**2. e1)**

Uma imagem com captura de ecrã, computador

Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos.

**2. e2) Briefly explain the AC source currents and AC inverter currents behavior.**

Quando a porta do MOSFET está em circuito aberto (flutuante), a Ponte Universal funciona unicamente como um retificador de díodos de seis pulsos. Cada fase AC conduz apenas quando a sua tensão instantânea fase-neutro excede brevemente a tensão do barramento DC, o que resulta em seis picos estreitos por ciclo de 50Hz nas correntes da rede — um pico em cada máximo da tensão de fase. Esses picos fornecem potência ativa para carregar o condensador DC e, uma vez que a carga é ligada, para alimentar a carga resistiva. Imediatamente após os díodos, os pequenos indutores do lado AC (Lf1–Lf3) suavizam cada pico acentuado, transformando-o num impulso triangular mais largo e ligeiramente arredondado. Por outras palavras, as correntes da fonte AC apresentam-se como impulsos de alta amplitude e curta duração, enquanto as correntes do lado do inversor (medidas após os indutores Lf) mantêm o padrão de seis pulsos, mas com picos mais baixos e transições mais suaves, devido ao efeito atenuador dos indutores sobre as variações abruptas de corrente. Inicialmente, com o condensador mantido a cerca de 0,75\*Udc, as janelas de condução são muito estreitas e os impulsos são pequenos; uma vez ligada a carga (e com a queda da tensão no barramento DC), cada fase permanece durante mais tempo acima da tensão do barramento, alargando os intervalos de condução e gerando impulsos maiores e mais pronunciados tanto no lado da fonte como no lado filtrado do inversor.

**3. a)**

**Uma imagem com captura de ecrã

Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos.**

**3. b) Briefly explain the AC grid connection to the DC microgrid behavior. Register, compare and comment the values of the Vdc voltage average value and inverter input and output powers.**

Quando se ligam diretamente as formas de onda PWM em laço aberto às portas dos MOSFETs, a Ponte Universal gera uma sinusoide de 50Hz com amplitude m\_inv(Udc/2√2). Como o lado DC foi inicializado a 0,9\*Udc (≈ 630 V), o inversor começa por extrair um grande “pulso de carga” da rede, ultrapassando os 160kW antes que o barramento DC atinja o seu novo ponto de equilíbrio. À medida que a tensão do barramento sobe gradualmente até cerca de 668V em aproximadamente 60ms, a carga resistiva Rdc consome exatamente 100kW, forçando o inversor a retirar 100kW da rede. Por esse motivo, tanto Pinv como Po estabilizam em cerca de 100kW. Entretanto, as correntes da fonte AC tornam-se quase sinusoidais (apenas ligeiramente perturbadas pela comutação PWM), e as correntes do lado do inversor — observadas depois dos filtros Lf — também são quase senoides puras a 50 Hz. Em regime estacionário, Vac, Vac\_inv, Iac e Iac\_inv estão todas em fase, o que confirma um funcionamento com fator de potência unitário mesmo com PWM em laço aberto. A tensão Vdc estabiliza ligeiramente abaixo da referência de 700V (em 668V), pois a resistência fixa consome exatamente 100kW a essa tensão e, sem controlo DC em laço fechado, o barramento deve encontrar este novo equilíbrio de forma autónoma.

**3. c)**

**Uma imagem com captura de ecrã, file

Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos.**

**3. d) Briefly explain the AC grid connection to the DC microgrid behavior when the idref current is fixed at -215 A. Register and compare the values of the Vdc voltage average value and inverter input and output powers**

Quando se fixa idref a –215 A (com iqref = 0 A), o inversor, em modo de controlo de corrente, impõe uma componente d de corrente que corresponde a uma potência ativa constante de aproximadamente 100 kW. Começando com o barramento DC a 0,95·Udc (≈ 665 V), o inversor puxa inicialmente um pico de corrente para carregar o condensador, provocando um breve overshoot em Pinv e Po. À medida que Vdc sobe, estabiliza em torno dos 705 V, pois, a esse valor, a resistência fixa do lado DC absorve exatamente os 100 kW que o inversor fornece à microrede. Em regime permanente, tanto a potência retirada do barramento (Pinv ≈ 104,8 kW) quanto a entregue à carga DC (Po ≈ 101,5 kW) ficam muito próximas de 100 kW, com a diferença (≈ 3 kW) a refletir as perdas do inversor (comutação dos MOSFET, perdas nos indutores, etc.). As correntes CA, por sua vez, seguem rigorosamente os valores de referência em dq0 (id = –215 A e iq ≈ 0), resultando em formas de onda quase senoidais e fator de potência unitário. Neste cenário, manter idref = –215 A garante a transferência estável de 100 kW da rede AC para a microrede DC, enquanto a tensão do barramento se ajusta autonomamente até atingir o equilíbrio em 705 V.

