolada

Com o objetivo de verificar o funcionamento da rede em regime transitório e em regime equilibrado, mas desagrupado da rede de transporte, ou seja, em regime isolado, a rede em questão teve que ser adaptada conforme descrito no capítulo 3. Ao isolar a rede, é necessário garantir que a rede tem condições para funcionar de forma isolada, garantindo valores adequados de tensão e frequência. Para que a resposta estável se mantenha, conforme mostra a figura correspondente, quando é colocada a rede de forma isolada (considerados os 0.5 segundos de simulação), conforme figura 4.6, a tensão nos barramentos sobe, devido à compensação necessária proveniente das fontes existentes. Desta forma verifica-se que aumenta a energia reativa produzida pelas fontes, tanto em funcionamento de forma instável, quer em desequilíbrio, conforme figura 4.4 <sup>3</sup>.

Para garantir que a sub-rede de distribuição tenha possibilidade de funcionar de forma isolada, foram introduzidas fontes que não existiam no modelo original IEEE-30. A viabilidade de alteração foi confirmada por simulação da rede com o *PowerWorld*, simulado nas duas situações de funcionamento. Na figura 4.5 poderá verificar-se o desenvolvimento e a alteração mínima possível, para garantir o funcionamento da rede em regime permanente, demonstrando os novos trânsitos de potência.

Na figura 4.6 está representada a tensão em dois barramentos distintos, o 14 e o 21, quando a rede é colocada em funcionamento isolado. Anteriormente já tinha sido verificada a estabilidade da rede em funcionamento isolado, conforme verificação na figura 4.5, onde foram desligadas todas as fontes do barramento de alta tensão.. Do mesmo modo que o anterior, na rede interligada foi verificada a tensão nos barramentos 14, barramento mais distante das interligações em estudo, e no barramento 21, considerado o mais perto das interligações a serem realizadas. De notar que já foi avaliada a simulação com as fontes inicialmente introduzidas nos barramentos 21 e 27.

Da mesma forma que na rede interligada, e pela demonstração da tabela 4.2, ao variar os fluxos, o trânsito de potência faz alterar a circulação do fluxo de energia

<sup>3</sup><http://icseg.iti.illinois.edu/ieee-30-bus-system/>

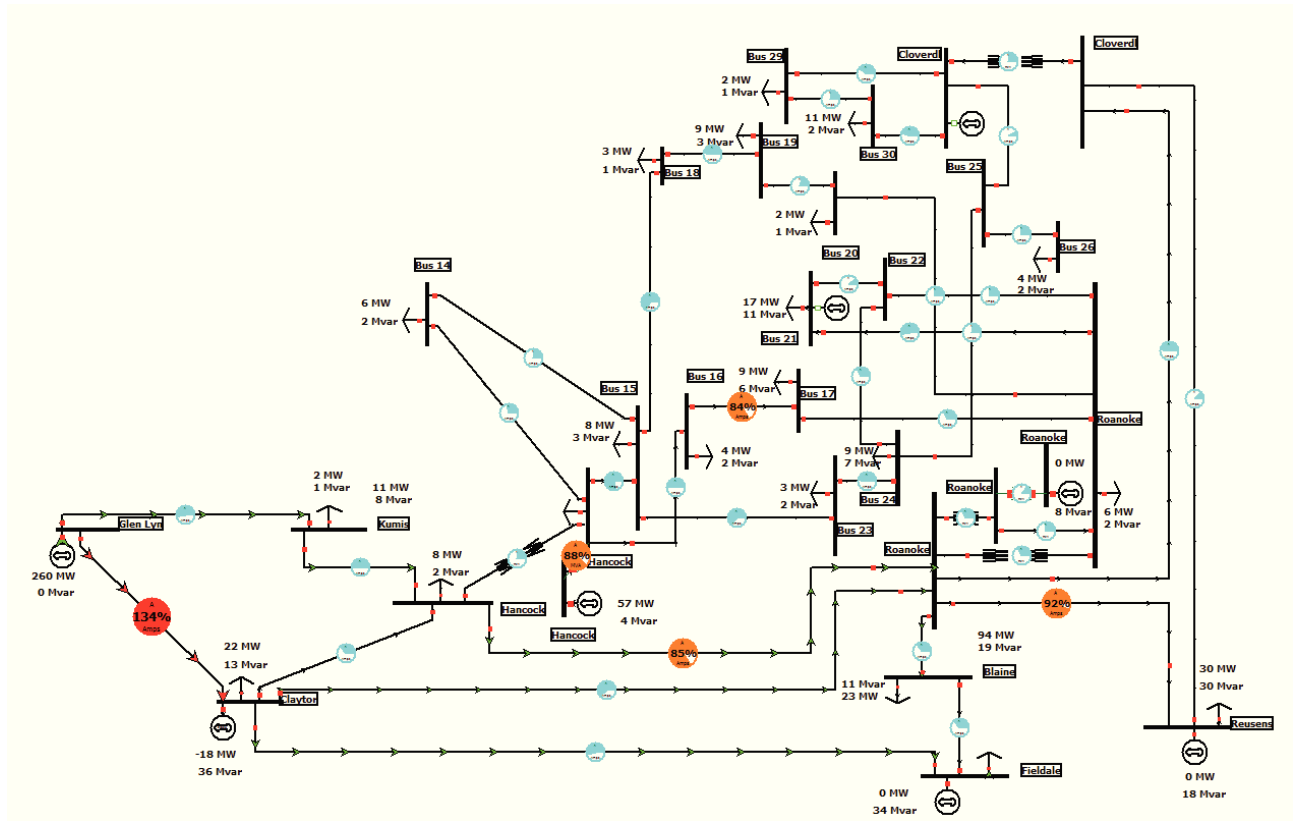


Figura 4.4: Estabilidade inicial - PowerWorld.

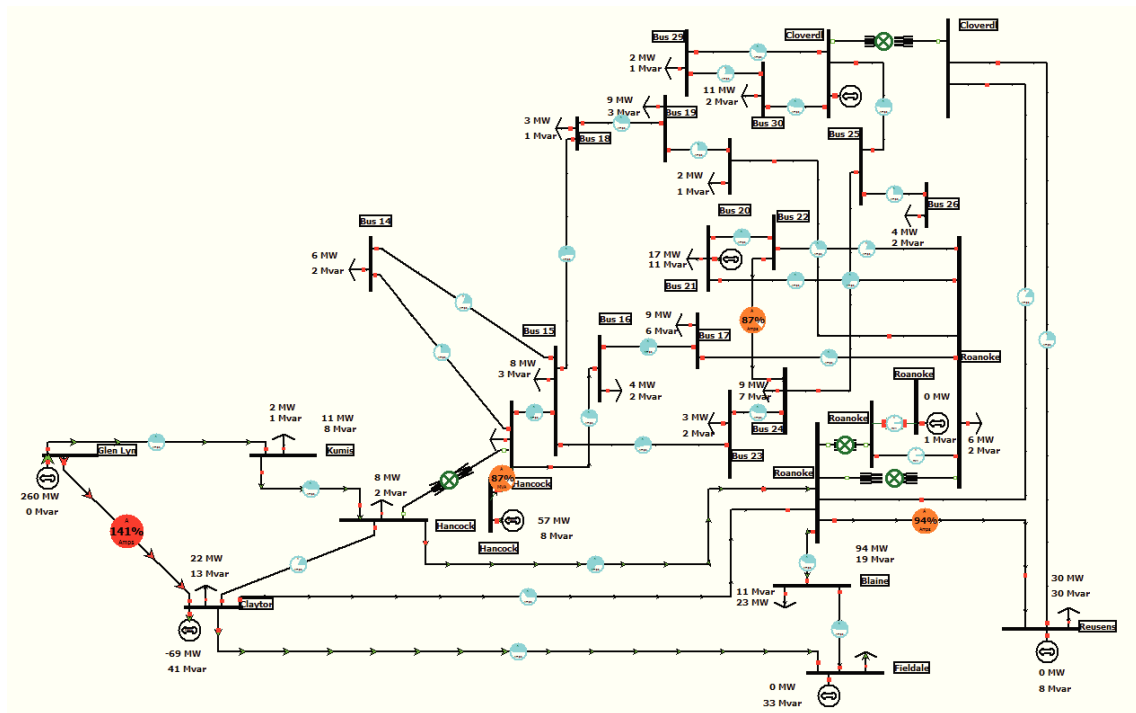


Figura 4.5: Funcionamento com a sub-rede isolada - PowerWorld.