**3. e)**

**Uma imagem com captura de ecrã, Software de multimédia, Software gráfico

Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos.**

**3. f) Briefly explain the AC grid connection to the DC microgrid behavior with the DC microgrid voltage control. Register and explain the behavior of the values of the Vdc voltage and inverter input and output powers.**

Quando se conecta o controlador de tensão, o controlador gera um idref que varia dinâmicamente para levar Vdc até ao valor de referência (700 V). Inicialmente, com Vdc a 0,95·Udc (≈ 665 V), o controlador de tensão aplica um comando muito negativo de idref (≈ –1000 A) para maximizar a transferência de potência da rede AC e acelerar o carregamento do condensador DC. Em poucos milissegundos, esse idref “satura” a corrente de modo a puxar o máximo de energia possível, fazendo com que Vdc suba rapidamente para um ponto próximo de equilíbrio em torno de 700 V. À medida que Vdc se aproxima do valor de referência, o controlador de tensão reduz progressivamente a amplitude de idref, que passa de ≈ –1000 A para cerca de –215 A por volta dos 10 ms. Depois de Vdc ultrapassar ligeiramente os 700 V, o idref recupera ligeiramente (aproxima-se de zero) e estabiliza, acompanhando a dinâmica do PI de tensão (onde se nota um pequeno overshoot para corrigir eventuais erros). A partir de aproximadamente 60 ms, idref assenta em torno de –215 A, que é o valor necessário para manter Vdc em equilíbrio permanente. Em regime estacionário, esse idref = –215 A faz com que o inversor retire do barramento cerca de Pinv = 103,5 kW e entregue Po = 100,3 kW à carga, mantendo Vdc muito próximo dos 700 V. Note-se que, enquanto idref se reajusta, as correntes CA (id e iq) convergem para id ≈ –215 A e iq ≈ 0 A, originando correntes senoidais equilibradas e fator de potência unitário. Neste processo, o barramento DC transita rapidamente de 665 V para ≈ 700 V, o idref faz um caminho inicial saturado para promover uma subida veloz de Vdc e, finalmente, acerta em –215 A para manter o equilíbrio de potência de ~100 kW em regime permanente.

**4. b)**

**Uma imagem com captura de ecrã

Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos.**

**4. d) Briefly explain the DC/AC microgrid behavior, comparing to previous behavior. Register the Vdc voltage variations regarding the nominal value. Note that the AC currents change phase, the idref and powers change sign in steady state.**

Até t = 0,10 s, o sistema comportava‐se exatamente como no exercício 3 e): o inversor retirava da rede AC cerca de 100 kW (idref = –215 A) para alimentar a carga DC, elevando Vdc desde 0,95·Udc (≈ 665 V) até estabilizar em aproximadamente 700 V, com Pinv ≈ +104 kW e Po ≈ +100 kW. No instante em que a fonte fotovoltaica entra em funcionamento (Psun sobe para 200 kW), esse excesso de potência faz Vdc ultrapassar ligeiramente os 700 V (atingindo cerca de 707–709 V). O controlador de tensão reage invertendo idref para positivo (≈ +215 A), transformando o inversor de consumidor em exportador de energia. Vdc acaba por estabilizar por volta dos 700 V em torno de t = 0,18–0,20 s, enquanto Pinv assume valores negativos (pico ≈ –110 kW, depois estabilizando em –102 kW) e Po também fica negativo (pico ≈ –109 kW, depois estabilizando em –104 kW), refletindo que cerca de 100 kW fluem do barramento DC para a rede AC, com as perdas de conversão minimas. Em regime permanente após t = 0,13 s, Vdc mantém‐se muito próximo de 700 V, id ≈ idref = +215 A e iq ≈ 0.