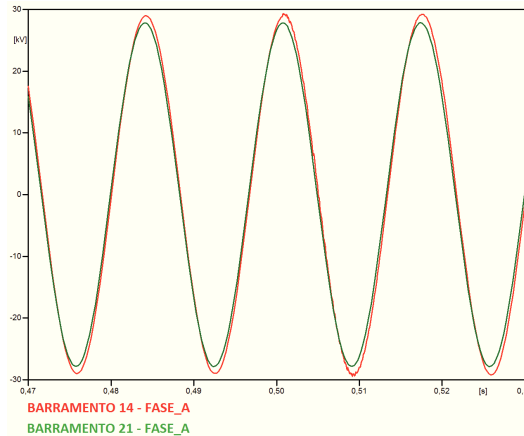


Figura 4.6: Funcionamento da rede IEEE 30 Barramentos em microrrede.

Tabela 4.2: Explicação da figura 4.6.

<b>Período temporal:</b>	<0.5 seg.		>0.5 seg.	
<b>Barramento em análise:</b>	14	21	14	21
<b>Tensão no Barramento (pico):</b>	29.96 kV	29.83 kV	29.20 kV	27.77 kV

reativa, para compensar a falta de fontes, ou redução da tensão, provocando uma pequena variação da tensão nos barramentos.

As simulações realizadas em PowerWorld, acima mencionadas, foram relevantes para conseguir verificar os comportamentos das redes antes e depois das suas alterações, nomeadamente: verificar o funcionamento normal da rede IEEE-30; interligação de fontes em locais específicos de forma a manter a rede em regime estacionário o mais equilibrada possível, através da introdução de fontes no barramento 21 e 27.

## 4.4 Simulação de rede com modelos de máquinas síncronas

A simulação da rede em regime transitório só faz sentido se se simularem os fenómenos dinâmicos que ocorrem nos geradores, implicando assim a inserção dos modelos das máquinas.

No circuito simulado em ATP, ilustrado na figura 4.7, inseriram-se geradores em paralelo com as fontes ideais inicialmente existentes, por conveniência, embora só uma delas seja colocada em funcionamento, numa dada simulação. Refere-se que nas simu-

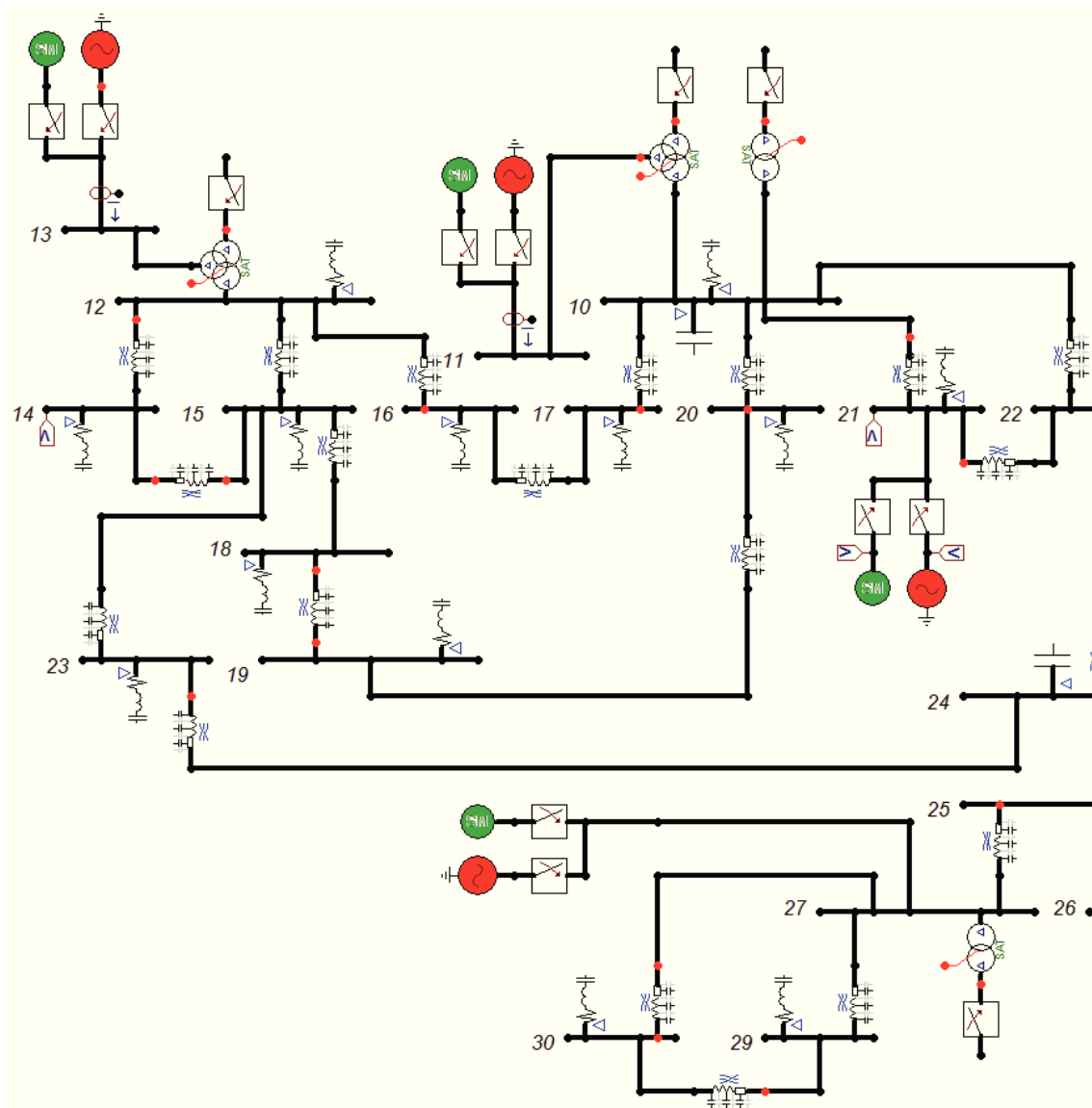


Figura 4.7: Rede IEEE-30 com a possibilidade de usar fontes ideais ou modelos de geradores, dependendo da definição de comutação dos disjuntores associados.

lações seguintes, as fontes ligadas e comutadas foram sempre as síncronas, mantendo as ideias desligadas.

Na figura 4.8 é apresentada a tensão nos barramentos 14 e 21, que demonstram o estado inicial das tensões apenas com fontes síncronas a alimentar a rede. De referir que os valores eficazes são equivalentes às tensões das fontes ideais, representadas nos barramentos 14 e 21 tendo os valores de 29.20kV e 27.83kV de pico, respetivamente.

Na figura 4.9 foi introduzido aos 2 segundos, uma máquina síncrona controlada no barramento 22. Na verificação da rede, analisa-se que existe uma pequena alteração da amplitude da tensão, mas não significativa, e que no momento da interligação apenas

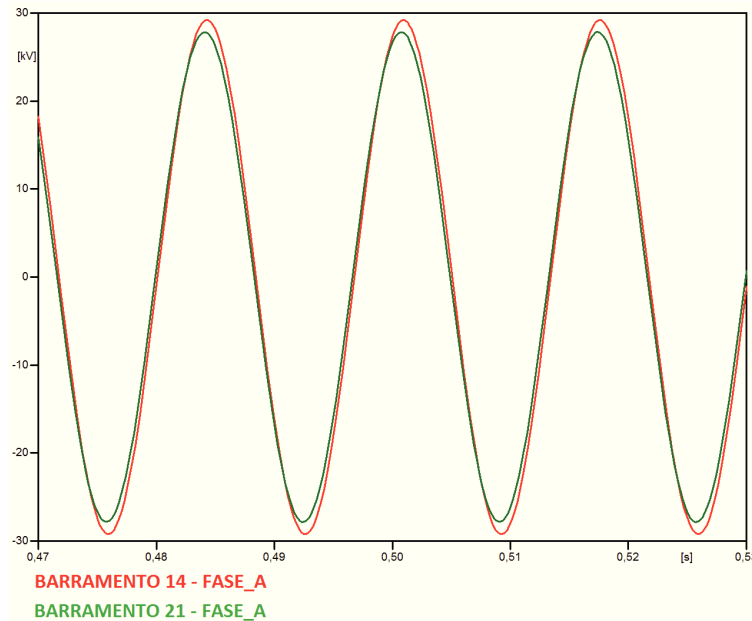


Figura 4.8: Tensões de barramentos com a introdução de fontes síncronas.

existe um pequeno distúrbio, que depois é dissipado e absorvido.

Nos gráficos da figura 4.10, verifica-se o fornecimento de energia aos barramentos 21 e 22, respetivamente. Inicialmente apenas a fonte existente no barramento 21 está a fornecer energia. Em  $t=1s$  é interligada a máquina controlada síncrona, verificando-se uma redução do fornecimento na fonte 1, voltando a estabelecer-se o equilíbrio de potências. Aos 4 segundos é desligada a fonte síncrona existente no barramento 21, correspondendo ao isolamento da sub-rede que passa a ficar alimentada apenas pela máquina interligada no barramento 22. Aos 8 segundos é ligado novamente a fonte do barramento 21, mas como a máquina síncrona está a fornecer, esta mantém-se estável.