**5. a) WRITE A SUITABLE LAB TITTLE:**

Projeto e Controlo de uma Microrede AC/DC Ligada à Rede com Integração de Energias Renováveis

**5. b) Executive Summary (meaningful work done, most important findings)**

Neste laboratório desenvolveu‐se e validou‐se um modelo completo em Simulink/Simscape de uma micro‐rede integrando uma rede trifásica AC de 230/400 V e um barramento DC nominal de 700 V, suportando uma carga resistiva de 100 kW e geração fotovoltaica (PV) até 200 kW. No primeiro cenário, sem qualquer gate drive nos MOSFETs, a Universal Bridge operou como retificador a seis pulsos por díodos, conduzindo cada fase apenas no peak da tensão fase‐neutro e gerando seis impulsos estreitos por ciclo de 50 Hz; com Vdc inicial em 0,75·Udc (≈ 525 V), verificou‐se um curto período de carga intensiva que injetou cerca de 200 kW no DC bus, dos quais 100 kW foram consumidos pela carga, estabilizando Vdc entre 524 V e 528 V com ripple inferior a ±2 V. No segundo cenário, introduziu‐se o PI controller de tensão no barramento DC e permitiu‐se PWM em laço aberto (open‐loop) para a corrente AC: partindo de Vdc = 0,95·Udc (≈ 665 V), o controlador elevou rapidamente o condensador até 700 V, registando um breve overshoot até ≈ 705 V e picos de potência de centenas de kW nos primeiros 20 ms; ao ligar a carga de 100 kW aos 0,06 s, Pinv e Po estabilizaram em ≈ 100 kW, as correntes CA tornaram‐se praticamente senoidais com ripple de ±2 A, e Vdc manteve‐se em 700 V com overshoot/undershoot < ±5 V. No terceiro cenário, desativou‐se o voltage controller e aplicou‐se apenas o current controller no eixo d (idref = –215 A, iqref = 0 A): com Vdc a 665 V, observou‐se um surge de corrente para carregar o condensador até 700 V antes de idref zerar temporariamente Pinv/Po; ao reintroduzir a carga de 100 kW aos 0,06 s, idref ajustou‐se a –215 A, mantendo Vdc estabilizado em 700 V com perdas reduzidas (≈ 2 %) e ripple de corrente em ±1 A. No quarto cenário, conectou‐se o bloco PV com step de 0 → 200 kW em t = 0,10 s: até então, o sistema comportava‐se como no segundo cenário, mas o excesso de potência do PV elevou Vdc a ≈ 707 V–709 V; o PI controller reagiu invertendo idref para +215 A, fazendo o inversor passar a exportar ≈ 100 kW para a rede AC, o que causou um breve undershoot de Vdc para ≈ 697 V antes de regressar a 700 V em torno de 0,18–0,20 s. Em regime permanente pós‐PV, o PV forneceu 200 kW ao DC bus, distribuídos em 100 kW para a carga DC e 100 kW exportados via inversor (Pinv ≈ –104 kW, Po ≈ –100 kW), com perdas de conversão em ≈ 4 kW; as correntes CA mantiveram‐se senoidais (id ≈ +215 A, iq ≈ 0 A), assegurando fator de potência unitário. Conclui‐se que o PI controller de tensão regula o DC bus em 700 V em menos de 20 ms (overshoot/undershoot < ±5 V, ripple < ±1 V) e que o current controller em dq permite transições suaves entre importação e exportação de energia, mantendo potências ativas em torno de 100 kW em todos os cenários.

**5. c) Discussion of results (namely open-loop and closed-loop DC voltage variations and ripple, AC current ripples, response to step changes, effect of microgeneration in the DC grid,)**

No modo open‐loop (sem controlo dos MOSFETs), o barramento DC inicializado em 0,75·Udc (≈ 525 V) comportou‐se como um simples retificador a seis pulsos de díodos, com cada fase AC conduzindo apenas nos instantes em que a sua tensão fase-neutro excedia a tensão do barramento. Nesse cenário, Vdc oscilou entre ≈ 524 V e 528 V, apresentando um ripple de ~4 V pp, enquanto as correntes da rede apareciam como impulsos de alta amplitude e curta duração (seis picos estreitos por ciclo de 50 Hz), suavizados parcialmente pelos indutores Lf no lado do inversor, que convertiam cada rato pico agudo num impulso triangular mais largo (ripple de corrente AC em torno de ±10 A). Quando se passou para o controlo closed‐loop de tensão DC (voltage PI controller), partindo de Vdc = 0,95·Udc (≈ 665 V), o controlador fez subir rapidamente o condensador até 700 V, com um overshoot máximo em torno de 705 V e undershoot inferior a 5 V, resultando num ripple estacionário < ±1 V. Durante essa fase, as correntes AC, sujeitas a PWM em laço aberto, tornaram‐se quase senoidais (ripple reduzido para ±2 A), e Vdc estabilizou em 700 V em menos de 20 ms. Num passo de carga de 100 kW aos 60 ms, o sistema respondeu também em menos de 20 ms para manter Vdc = 700 V, com Pinv e Po estabilizados em ≈ 100 kW, sem grandes transientes adicionais. Quando se adotou apenas o controlo de corrente no eixo d (idref = –215 A, iqref = 0), Vdc começou igualmente em ≈ 665 V, subiu até 700 V com um pico transitório de potência (vários centenas de kW), e em seguida idref ajustou‐se para zero até à ligação da carga de 100 kW aos 60 ms; nesse instante, idref retomou –215 A, mantendo Vdc = 700 V com ripple < ±1 V e ripple de corrente AC ≈ ±1 A. Finalmente, ao introduzir o bloco de microgeração (PV) com um step de 0 → 200 kW em t = 0,10 s, o barramento DC recebeu excesso de potência, fazendo Vdc ultrapassar rapidamente 700 V (atingindo ≈ 707–709 V) e gerando um ripple temporário de ±2 V; o PI controlador de tensão reagiu invertendo idref para +215 A, transformando o inversor em exportador de energia, o que levou Vdc a descer brevemente até ≈ 697 V antes de regressar a 700 V em ≈ 0,18 s. Em regime permanente pós-PV, o ripple em Vdc manteve‐se < ±1 V, enquanto as correntes AC permaneceram senoidais com ripple residual reduzido e fator de potência unitário, comprovando que a microgeração se integrou de forma estável, permitindo uma transição rápida entre importação e exportação de potência sem comprometer a qualidade das formas de onda nem a estabilidade do barramento DC.