Aos 11 segundos desliga-se a máquina controlada, provocando um desequilíbrio na rede, verificado por exemplo num dos barramentos mais distante, barramento 14, perdendo-se o sincronismo que estava mantido. Desta forma é provocado um aumento de tensão para compensar o abaixamento da frequência, conforme mostra a figura 4.11.

De forma a explicar o fenómeno anterior de desequilíbrio, a figura 4.12 demonstra a compensação da máquina controlada, para garantir a estabilidade da frequência, controlando o binário aplicado, caso contrário como demonstrado na figura 4.11, a frequência poderia variar, provocando uma alteração de fluxo de potência e de energia reativa, provocando desequilíbrios e colapsos. Esses desequilíbrios aconteceriam por não existir controlo da frequência e não ter máquinas assíncronas acopladas à rede. No entanto, seria possível a existência de máquinas assíncronas desde que fossem as-

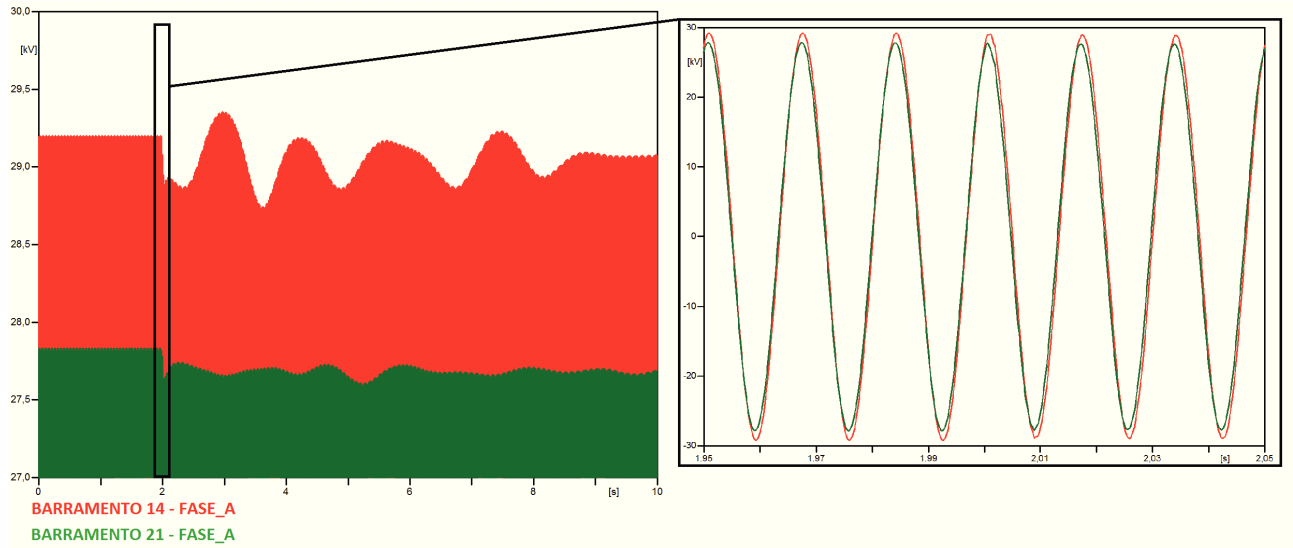


Figura 4.9: Interligação de máquina síncrona no barramento 22.

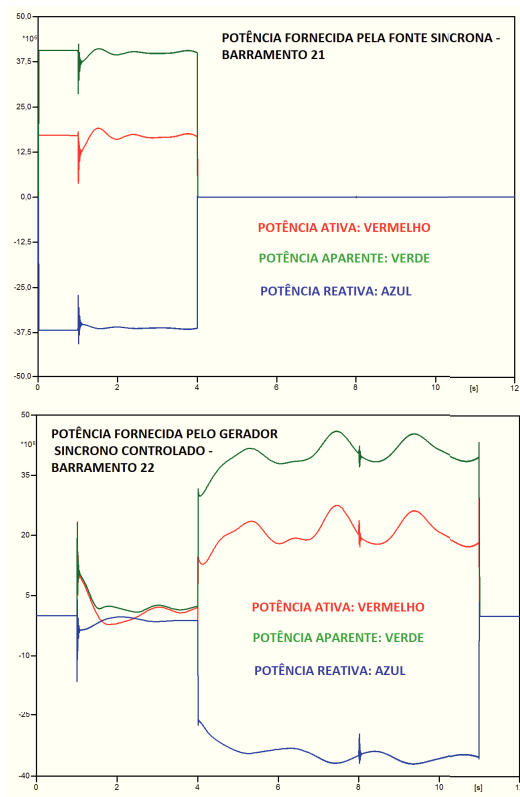


Figura 4.10: Potências injetadas no barramento 21 e 22 em simulação.

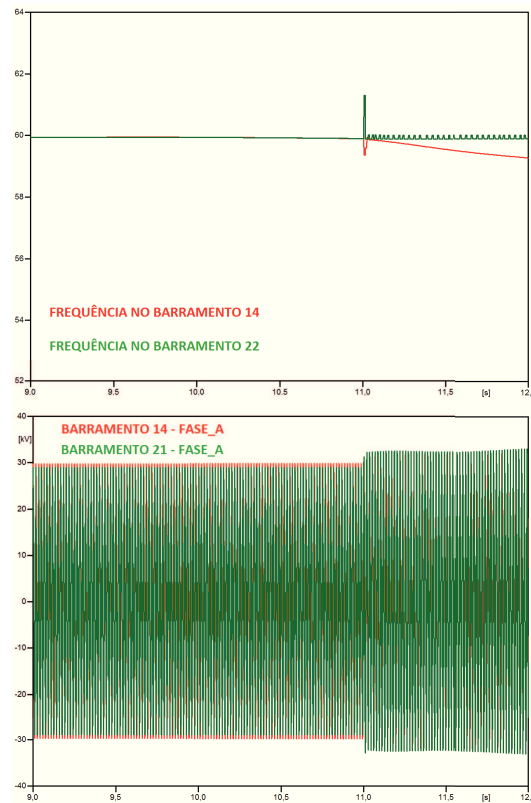


Figura 4.11: Desequilíbrios por não existir controle da frequência.

Tabela 4.3: Valores de tensões em situação transitória referente à figura 4.13.

<b>Período temporal:</b>	<4 seg.		>4 seg.	
<b>Barramento em análise:</b>	14	21	14	21
<b>Tensão no Barramento (pico):</b>	29.00 kV	27.70 kV	29.62 kV	29.10 kV

síncronas do tipo ventilador ou bomba, ou seja, com potência de carga em função da velocidade, que provocam a variação da potência em função da sua frequência. Sendo diferenciadas das demais cargas consideradas fixas, que não variam a potência. A estabilidade da frequência resulta da atuação do controlador da máquina, que deverá injetar mais potência para compensar a perda da interligação à rede de transporte, com base igualmente no mesmo tipo de controle definido na máquina síncrona. Na simulação através do ATP com utilização da máquina assíncrona do tipo "Induction WI", esse controle da frequência é feito internamente, através de parâmetros introduzidos.

Na figura 4.13 verificam-se as alterações nas tensões nos barramentos 14 e 22, ao desligar a fonte síncrona tipo, sendo demonstrada na tabela 4.3 as tensões antes e depois do fenómeno.

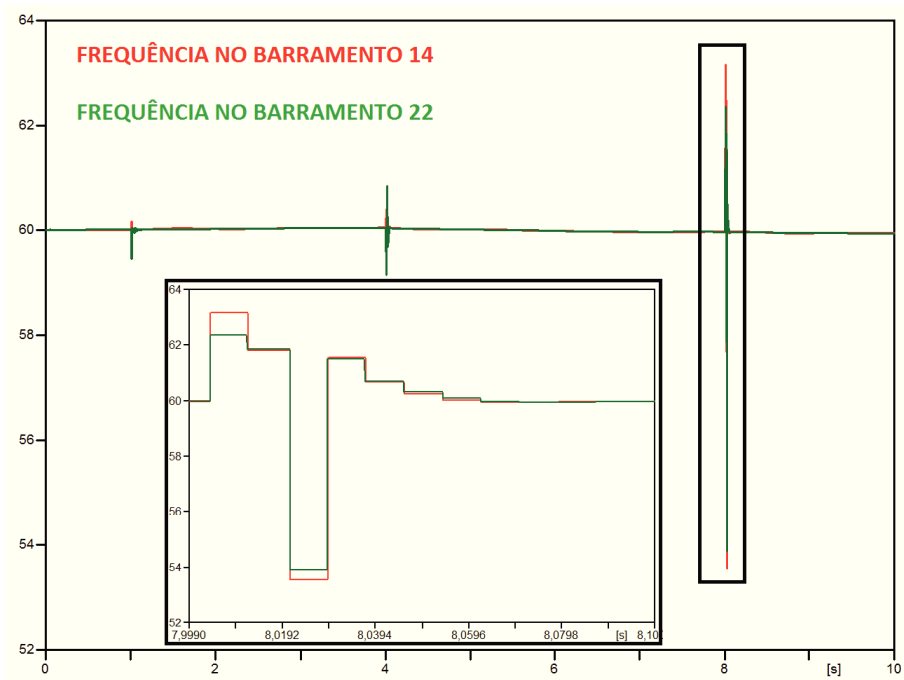


Figura 4.12: Frequência no barramento 14 e 22 em transitórios.

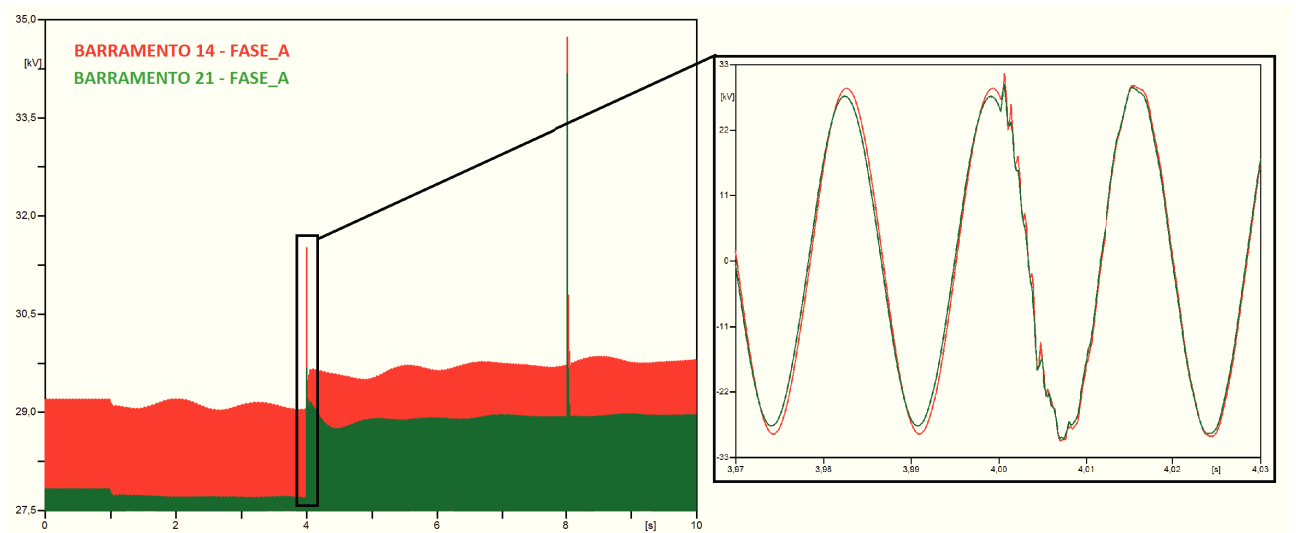


Figura 4.13: Tensões nos barramentos 14 e 21 em transitórios.

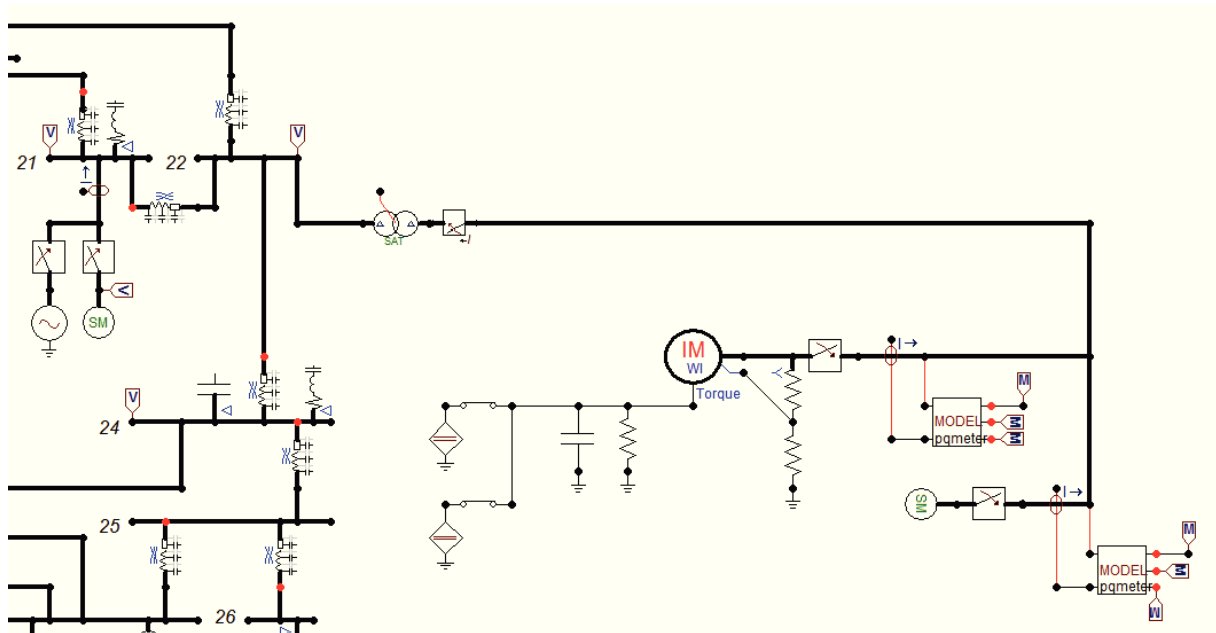


Figura 4.14: Interligação da máquina assíncrona à microrrede.

## 4.5 Rede isolada com gerador assíncrono

De forma a analisar a diferença do tipo de gerador usado, repetiu-se a simulação da rede, mas desta vez usando o fornecimento da potência entregue através de um gerador assíncrono. Na figura 4.14 representa-se a forma de interligação à microrrede de uma máquina assíncrona.

Na figura 4.15 é representada a tensão nos barramentos 14 e 21, em situações de comportamento do estudo. De forma a efetuar uma análise e interpretação, descreve-se o funcionamento e os respetivos *timings* de acontecimentos:

- "Até 1 segundo" - a máquina controlada está desligada da rede, sem aplicação de qualquer binário;
- "Aos 1 segundo" - a máquina assíncrona é ligada ao gerador de apoio para deixar de funcionar isoladamente, como não tem binário aplicado, funciona como motor;
- "Aos 3 segundos" - é aplicado binário à máquina assíncrona, passando a funcionar como gerador, por intermédio da aplicação de binário suficiente para ultrapassar a velocidade de sincronismo;
- "Aos 4 segundos" - a máquina assíncrona é ligada à rede através do barramento 22, por conversão de tensão por transformador;

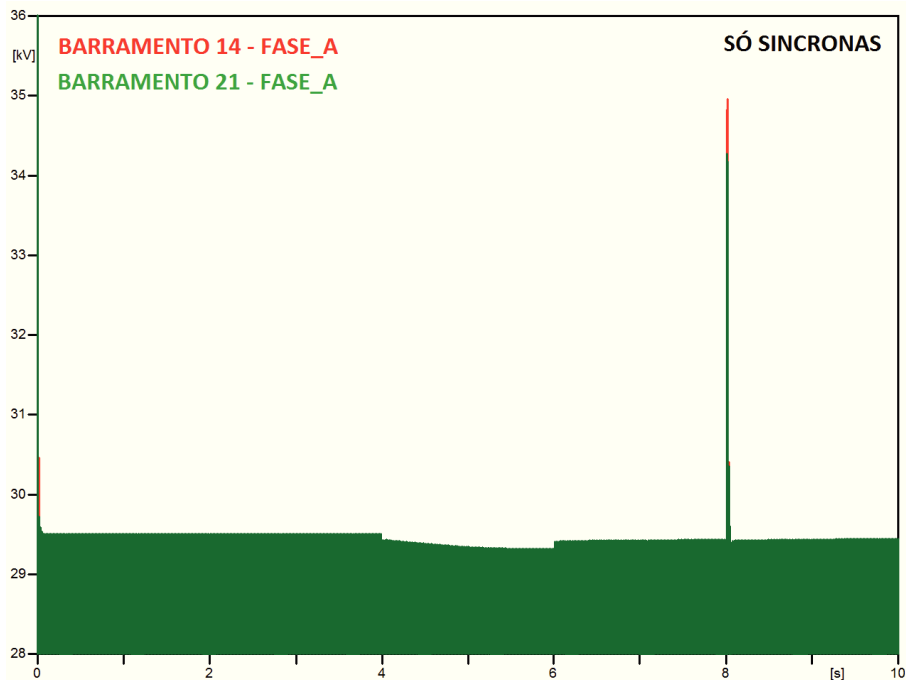


Figura 4.15: Tensão nos barramentos 14 e 21 com ligação de máquina assíncrona.