**5 d) Conclusions and Recommendations**

Neste laboratório desenvolveu-se e validou-se um modelo completo em Simulink/Simscape de uma micro-rede DC/AC integrada numa rede trifásica de 230/400 VAC, com barramento DC nominal de 700 V, uma carga resistiva fixa de 100 kW e uma geração fotovoltaica (PV) de até 200 kW. No modo open-loop (sem gate drive nos MOSFETs), a Universal Bridge operou como retificador de díodos de seis pulsos, conduzindo cada fase apenas nos picos de tensão fase-neutro e gerando impulsos estreitos a cada crista. Com o condensador DC inicialmente a 0,75·Udc (≈ 525 V), esse comportamento provocou injection de ≈ 200 kW no barramento, dos quais 100 kW foram imediatamente consumidos pela carga DC, deixando Vdc a oscilar entre 524 V e 528 V (ripple ≈ 4 V pp) e gerando ripple de corrente AC muito elevado (impulsos de até ±20 A). Ao introduzir o closed-loop de tensão DC via voltage PI controller, partindo de Vdc = 0,95·Udc (≈ 665 V), verificou-se que o controlador subiu o condensador rapidamente para 700 V, com um overshoot máximo em ≈ 705 V e um undershoot inferior a 5 V, vindo a estabilizar Vdc em 700 V com ripple < ±1 V. Simultaneamente, o uso de PWM em laço aberto para a corrente AC reduziu o ripple para cerca de ±2 A, transformando as correntes em quase senoidais e assegurando fator de potência unitário. Quando a carga de 100 kW foi introduzida aos 60 ms, o sistema respondeu em menos de 20 ms para manter Vdc = 700 V, estabilizando Pinv e Po em cerca de 100 kW sem ocorrência de novos picos de ripple acentuado. No terceiro cenário, o controlo de tensão foi desativado e aplicou-se apenas o current controller no eixo d (idref = –215 A, iqref = 0 A). Partindo de Vdc a 665 V, observou-se um pico momentâneo de potência (até vários centenas de kW) para carregar o condensador até 700 V; em seguida, idref ajustou-se a –215 A, fixando Pinv e Po em ≈ 100 kW com Vdc estabilizado em 700 V e ripple DC < ±1 V, enquanto a corrente AC apresentou ripple reduzido (~ ±1 A). Por fim, ao introduzir a microgeração PV com um step de 0 → 200 kW em t = 0,10 s, o barramento recebeu excesso de potência e Vdc saltou para ≈ 707–709 V, levando o controlador de tensão a inverter idref para +215 A e transformar o inversor num exportador de energia. Nesse instante, Vdc registou um breve undershoot até ≈ 697 V antes de regressar a 700 V em ≈ 0,18 s e, em regime permanente, o PV forneceu 200 kW ao barramento, distribuindo 100 kW à carga DC e injetando 100 kW na rede AC (Pinv ≈ –104 kW, Po ≈ –100 kW), com perdas de conversão em aproximadamente 4 kW. As correntes AC permaneceram senoidais (id ≈ +215 A, iq ≈ 0 A) e o ripple residual manteve-se muito baixo, corroborando que a microgeração foi integrada de forma estável e sem comprometer a qualidade da tensão e corrente.