- "Aos 5 segundos" - é aumentado o binário motriz;
- "Aos 6 segundos" - é desligado o gerador de apoio;
- "Aos 7 segundos" - é desligada a alimentação da fonte no barramento 21;
- "Aos 8 segundos" - é ligada novamente a fonte no barramento 21;
- "Aos 9 segundos" - é desligada a máquina assíncrona da microrrede.

Na figura 4.16 verifica-se a variação da frequência. De realçar que existe apenas uma pequena oscilação quando uma fonte da microrrede é interligada.

Na figura 4.17 verifica-se que a fonte de apoio em funcionamento acompanha as necessidades e limites impostos dentro da própria máquina, compensando as necessidades da máquina assíncrona controlada. Em situação de utilização exclusivamente de máquinas assíncronas, como a fonte não tem limites, estas vão fornecer tudo o que poderá ser possível.

No gráfico 4.18 complementa-se a análise dos tempos e acontecimentos temporais na simulação. É de realçar a diferenciação entre os modelos, onde apenas existe desequilíbrios na máquina síncrona, quando esta liga à microrrede e apenas com a existência de alterações das cargas, neste caso, quando é desligado um gerador perto da mesma.

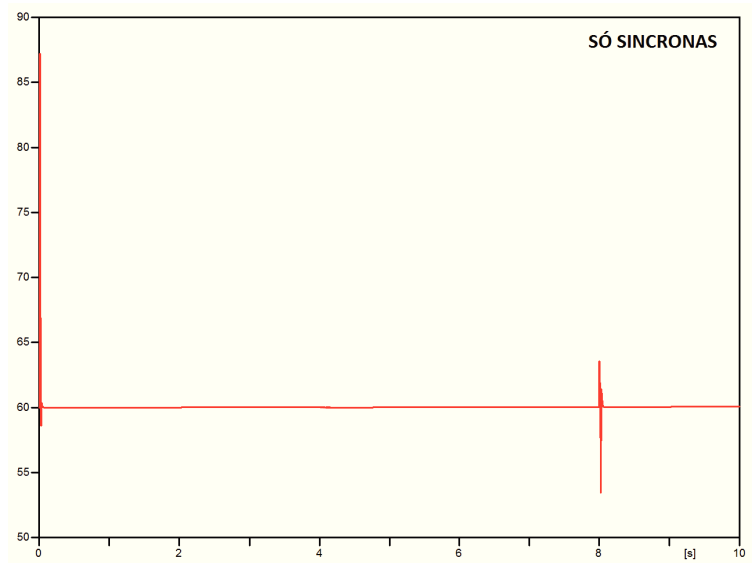


Figura 4.16: Frequência da microrrede vista no barramento 14.

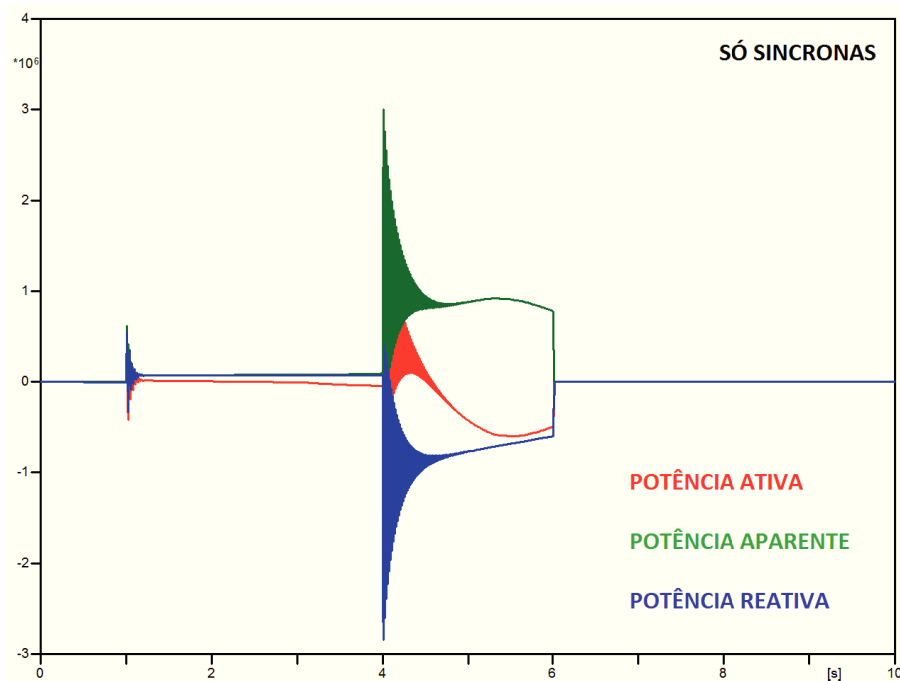


Figura 4.17: Débito de potências fornecidas pelo gerador de apoio da máquina assíncrona.

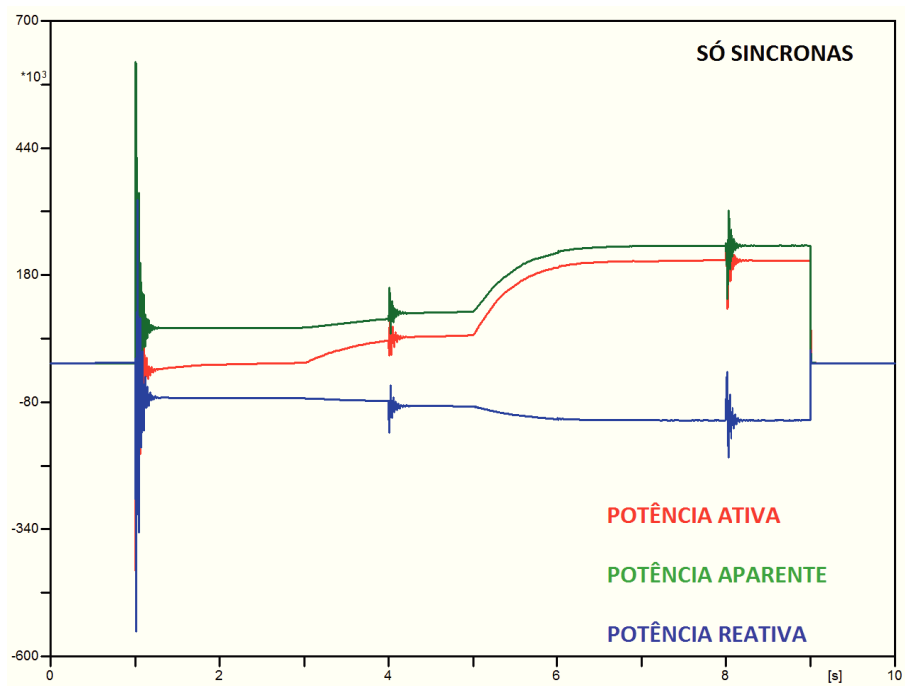


Figura 4.18: Débito de potências fornecidas pela máquina assíncrona.

# Capítulo 5

## Conclusões e trabalho futuro

### 5.1 Conclusões

O desenvolvimento desta dissertação, teve por base o software de simulação ATP, para efetuar a simulação de linhas de energia, de sistemas de produção de energia, bem como, o controlo de máquinas primárias de fornecimento ou de conversão de energia. Os modelos das máquinas disponibilizados no ATP, revelam ter um elevado potencial para simulação de máquinas elétricas, por permitir a utilização de parâmetros reais fornecidos por fabricantes.

Foram efetuadas simulações de sistemas de produção de energia, com base em energias renováveis, que demonstram bons comportamentos, nomeadamente situações de produção de energia eólica e de energia fotovoltaica.

O modelo da rede IEEE-30 adaptada, é uma rede que mantém duas zonas distintas de funcionamento. Quando isolada e fazendo uso dos seus parâmetros em modelos distribuídos, permite criar cenários reais de microrredes.

O modelo da máquina SM59 permitiu efetuar um controlo externo dos parâmetros da tensão aos seus terminais, utilizando um controlo AVR. Quando é ligada a máquina à rede são provocadas variações de frequências motivados pelas alterações do trânsito de potência. Essas alterações provocam distúrbios na frequência da rede que teria que ser controlada. Para efetuar o controlo da frequência, foi definido um controlo baseado no ajuste da potência mecânica/binário a atribuir à máquina. De acordo com os resultados das simulações efetuadas, verifica-se que esses ajustes de frequência são similares aos normalmente aos que teoricamente são aplicados às máquinas síncronas

e assíncronas.

Nos modelos em estudo, a SM59 e a IM, demonstram que os controlos aplicados não têm interferência no controlo interno das mesmas. A variação da potência mecânica ou do binário aplicados não tem influência na frequência pretendida, ou seja, os controlos internos da SM59 e os blocos definidos na IM, apenas servem para definir os parâmetros de potência motriz. De acordo com o obtido, importaria usar modelos que não fizessem o controlo interno automático, da frequência.

Define-se como grande potencialidade o ATP para verificação de transitórios, mas será um programa que tem algumas limitações, nomeadamente ao nível da rapidez de simulação para fenómenos transitórios, aquando é feito um estudo para uma rede completa, que inclui linhas aplicadas com valores de parâmetros distribuídos e cargas distribuídas.

No estudo efetuado para a implementação da SM59 não está definido que esta tenha um controlo automático de frequência. Contudo, por intermédio das simulações efetuadas, esta demonstra um comportamento idêntico ao de uma máquina com uma controlada. Relativamente à IM esta apresenta nos seus parâmetros de controlo, a possibilidade de desativar o controlo da potência com base nas variações da frequência. No entanto, pelas mesmas formas de simulação do que na SM59 esta demonstra que existe na mesma um controlo interno da frequência.

## 5.2 Propostas de trabalho futuro

Nesta dissertação, uma vez que existiam diversas formas de simulações a serem estudadas, e devido a limitações de tempo, que poderiam permitir desenvolver mais exaustivamente outras formas de simulação ou mesmo aprofundar as mesmas, proponho como propostas de trabalhos futuros:

- A realização um cenário real de variações de vento a implementar no conversor efetuado, incluindo todas as variáveis influenciáveis pelo vento, para permitir uma simulação aproximada ao real de uma turbina eólica. A implementação da simulação da turbina eólica, acoplada a uma máquina primária, de tipo a definir, e aproveitando a conversão eletrónica AC-DC/DC-AC, poderá definir-se um novo cenário de interligação à microrrede, de forma a verificar os fenómenos transitórios na interligação ou mesmo o comportamento do sistema de conversão primária de energia;

- Fazer o aproveitamento de valores de incidência solar diários de uma determinada região, e a aplicar ao modelo de um sistema de células fotovoltaicas. Posteriormente, efetuar a conversão eletrônica DC-AC, interligando-a a uma microrrede de forma a verificar os comportamento desejados;

- Para definir um outro cenário mais real de uma microrrede poder-se-iam substituir as cargas lineares existentes na rede por modelos de máquinas assíncronas, ou seja, motores de potência variável em função da carga;

- Utilizar modelos de máquinas decompostas podendo definir todos os controles externos da mesma, nomeadamente ao nível do controlo da frequência em função da potência, e do controlo da energia reativa em função do controlo da tensão;

- Como o ATP tem imensos modelos de máquinas, poder-se-ia explorar uma maior variedade de máquinas, e definir outras para além das existentes de forma a possibilitar controlos de tensão e frequência, de forma externa.



# Bibliografia

- [1] R. Viral and D. Khatod, "Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 5146–5165, 2012.
- [2] E.I.A., "International energy outlook 2017," U. S. Energy Information Administration, Tech. Rep.
- [3] E. I. A., "International energy outlook 2017, with projections to 2050," U. S. Energy Information Administration, Tech. Rep.
- [4] W. Su, J. Wang, and J. Roh, "Stochastic energy scheduling in microgrids with intermittent renewable energy resources," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1876–1883, 2014.
- [5] A. Llaría, O. Curea, J. Jiménez, and H. Camblong, "Survey on microgrids: unplanned islanding and related inverter control techniques," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 2052–2061, 2011.
- [6] T. Basso, "IEEE 1547 and 2030 standards for distributed energy resources interconnection and interoperability with the electricity grid," National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., Tech. Rep., 2014.
- [7] P. Pourbeik, "Proposed changes to the WECC WT3 generic model for type 3 wind turbine generators," *Prepared under Subcontract No. NFT-1-11342-01 with NREL, Issued to WECC REMTF and IEC TC88 WG27*, vol. 12, no. 16, p. 11, 2013.
- [8] Y.-J. Wang, M.-J. Huang, and W.-C. Zeng, "Modeling of partially shaded photovoltaic modules using the shockley diode model in the environment of the alternative transients program."
- [9] D. A. Caixeta, G. C. Guimarães, and M. L. R. Chaves, "Modeling of a wind energy conversion system for dynamic analysis using ATP," 2014.
- [10] R. Book, "Alternative Transient Program," *CAUE - Comité Argentino de Usuarios do EMTP-ATP*, 2002.
- [11] L. M. Peres *et al.*, "Estudos de desempenho dinâmico de geradores síncronos de produtores independentes em sistemas de geração distribuída via atpdraw," 2013.
- [12] A. Engler, "Applicability of droops in low voltage grids," *International Journal of Distributed Energy Resources*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2005.
- [13] J. L. D. Garcia, "Modeling and control of squirrel cage induction generator with full power converter applied to windmills," Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona., 2009.

- [14] J. C. Das, *Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition, and Mitigation*. McGraw-Hill, 2010.
- [15] S. CIGRE, WG02, “33.02, Guidelines for representation of network elements when calculating transients,” *CIGRE Technical Brochure*, vol. 39, 1990.
- [16] E. Reguladora dos Serviços Energéticos, *A Regulação da Energia em Portugal 2007-2017*, ERSE, Ed., 2016.
- [17] C. de Ministros, “Resolução do Conselho de Ministros n.º 154/2001,” Outubro 2001.
- [18] L. Prikler and H. K. Høidalen, “Atpdraw version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista-Users’ Manual,” *European EMTP-ATP Users User Group*, 2009.
- [19] A. Andrade, “Efeitos das injeções distribuídas no sistema de proteção das redes eléctricas de distribuição,” Master’s thesis, Universidade de Coimbra - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- [20] R. A. Kordkheili, B. Bak-Jensen, J. R-Pillai, and P. Mahat, “Determining maximum photovoltaic penetration in a distribution grid considering grid operation limits,” in *2014 IEEE PES General Meeting | Conference Exposition*, July 2014, pp. 1–5.
- [21] I. E. A., *Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets*, International Energy Agency, Ed. IEA Publications, 2002.
- [22] IAPMEI, “Estratégia nacional de investigação e inovação para uma especialização inteligente 2014-2020 (diagnóstico de apoio às jornadas de reflexão estratégica - energia.”
- [23] F. A. Santos and F. M. Santos, “Geração distribuída versus centralizada,” 2008.
- [24] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. Papathanassiou, and N. Hatziargyriou, “Making microgrids work,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 40–53, May 2008.
- [25] G. J. P. Vieira *et al.*, “Desequilíbrios de tensão em micro-redes durante o funcionamento em modo isolado,” Ph.D. dissertation, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [26] G. Liu, M. R. Starke, and A. N. Herron, “Microgrid controller and advanced distribution management system survey report,” Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), Tech. Rep., 2016.
- [27] J. P. Lopes, C. Moreira, and A. Madureira, “Defining control strategies for microgrids islanded operation,” *IEEE Transactions on power systems*, vol. 21, no. 2, pp. 916–924, 2006.
- [28] R. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, A. Meliopoulous, R. Yinger, and J. Eto, “The CERTS microgrid concept,” *White paper for Transmission Reliability Program, Office of Power Technologies, US Department of Energy*, vol. 2, no. 3, p. 30, 2002.

- [29] C. Moreira, F. Resende, and J. P. Lopes, “Using low voltage microgrids for service restoration,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 395–403, 2007.
- [30] N. Gil *et al.*, “Identificação de condições de operação em modo isolado e procedimentos de controlo de emergência para multi-micro-redes,” Ph.D. dissertation, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [31] N. Li, “Distributed optimization in power networks and general multi-agent systems,” Ph.D. dissertation, California Institute of Technology, 2013.
- [32] J. Taft, “Architectural basis for highly distributed transactive power grids: Frameworks, networks, and grid codes,” 2016.
- [33] “IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems,” *IEEE Std 1547-2003*, pp. 1–28, July 2003.
- [34] H. Godø, L. Langfeldt, and A. Kaloudis, “In need of a better framework for success: An evaluation of the norwegian participation in the EU 6th framework programme (2003–2006) and the first part of the EU 7th framework programme (2007–2008),” 2009.
- [35] A. Ali, W. Li, R. Hussain, X. He, B. W. Williams, and A. H. Memon, “Overview of current microgrid policies, incentives and barriers in the european union, united states and china,” *Sustainability*, vol. 9, no. 7, p. 1146, 2017.
- [36] J. Sanz, G. Matute, G. Fernández, M. Alonso, and M. Sanz, “Analysis of european policies and incentives for microgrids,” in *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Cordoba, Spain, 2014*, pp. 8–10.
- [37] H. W. Dommel, *Electromagnetic Transients Program: Reference Manual:(EMTP theory book)*. Bonneville Power Administration, 1986.
- [38] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, and R. J. Thomas, “matpower,” *IEEE Transactions on Power Systems*.
- [39] R. D. Zimmerman and C. E. Murillo Sanchez, “Matpower 6.0 users manual,” <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/manual.pdf>, Dec 2016.
- [40] H. kaur, Y. S. Brar, and J. S. Randhawa, in *2010 IEEE*.
- [41] J. A. H. I. Eiichi Haginomori, Tadashi Koshiduka, *Power System Transient Analysis: Theory and Practice using Simulation Programs (ATP-EMTP)*. Wiley, Maio 2016.
- [42] J. R. F. Lemos, “Modelagem de linhas de transmissão para estudos de transitórios eletromecânicos,” *Projeto Final, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro*, 2008.
- [43] M. Paz *et al.*, “Modelo reduzido de linhas de transmissão para transitorios eletromagnéticos: aplicação de propriedades complexas,” Master’s thesis, Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2005.

- [44] L. V. Bewley, "Traveling waves on transmission systems," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 50, no. 2, pp. 532–550, 1931.
- [45] S. K. Kim and E. S. Kim, "PSCAD/EMTDC-based modeling and analysis of a gearless variable speed wind turbine," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 421–430, June 2007.
- [46] P. M. Anderson and A. Bose, "Stability simulation of wind turbine systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 12, pp. 3791–3795, Dec 1983.
- [47] J. G. Slootweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, and W. L. Kling, "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 144–151, Feb 2003.
- [48] E. Lorenzo, *Solar electricity: engineering of photovoltaic systems*. Earthscan/James & James, 1994.
- [49] T. J. Quinn and J. Martin, "A radiometric determination of the stefan-boltzmann constant and thermodynamic temperatures between -40 degrees celsius and +100 degrees celsius," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 316, no. 1536, pp. 85–189, 1985.
- [50] L. Lu, A. Bhowmik, and P. Bos, "The effect of dielectric constant on ion adsorption in liquid crystal devices," *Liquid Crystals*, vol. 40, no. 1, pp. 7–13, 2013.
- [51] R. Chiumeo and C. Gandolfi, "A three phase photovoltaic power system connected to the mv network: Behaviour during voltage dips," in *Proc. of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ11), Las Palmas de Gran Canaria*, 2011, pp. 1–6.
- [52] H. Cho, S. Yeo, C. Kim, V. Terzija, and Z. Radojevic, "A steady-state model of the photovoltaic system in EMTP," in *The International Conference on Power Systems Transients (IPST2009), Kyoto, Japan*, 2009.
- [53] G. M. Babu, "Simulation study of indirect current control technique for shunt active filter," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 3, no. 4, pp. 831–851, 2013.
- [54] J. M. A. Aniceto, "Conversor dc-dc com busca de ponto de potência máxima (mppt) para painéis solares," Ph.D. dissertation, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010.
- [55] A. A. Domingues, "Gestão e encaminhamento da produção de sistemas híbridos destinados ao autoconsumo," Ph.D. dissertation, 2017.
- [56] P. Yadav, C. W. Cheah, A. S. Allana, T. Lye, C. S. Chang, S. K. Panda, and S. K. Sahoo, "Investigation of current harmonics in thruster ac drives in oil-rig platforms," in *2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, Nov 2009, pp. 920–925.
- [57] F. Alvarado, *Electromagnetic Transient Program (EMTP): Workbook III*, 1989.

- [58] E. Haginomori, “Applied ATP-EMTP to Highly - sophisticated electric power systems,” 2003.
- [59] H. Markiewicz and A. Klajn, “Voltage Disturbances - Standard EN 50160 - Voltage Characteristics in Public Distribution Systems.”
- [60] E. CENELEC, “50160, 1999 - voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems,” *European standard*, 1999.
- [61] R. Arunachalam, “Time-domain models for power system stability and unbalance,” 2006.
- [62] M. Guedes, “Corrente Alternada - sistemas polifásicos assimétricos,” *Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto*, vol. 2005, 1992.
- [63] A. S. Neto, F. A. Neves, P. A. Rosas, E. L. Pinheiro, and S. R. Silva, “Variable speed wind turbine modeling using atpdraw,” *VI Induscon, Joinville*, 2004.
- [64] J. Heo, M. Kim, and J. Lyu, “Implementation of reliability-centered maintenance for transmission components using particle swarm optimization,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 55, pp. 238–245, 2014.



# Apêndice A

## Rede IEEE-30

### A.1 IEEE-30 - Barramentos

Conforme referenciado no capítulo 4.2, os dados das tensões e das fases foram baseados na rede IEEE-30 barramentos.

Na tabela A.1, está representado um excerto da tabela definida na bibliografia <sup>1</sup>, para uma potência base de 100MVA.

Tabela A.1: Barramentos IEEE - 30 barramentos

Barramento	Tensão (kV)	Tensão (pu)	Ângulo de fase (deg)
1	132	1,0600	0,0000
2	132	1,0430	-5,4800
3	132	1,0210	-7,9600
4	132	1,0120	-9,6200
5	132	1,0100	-14,3700
6	132	1,0100	-11,3400
7	132	1,0020	-13,1200
8	132	1,0100	-12,1000
9	132	1,0510	-14,3800
10	33	1,0450	-15,9700
11	11	1,0820	-14,3900
12	33	1,0570	-15,2400
13	11	1,0710	-15,2400
14	33	1,0420	-16,1300
15	33	1,0380	-16,2200
16	33	1,0450	-15,8300
17	33	1,0400	-16,1400
18	33	1,0280	-16,8200
19	33	1,0260	-17,0000
20	33	1,0300	-16,8000
21	33	1,0330	-16,4200
22	33	1,0330	-16,4100
23	33	1,0270	-16,6100
24	33	1,0210	-16,7800
25	33	1,0170	-16,3500
26	33	1,0000	-16,7700
27	33	1,0230	-15,8200
28	132	1,0070	-11,9700
29	33	1,0030	-17,0600
30	33	0,9920	-17,9400

<sup>1</sup>[https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg\\_tca30bus.htm](https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm)

## A.2 IEEE 30 - Linhas

Conforme referenciado no capítulo 3.1.1, os dados das variáveis das linhas da rede IEEE-30 barramentos, foram baseados na tabela do ficheiro CDF do IEEE-30 barramentos.

Na tabela A.2, está representado um excerto da tabela definida na bibliografia <sup>2</sup> que representam as resistências, as reatâncias e a suscetância de cada linha em pu. A distância das linhas foram definidas através de valores típicos de resistências e de reatâncias, para determinadas tensões de linhas, apresentados na referência <sup>3</sup>.

Tabela A.2: Linhas IEEE - 30 barramentos

Linha N.º	Bus de origem	Bus de destino	Resistência R(pu)	Reatância X(pu)	Suscetância B (pu)	Distância (Km)
1	1	2	0,01920	0,05750	0,05280	20,04
2	1	3	0,04520	0,16520	0,04080	57,57
3	2	4	0,05700	0,17370	0,03680	60,53
4	3	4	0,01320	0,03790	0,00840	13,21
5	2	5	0,04720	0,19830	0,04180	69,10
6	2	6	0,05810	0,17630	0,03740	61,44
7	4	6	0,01190	0,04140	0,00900	14,43
8	5	7	0,04600	0,11600	0,02040	40,42
9	6	7	0,02670	0,08200	0,01700	28,58
10	6	8	0,01200	0,04200	0,00900	14,64
17	12	14	0,12310	0,25590	0,00000	5,57
18	12	15	0,06620	0,13040	0,00000	2,84
19	12	16	0,09450	0,19870	0,00000	4,33
20	14	15	0,22100	0,19970	0,00000	4,35
21	16	17	0,05240	0,19230	0,00000	4,19
22	15	18	0,10730	0,21850	0,00000	4,76
23	18	19	0,06390	0,12920	0,00000	2,81
24	19	20	0,03400	0,06800	0,00000	1,48
25	10	20	0,09360	0,20900	0,00000	4,55
26	10	17	0,03240	0,08450	0,00000	1,84
27	10	21	0,03480	0,07490	0,00000	1,63
28	10	22	0,07270	0,14990	0,00000	3,26
29	21	22	0,01160	0,02360	0,00000	0,51
30	15	23	0,10000	0,20200	0,00000	4,40
31	22	24	0,11550	0,17900	0,00000	3,90
32	23	24	0,13200	0,27000	0,00000	5,88
33	24	25	0,18850	0,32920	0,00000	7,17
34	25	26	0,25440	0,38000	0,00000	8,28
35	25	27	0,10930	0,20870	0,00000	4,55
37	27	29	0,21980	0,41530	0,00000	9,05
38	27	30	0,32020	0,60270	0,00000	13,13
39	29	30	0,23990	0,45330	0,00000	9,87
40	8	28	0,06360	0,20000	0,04280	69,70
41	6	28	0,01690	0,05990	0,01300	20,87

<sup>2</sup>[https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg\\_tca30bus.htm](https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm)

<sup>3</sup><http://www.mhi.ca/>

# Apêndice B

## Códigos fonte de modelos em ATP

### B.1 Modelo de simulação do vento

Conforme referenciado no capítulo 3.2.1.1, foi efetuado um modelo em ATPDraw para simular a representação do vento final, incorporando as diversas perturbações e alterações existentes na aplicação a uma máquina primária de geração de energia.

#### B.1.0.1 VBASE

```
MODEL VBASE
```

```
INPUT Kb
```

```
OUTPUT Vbase
```

```
VAR Vbase
```

```
INIT
```

```
    Vbase:=0
```

```
ENDINIT
```

```
EXEC
```

```
    Vbase:=Kb
```

```
ENDEXEC
```

```
ENDMODEL
```

#### B.1.0.2 VGUST

```
MODEL VGUST
```

```
INPUT t1, tsgust, Tgust, AMPgust
```

```
OUTPUT Vgust
```

```
VAR Vgust, Vcos, Vcos1, Vcos2, Vcos3, Vcos4
```

```
INIT
```

```
    Vgust:=0
```

```
ENDINIT
```

```
EXEC
```

```
    Vcos1:=AMPgust/2
```

```
    Vcos2:=Vcos2=(1-(cos(PI+PI)))
```

```
    Vcos3:=t1/tsgust
```

```
    Vcos4:=tsgust/Tgust
```

```
    Vcos:=Vcos1*(Vcos2*(Vcos3-Vcos4))
```

```

IF (t1<(ts_gust)) THEN
Vgust:=0
ELSIF (t1>(ts_gust+Tgust)) THEN
Vgust:=0
ELSE
Vgust:=Vcos
ENDIF
ENDEXEC

```

ENDMODEL

### B.1.0.3 VRAMP

```

MODEL VRAMP
INPUT t2, ti_ramp, tf_ramp, te_ramp, ts_ramp, AMPramp
OUTPUT Vramp
VAR Vramp, Vr, Vr1, Vr2
INIT
  Vramp:=0
ENDINIT

```

```

EXEC
Vr1:=(t2-(te_ramp))
Vr2:=((ts_ramp)-(te_ramp))
Vr:=(AMPramp*(1-(Vr1/Vr2)))
IF (t2<ti_ramp) THEN
Vramp:=0
ELSIF (t2>(tf_ramp)) THEN
Vramp:=0
ELSE
Vramp:=Vr
ENDIF
ENDEXEC

```

ENDMODEL

### B.1.0.4 VNOISE

```

MODEL VNOISE
DATA N, Kn, F
INPUT t3, Dw, thetai, micro
OUTPUT Vnoise
VAR Vnoise, Sv, wi, Sv1 ,i ,Sv2 ,Sv3 ,Vnoise1 ,Vnoise2 ,Vnoise3 ,Vnoise4 ,Vn
INIT
  Vnoise:=0
  Vn:=0
ENDINIT

```

EXEC

```

FOR i:=1 to N DO
wi:=(i-(1/2))*Dw
Sv1:=(2*Kn*F*F*abs(wi))
Sv2:=(1+((F*wi/micro*PI)*(F*wi/micro*PI)))
Sv3:=((PI*PI)*(Sv2**(4/3)))
Sv:=Sv1/Sv3
Vnoise1:=(Sv*Dw)**1/2
Vnoise2:=wi*t3+thetai
Vnoise3:=cos(Vnoise2*PI/180)
Vnoise4:=Vnoise1*Vnoise3
Vn:=Vn+Vnoise4
Vnoise:= 2*Vn
ENDFOR
ENDEXEC

```

ENDMODEL

#### B.1.0.5 VWIND

```

MODEL VWIND
INPUT Vbase, Vgust, Vramp, Vnoise
OUTPUT Vwind
VAR Vwind
INIT
  Vwind:=0
ENDINIT

EXEC
  Vwind:=(Vbase+Vgust+Vramp+Vnoise)
ENDEXEC

```

ENDMODEL

## B.2 Modelo de simulação do vento

De acordo com a formulação da velocidade do vento, descrita no capítulo 3.2.1.2, foi representado por intermédio de MODEL's em ATPDraw a sua conversão, de forma a definir a sua potência mecânica e o seu binário produzido.

#### B.2.0.1 E

```

MODEL EE
INPUT m, Vwind
OUTPUT EE
VAR EE
INIT
  EE:=0
ENDINIT

```

```

EXEC
EE:=((1/2)*m*Vwind*Vwind)
ENDEXEC

```

ENDMODEL

### B.2.0.2 PWIND

```

MODEL PWIND
DATA ro
INPUT A, Vwind
OUTPUT Pwind
VAR Pwind, Pwind1
INIT
  Pwind:=0
ENDINIT

```

```

EXEC
Pwind1:=((1/2)*ro*A)
Pwind:=Pwind1*Vwind*Vwind*Vwind
ENDEXEC

```

ENDMODEL

### B.2.0.3 PMEC

```

MODEL PMEC
INPUT Wrotor,R, Vwind, Beta, Pwind
OUTPUT Pmec
VAR Pmec, Lambda, Lambdai, Cp
INIT
  Pmec:=0
  Lambda:=0
  Lambdai:=0
  Cp:=0
ENDINIT

```

```

EXEC
Lambda:=((Wrotor*R)/Vwind)
Lambdai:=(Lambda+(0.08*Beta)-(((Beta*Beta*Beta)+1)/0.035))
Cp:=0.22*((116/Lambdai)-(0.4*Beta)-5)
Pmec:=-Pwind*Cp
ENDEXEC

```

ENDMODEL

#### B.2.0.4 TMEC

```
MODEL TMEC
INPUT Wrotorb, Pmec
OUTPUT Tmec
VAR Tmec
INIT
    Tmec:=0
ENDINIT

    EXEC
    Tmec:=(Pmec/Wrotorb)
    ENDEXEC

ENDMODEL
```

### B.3 Modelo de controlo de frequência para máquina síncrona

De forma a descrever como referido capítulo 3.4.1.1, a necessidade de efetuar um controlo de frequência para a máquina síncrona. Todo o controlo é definido matematicamente para estabilização de valores de frequência, sendo o valor de "ENTRADA" através do DATA do "MODEL" do ATPDraw que define qual o máximo de potência admissível para a máquina que está a ser implementada.

- - - i. Modelo para controlo da frequência - - -

```
MODEL FREQCONTROL
```

- - ii. Variação limite da potência mecânica da máquina síncrona - -

```
DATA Pmecmaxima, freqfundamental
```

- - iii. Definição da entrada de frequência e saída de controlo - -

```
INPUT Fentrada, Pmecatual
```

```
OUTPUT Pmeccontrolo
```

- - iv. Definição de variáveis - -

```
VAR Pmeccontrolo, i, kp, Varfreq
```

- - v. Inicialização das variáveis - -

```
INIT
```

```
    Pmeccontrolo:=0
```

```
    i:=0
```

```
    kp:=0
```

```
    Varfreq:=0
```

```
    ENDINIT
```

```

- - vi. Controlo da frequência entre  $\pm 0.5\text{hz}$  - -
EXEC
  Varfreq:=freqfundamental-Fentrada

  kp:=Varfreq/Pmecatual

  FOR i:=1 to Pmecmaxima DO
  IF (Fentrada<0.50) THEN
  Pmeccontrol:=Pmecatual*kp
  ELSIF (Fentrada>0.50) THEN
  Pmeccontrol:=Pmecatual*kp
  ELSE

- - vii. Valor de controlo da potência mecânica a aplicar à máquina síncrona - -
Pmeccontrol:=Pmecatual

- - viii. Finalização - -
ENDIF
ENDFOR
ENDEXEC
ENDMODEL

```